

Karl Hoffmann

Una introducción a la medición mediante bandas extensométricas

Editor :
Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt
Revised by Emilio Estany-Catalán, Barcelona, Spain

1 Introducción

El método habitual para evaluar las partes estructurales de máquinas, edificios, vehículos, aviones etc. (generalizando: de componentes) se basa en los cálculos de la resistencia de materiales.

Este método resulta adecuado mientras se conocen el tipo y la magnitud de la carga que actúa sobre el componente. Los problemas surgen sobre todo cuando la carga es desconocida o sólo se puede obtener aproximadamente. Antiguamente el riesgo de sobrecarga se contrarrestaba aumentando los márgenes de seguridad, es decir, sobredimensionando los componentes. Sin embargo, en la actualidad las estrategias de diseño exigen el ahorro de materiales, en parte por razones económicas, en parte para reducir peso. Para poder cumplir con los requisitos de seguridad y para proporcionar una duración adecuada a los componentes, es imprescindible conocer las tensiones a las que están sometidos. Por tanto es necesario realizar mediciones en condiciones de servicio.

La cantidad física empleada para la evaluación de componentes estructurales es la tensión mecánica que actúa sobre el material. Resulta prácticamente imposible determinar dichas tensiones en condiciones de servicio. El proceso radiográfico que podría resultar apropiado está sujeto a restricciones a la hora de su aplicación. Un método práctico para la determinación experimental de tensiones mecánicas se basa en un descubrimiento realizado en el año 1678 por el científico inglés *Robert Hooke* (1635-1703) [1-1]. Hooke encontró una relación entre la tensión del material y la deformación resultante. Esta deformación también ocurre en la superficie de los componentes y es, por tanto, accesible para la medición.

Una rama importante del análisis experimental de tensiones se basa en el principio de la medición extensométrica.

En sus comienzos se empleaban complicados dispositivos mecánicos para las mediciones de la deformación, y que mostraban la deformación utilizando relaciones de palanca de mil o incluso más. La figura 1.0-1. muestra un ejemplo.

Durante mucho tiempo este tipo de instrumentos fueron el único método disponible para realizar las mediciones extensométricas necesarias para el análisis de tensiones. A pesar de su diseño ingenioso y de la precisión de su fabricación, tenían desventajas intrínsecas que limitaron su rango de aplicación y redujeron su importancia:

- únicamente se pueden medir procesos estáticos
- se precisan fuerzas de su fijación elevadas para evitar que resbalen en caso de vibraciones
- la muestra debe estar fija respecto al observador
- el tamaño de los dispositivos limita su uso en los componentes pequeños, y en algunos casos la medición resulta imposible
- la base de medición relativamente larga únicamente proporciona resultados correctos si en ella la tensión está distribuida de forma uniforme
- las condiciones locales pueden ser imposibles para el observador
- el registro automático de la medición no es posible.

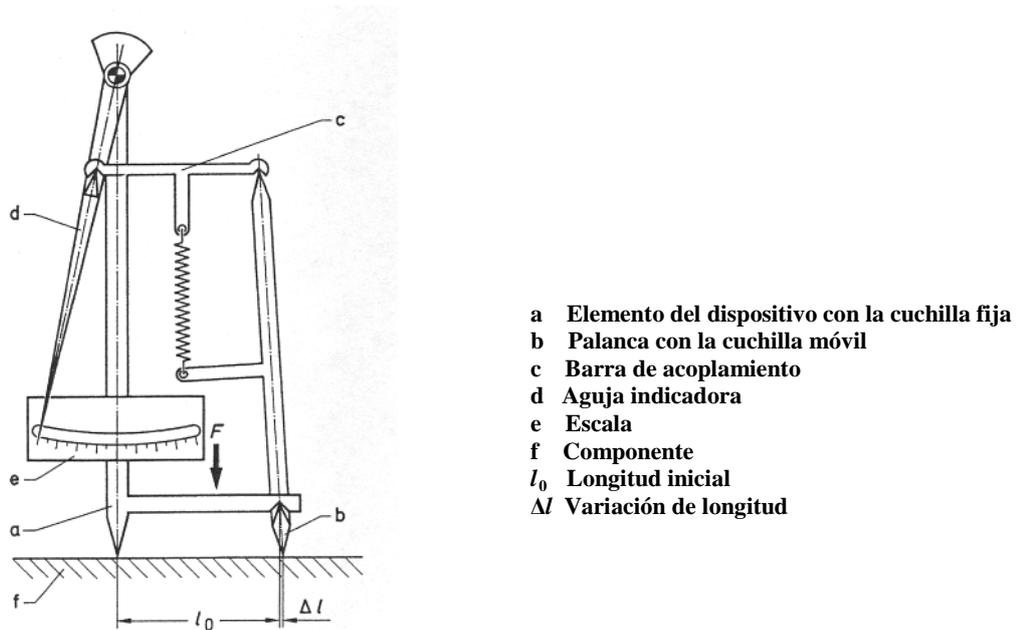


Figura 1.0-1: Esquema del tensómetro de *Huggenberger* con mecanismo de doble palanca

De entre todas estas desventajas, la restricción a mediciones estáticas resultó ser la más restrictiva. La solución a estos problemas llegaría con los métodos eléctricos de medición.

1.0.1 Bandas extensométricas metálicas

En la segunda mitad de los años treinta se prestó atención a un efecto mencionado por *Charles Wheatstone* en su primera publicación [1-2] de 1843 sobre el circuito que había inventado. Este efecto es la variación de la resistencia de un conductor eléctrico provocada por la acción de una tensión mecánica. *William Thomson* (1824 -1905, desde 1892 *Lord Kelvin*) fue más lejos en un trabajo publicado en 1856 [1-3].

Existen varias razones por las que pasaron más de 80 años antes de la aplicación técnica de este fenómeno.

La variación de la resistencia de un hilo bajo tensión es muy pequeña. Para su medición *Thomson* usaba galvanómetros altamente sensibles que eran inapropiados para un empleo generalizado o para su uso en la industria. Además sólo son adecuados para medir procesos estáticos. No fue hasta el desarrollo de los amplificadores electrónicos que se establecieron las condiciones necesarias.

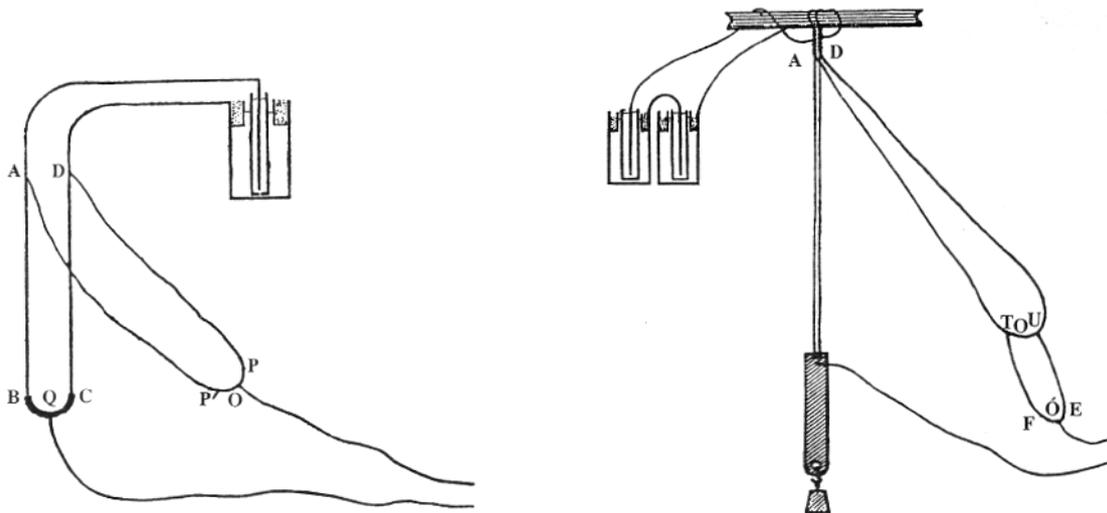


Figura 1.0-2: Experimento según *William Thomson* para investigar la variación de la resistencia de un conductor eléctrico bajo tensión. (Extraída de [1-3].)

En Alemania los primeros estudios para explicar el fenómeno se iniciaron en el instituto de investigación aeronáutica pero no se continuaron. Las bandas de película de carbono para la medición de la deformación desarrolladas por AEG resultaron ser de escasa utilidad.

Durante el año 1938 en los EEUU dos personas investigaron, casi al mismo tiempo pero de forma independiente, la idea de aprovechar el “efecto Thomson” para realizar mediciones. El proceso que llevó al desarrollo de la banda extensométrica y a su amplia difusión posterior, está descrito en detalle en [1-4].

Uno de los dos pioneros, *Edward E. Simmons*, trabajaba en California. Utilizando hilos de seda como urdimbre y un fino hilo metálico como trama fabricó un tejido que pegó a un cilindro de acero creando así un dispositivo eléctrico para medir las fuerzas ejercidas sobre una muestra por un péndulo de impacto, figura 1.0-3.

Arthur Claude Ruge, trabajaba en la Facultad de Sismología en el Massachusetts Institute of Technology y quería determinar la tensión producida por las vibraciones de un terremoto simulado sobre un modelo de cisterna resistente a terremotos.

Los equipos para la medición de la deformación disponibles en aquella época no se podían utilizar debido a las finas paredes del modelo. Ninguno de los numerosos dispositivos era apropiado. En un último intento Ruge tomó un fino hilo metálico, lo pegó en forma de meandro sobre un trozo de papel de seda fino y terminó las puntas con conexiones más gruesas. Para poder investigar las propiedades del prototipo lo pegó sobre una viga a flexión y comparó las medidas con un dispositivo tradicional de medición de deformación.

Aug. 11, 1942.

E. E. SIMMONS, JR
MATERIAL TESTING APPARATUS

2,292,549

Filed Feb. 23, 1940

2 Sheets-Sheet 2

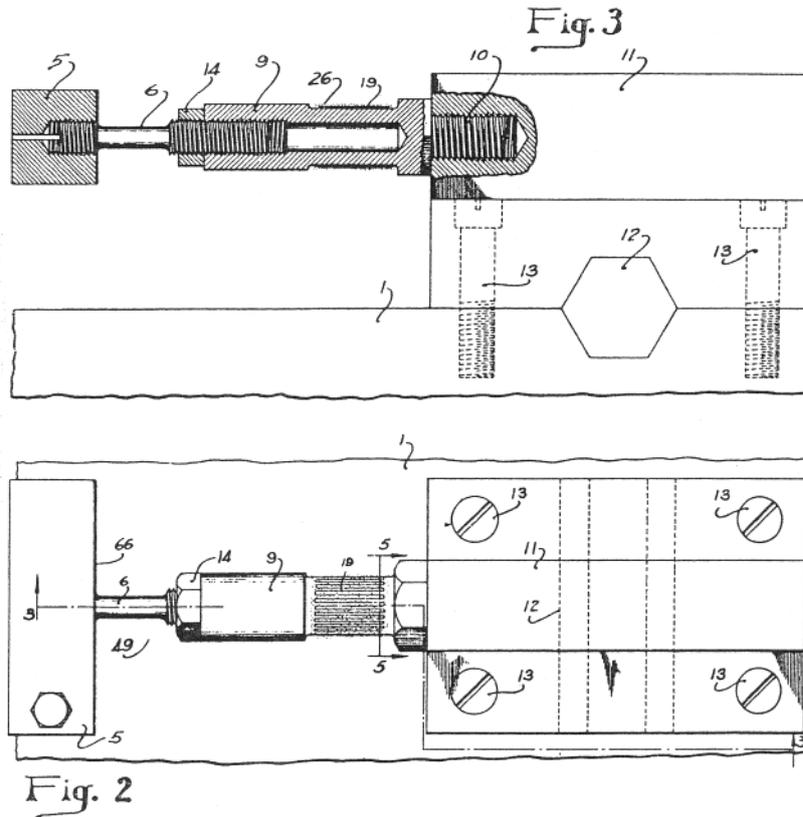


Fig. 2

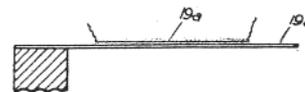


Fig. 7

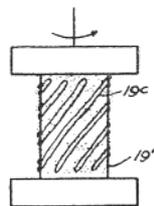


Fig. 8

INVENTOR
EDWARD E. SIMMONS, JR.
BY
Edward E. Simmons
ATTORNEY

Figura 1.0-3: Dispositivo para la medir fuerzas según E. E. Simmons tal y como está reproducido en [1-5]. La fuerza medida actúa en dirección axial

Observó una buena correlación con una relación lineal entre la deformación y los valores medidos a lo largo de todo el rango de medición, tanto para deformaciones positivas como para las negativas, incluyendo una buena estabilidad del cero. Así fue como se inventó la „Banda extensométrica de resistencia eléctrica con rejilla encolada”. La configuración empleada en aquellos primeros ensayos continua siendo prácticamente la misma en los dispositivos actuales.

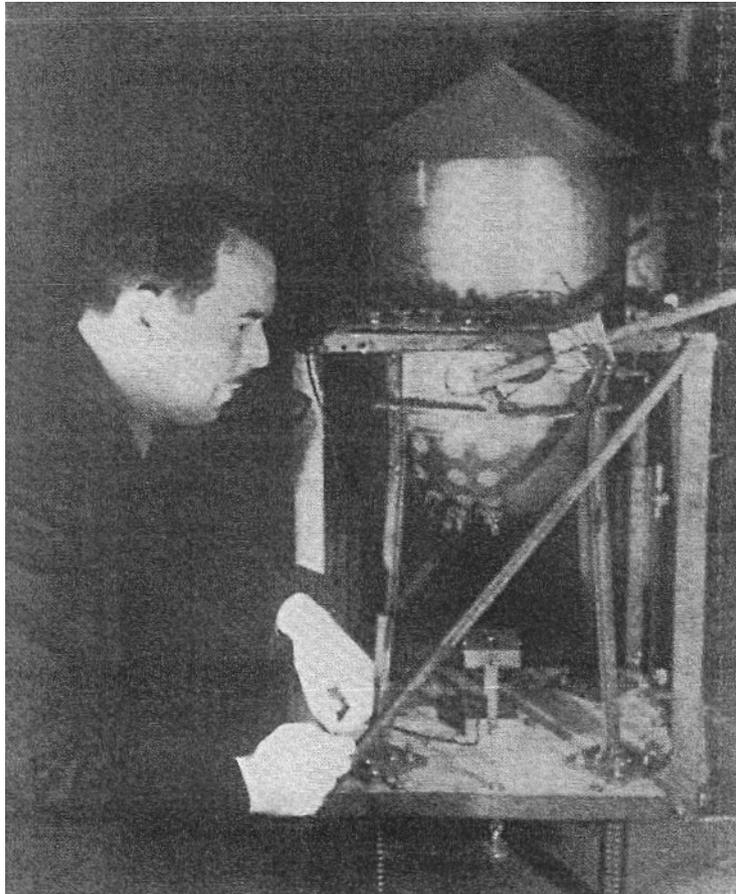
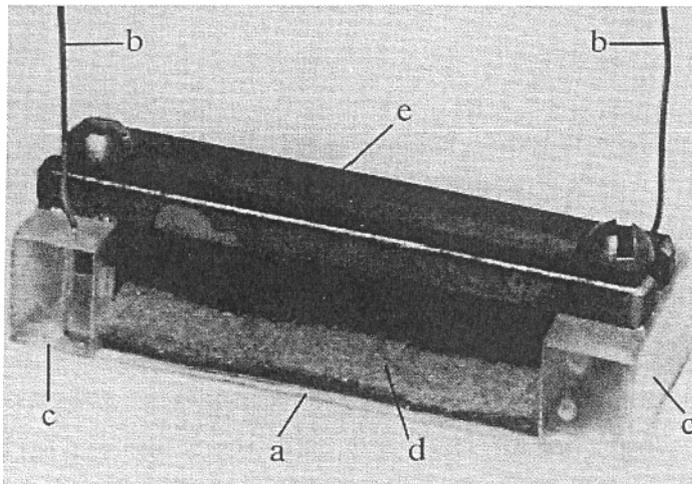


Figura 1.0-4: Arthur Claude Ruge, el inventor de la banda extensométrica, durante sus mediciones

La idea decisiva de Ruge que le distinguía de Simmons, fue que fijó el hilo de medida sobre un material de soporte creando un instrumento independiente fácilmente manejable, que se podía pegar sobre cualquier superficie. Era muy fino y ligero, no requería ninguna fuerza de fijación y prácticamente no presentaba efectos reactivos, permitiendo la medición en objetos muy delgados. Combinado con amplificadores electrónicos permitía mediciones tanto estáticas como dinámicas. Incluso los primeros prototipos ya se mostraron muy superiores a los demás instrumentos para la medición de la deformación.

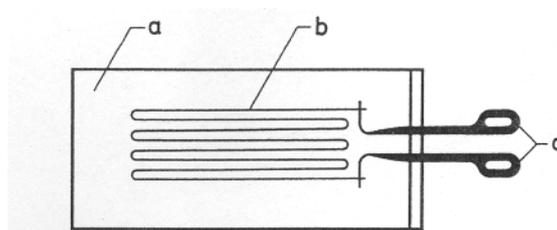
Un segundo logro de Ruge fue desarrollar de la banda extensométrica hasta que alcanzó la madurez de producción. Fue el hecho decisivo que inició la supremacía de la banda extensométrica. Queda, por tanto, justificado bautizar a Ruge como el padre de la banda extensométrica. No sólo tuvo la idea, sino que también vio las innumerables posibilidades de su aplicación y la determinación necesaria para convertir la banda extensométrica en un instrumento fiable para el análisis de tensiones. Sus trabajos científicos lo certifican. Al principio se creía que era necesario cubrir la delicada estructura con un marco rígido y que los finos hilos de tan sólo los 25µm de grosor debían ser protegidos con una cobertura de fieltro. La figura 1.0-5 muestra uno de los primeros ejemplares de banda extensométrica producidos en serie.



- a Rejilla de medición pegada a un papel con laca celulósica
- b Cables de conexión
- c Soportes aislantes
- d Cobertura de fieltro para proteger la rejilla de medición
- e Soporte temporal que se saca después de la fijación

Figura 1.0-5: El primer diseño de banda extensométrica apto para la producción de Ruge

La demanda, especialmente por parte de la industria aeronáutica americana era tan elevada que este tipo de configuración tuvo que ser descartado. (*Tatnall* [1-4] menciona un volumen de ventas de 50.000 bandas en dos meses de 1941!). Finalmente la experiencia mostró que la complicada estructura de protección era innecesaria y se introdujo el modelo simplificado mostrado en la figura 1.0-6, que se mantuvo durante varias décadas con tan sólo pequeños cambios. Numerosas patentes demuestran los constantes esfuerzos de Ruge por mejorar las propiedades de medición de su instrumento.



- a Material de soporte
- b Rejilla de medición
- c Conexiones

Figura 1.0-6: Diseño característico de una banda extensométrica con rejilla de medición de hilo

Posteriormente se probaron varias modificaciones para racionalizar la producción. Particularmente hay que destacar la técnica del “circuito impreso” de *Paul Eisler*, que en su forma refinada llevó al desarrollo de la “banda extensométrica impresa” a partir de 1952 [1-6].

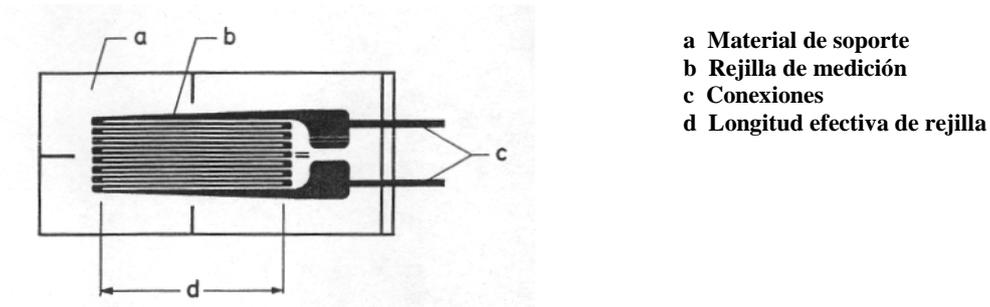


Figura 1.0-7: Diseño característico de una banda extensométrica con una lámina de metal impreso como rejilla de medición

Este método amplía considerablemente las posibilidades de diseño a todas las formas representables en un plano que son realizables sin esfuerzos adicionales. Formas en espiral son tan fácilmente fabricables como las redes que se utilizan para los transductores de fuerza, presión, pares de torsión u otras variables mecánicas.

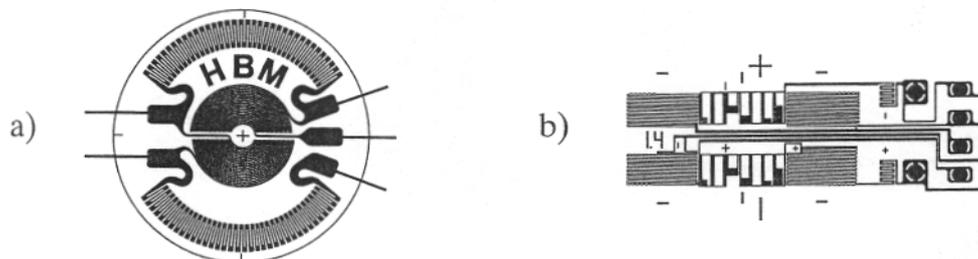


Figura 1.0-8: Ejemplos de diseños de bandas extensométricas con tecnología de láminas metálicas impresas
a) Una roseta con cuatro rejillas en diafragma con una configuración de puente para un transductor de presión.
b) Circuito de puente completo con bandas extensométricas incluyendo todas las conexiones y elementos de compensación.

Las bandas extensométricas se fabrican en una multitud de diseños distintos, proporcionando un método adaptable a distintas tareas de medición, incluso bajo las condiciones más difíciles. Las áreas fundamentales de aplicación de las bandas extensométricas son:

- El análisis experimental de tensiones, incluyendo las técnicas de medición de modelos y la biomecánica,
- la producción de transductores.

Mientras que la capacidad de adaptación de las bandas extensométricas contribuyó a su difusión en el área del análisis experimental de tensiones, fue su alta precisión de medición la que las hizo atractivas para la fabricación de transductores. Tanto las bandas extensométricas de circuito impreso como las bandas extensométricas de hilo enrollado son conocidas como bandas extensométricas metálicas debido a sus rejillas de medición de aleación metálica.

1.0.2 Bandas extensométricas semiconductoras

Junto a las bandas extensométricas metálicas existen otros tipos de bandas extensométricas de resistencia eléctrica. Las bandas extensométricas semiconductoras forman parte de este grupo y amplían el área de aplicación de las técnicas de medición mediante bandas extensométricas. El principio de medida se basa en el efecto piezoresistivo de los semiconductores descubierto por *C. S. Smith* en 1954. Originalmente se usaba germanio pero más tarde fue sustituido por el silicio.

La construcción de las bandas extensométricas semiconductoras es muy similar a la de las bandas extensométricas metálicas. El elemento de medida está formado por una tira de unas pocas décimas de milímetro de anchura y unas pocas centésimas de milímetro de grosor que se fija a una lámina portadora aislante y que está provista de conexiones. El efecto diodo se evita utilizando finos hilos de oro como conexiones entre el elemento semiconductor y las conexiones.

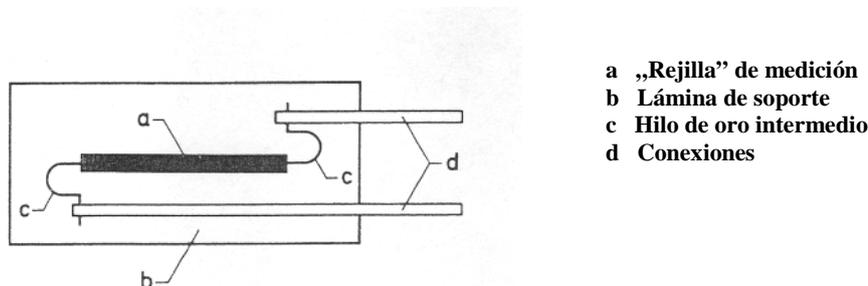


Figura 1.0-9: Representación esquemática de una banda extensométrica semiconductor

La sensibilidad a la deformación (la relación entre la deformación medida y la señal de la banda extensométrica) es entre cincuenta y sesenta veces mayor que la de las bandas extensométricas metálicas. Por ello estas bandas se emplean ante todo en la fabricación de transductores para medir otras cantidades físicas, los cuales pueden complementarse con simples dispositivos electrónicos para formar transmisores.

Las bandas extensométricas semiconductoras casi no se utilizan para el análisis experimental de tensiones por varios motivos:

- Las características no lineales de las bandas extensométricas semiconductoras exigen corregir las mediciones que requieren una alta precisión.
- Las bandas extensométricas semiconductoras tienen un coste muy elevado comparado con el coste de las bandas extensométricas metálicas.
- La influencia de la temperatura es mayor y más difícil de compensar.
- Debido a la fragilidad del material semiconductor su manipulación es más complicada.

Por otra parte su gran sensibilidad es un argumento para su uso en la medición de deformaciones muy pequeñas. La señal de gran amplitud puede ser una ventaja en presencia de fuertes campos de interferencia.

Junto a las bandas extensométricas convencionales existen también otros tipos que se comentarán para ser completos pero que no se tratarán en detalle.

1.0.3 Bandas extensométricas de deposición de vapor (o de película delgada)

La técnica de la deposición de vapor aporta un tercer tipo de bandas extensométricas de resistencia eléctrica. En este caso el elemento de medida se deposita al vacío directamente sobre el punto de medición mediante vaporización de los componentes de la aleación. Las bandas extensométricas de deposición de vapor únicamente se utilizan para la producción de transductores[1-7].

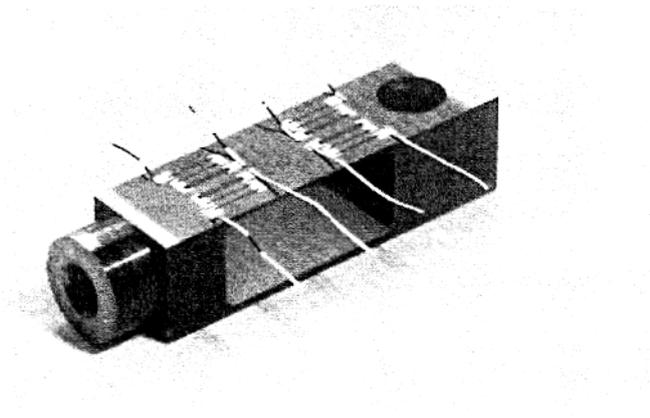


Figura 1.0-10: Banda extensométrica de deposición de vapor sobre el cuerpo elástico de un transductor

La producción de bandas extensométricas mediante la técnica de deposición de vapor se intentó en varias ocasiones pero los resultados no fueron satisfactorios [1-8, 1-9] y se paralizaron las investigaciones. En [1-10] se describen otros esfuerzos para fabricar bandas extensométricas de deposición de vapor. Durante los últimos 20 años no se ha constatado ningún incremento de las ventas de este tipo de bandas extensométricas.

1.0.4 Bandas extensométricas capacitivas

Las bandas extensométricas capacitivas, recientemente desarrolladas, son fundamentalmente una alternativa a las bandas extensométricas convencionales para mediciones de deformación a altas temperaturas, donde se superen los límites de las bandas metálicas. Actualmente se conocen tres versiones diferentes:

1. Un desarrollo británico de la Central Electricity Research Laboratories (C.E.R.L.) en cooperación con la empresa Planer. Se trata de un condensador de placas, en el que la separación entre las placas varía según la deformación a medir.

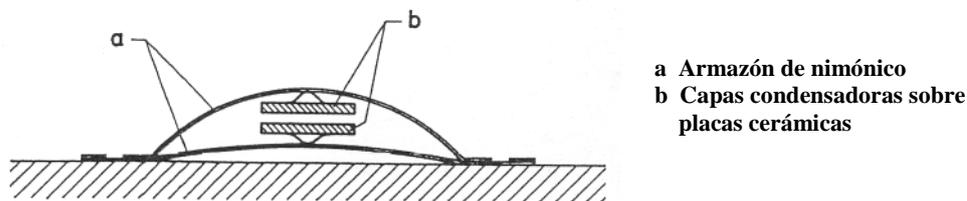


Figura 1.0-11: Esquema de una banda extensométrica capacitiva de CERL-Planer

2. Un desarrollo americano de Boeing Aircraft construido como condensador diferencial.

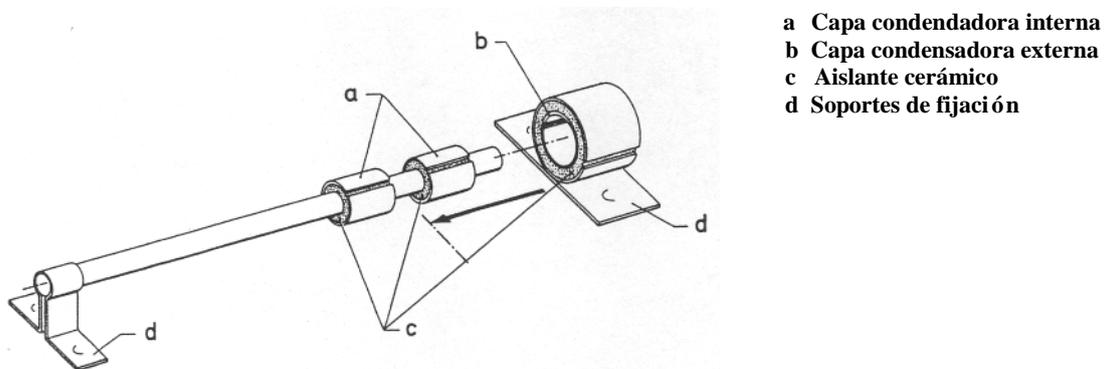


Figura 1.0-12: Esquema de una extensométrica de Boeing

3. Un desarrollo alemán de Interatom, realizado igualmente como condensador de placas.

Los transductores capacitivos se fijan sobre los objetos a medir a través de la soldadura por puntos.

Con las bandas extensométricas capacitivas se pueden obtener buenos resultados para temperaturas de hasta 500° C. Los resultados continúan siendo útiles hasta los 800° C.

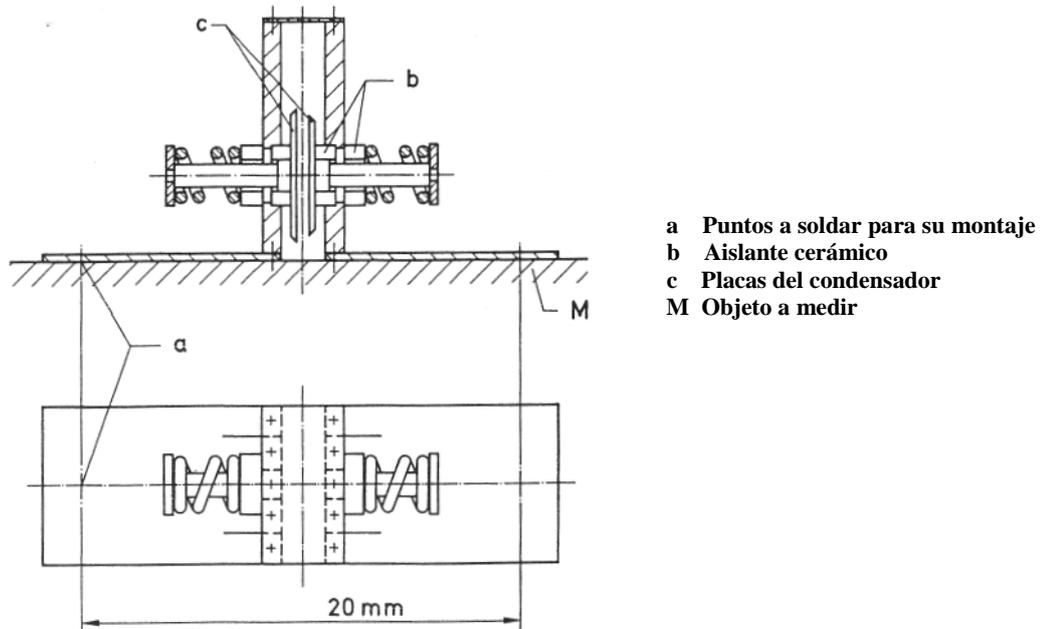


Figura 1.0-13: Esquema de una banda extensométrica capacitiva de Interatom

Las bandas extensométricas capacitivas no se tratará con más detalle debido a las técnica distinta de medición frente a las bandas extensométricas resistivas. Los que estén interesados encontrarán más información en las publicaciones [1-11 hasta 1-15].

1.0.5 Bandas extensométricas piezoeléctricas

Las bandas extensométricas piezoeléctricas son dispositivos activos. Se utiliza el titanato de bario como material sensible a la deformación. De forma similar a los transductores de cuarzo como material sensible a la deformación, la banda extensométrica proporciona una carga eléctrica en sus superficies proporcional a la deformación que se puede medir con amplificadores de carga. Sólo es posible realizar mediciones estáticas bajo ciertas condiciones.

La importancia de las bandas extensométricas piezoeléctricas fue muy limitada y según le consta al autor están fuera de uso.

1.0.6 Bandas extensométricas fotoelásticas

Una tira de material fotoelástico exhibe un campo isocromático debido al incremento de tensión. Las isocromáticas se desplazan a causa de la tensión. El grado de desplazamiento, que se lee con una escala, es una medida de la deformación. Las bandas extensométricas de este tipo se fabricaron en EEUU. Actualmente no se comercializan ya que no alcanzaron ningún significado práctico.

1.0.7 Bandas extensométricas mecánicas

Estos dispositivos son poco frecuentes pero tienen una larga tradición. Debido a su construcción sólo pueden ser aplicados en objetos grandes. El resultado de la medición es un pequeño trazo grabado sobre una placa de metal o sobre un cilindro de cristal, que solamente puede ser evaluado bajo el microscopio una vez finalizada la medición. Esta desventaja se contrarresta con el amplio intervalo de temperaturas admitidas. La grabación puede ser evaluada incluso en el supuesto caso de que el transductor sea víctima de un incendio [1-16].

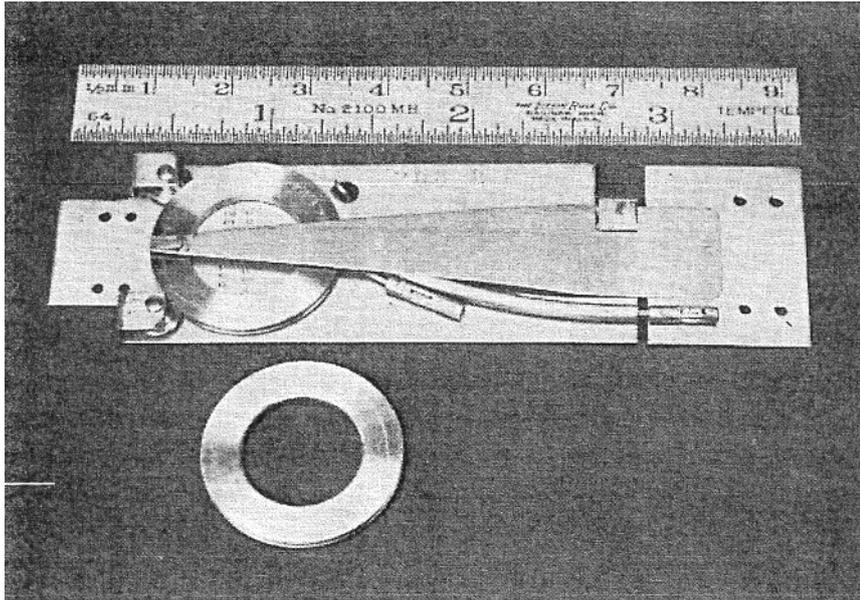


Figura 1.0-14: Medidor de deformación mecánico (según [1-6])

1.0.8 Otros sistemas

Existen otros numerosos dispositivos con la denominación „extensómetro“. Entre ellos se encuentran las bandas basadas en sistemas resistivos, sistemas inductivos (inductancia diferencial y transformadores diferenciales) y el método de la cuerda vibrante, así como algunos dispositivos mecánicos y ópticos. El tensómetro de Huggenberger, mostrado en la figura 1.0-1 también entra en esta categoría.

En la mayoría de los casos su señal no es proporcional a la deformación, es decir a la variación relativa de longitud, sino a su variación absoluta. La deformación tiene que ser calculada dividiendo el valor de la medición entre la longitud inicial. Estos instrumentos no son bandas extensométricas y por ello no serán tratados con más detalle.

1.1 El principio operativo de la banda extensométrica

Al medir una deformación con bandas extensométricas se asume que la deformación se transmite sin pérdidas desde el objeto a medir a la banda extensométrica. Esto último requiere una unión perfecta entre ambos. En la mayoría de casos sólo se tiene acceso a las superficies descubiertas del objeto. Aunque éstas se pueden encontrar tanto en cavidades internas como en el exterior del objeto. El mejor modo de lograr que haya la unión necesaria entre el objeto y la banda extensométrica es con adhesivos. La medición en el interior del objeto, es decir dentro de su masa, sólo es posible en casos especiales, por ejemplo cuando se integra la banda extensométrica durante el moldeo de piezas o cuando se puede embeber la banda en la mezcla de hormigón para la construcción. Estos casos requieren bandas encapsuladas específicas.

Otros materiales y métodos de fijación únicamente son aplicables en aplicaciones particulares como por ejemplo las fijaciones con cerámica para altas temperaturas o la fijación mediante puntos de soldadura para las construcciones de acero, etc. En ambos casos se requieren bandas extensométricas especiales.

Los diversos métodos de fijación serán descritos en el apartado 4.

En el caso de las bandas extensométricas resistivas, las únicas que se tratarán, la deformación del objeto a medir es transmitida a la banda y causa una variación de su resistencia eléctrica.

En la introducción ya se hizo referencia a dos tipos distintos de bandas extensométricas resistivas: las bandas extensométricas metálicas y las bandas extensométricas semiconductoras.

Su principio operativo se basa en dos procesos físicos diferentes que se explicarán brevemente a continuación.

1.1.1 Bandas metálicas

El funcionamiento de las bandas metálicas se basa en la relación deformación/resistencia de los conductores eléctricos descubierta por Wheatstone y Thomson (véase apartado 1.0.1).

Todo conductor eléctrico varía su resistencia debido a la aplicación de tensiones mecánicas, por ejemplo mediante fuerzas de tracción o de compresión. La variación de la resistencia se debe en parte a la deformación del conductor y en parte a la variación de la resistividad ρ del material a causa de cambios microestructurales.

El proceso se describe mediante la relación

$$\frac{dR}{R_0} = \underbrace{\varepsilon(1 + 2\nu)}_{\text{Porción geométrica}} + \underbrace{\frac{d\rho}{\rho}}_{\text{Porción microestructural}} \quad (1.1-1)$$

R = Resistencia eléctrica
 ε = Deformación
 ν = Coeficiente de Poisson
 ρ = Resistividad

Los resultados de una investigación de varios materiales se publicaron en [1-17]. El diagrama de la figura 1.1-1 es un extracto de dicha publicación. Los números junto a las curvas muestran la pendiente S , es decir el cociente entre la variación relativa de la resistencia $\Delta R/R_0$ y la deformación ε :

$$S = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon} \quad (1.1-2)$$

Las mediciones se llevaron a cabo sobre hilos tensados sin restricciones.

El diagrama destaca dos características:

1. Las pendientes iniciales de las distintas curvas muestran diferencias considerables. Van desde los + 6,5 del el iridio de platino 95/5 hasta los -10 del níquel. Estas diferencias se pueden explicar por las notables diferencias en la variación de resistencia causada por la microestructura del material.
2. Las pendientes de las curvas con pendiente inicial distinta a 2 varían a partir de ciertos niveles de deformación. Estos niveles de deformación difieren pero coinciden siempre con la transición de deformación elástica a deformación plástica. Si asumimos que en la región de deformación plástica el coeficiente de Poisson tiene un valor de $\nu = 0,5$ (volumen constante), la porción geométrica de la ecuación (1.1-1) es

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \varepsilon(1 + 2\nu) = \varepsilon(1 + 2 \cdot 0,5) = 2\varepsilon.$$

La porción microestructural se anula.

Por lo tanto resultan especialmente atractivos aquellos materiales que muestran una pendiente inicial igual a

$$S = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = 2 \frac{\Omega/\Omega}{m/m}$$

y la mantienen durante toda la deformación.

Las aleaciones que reúnen estas características son, por consiguiente, las preferidas para la fabricación de bandas extensométricas.

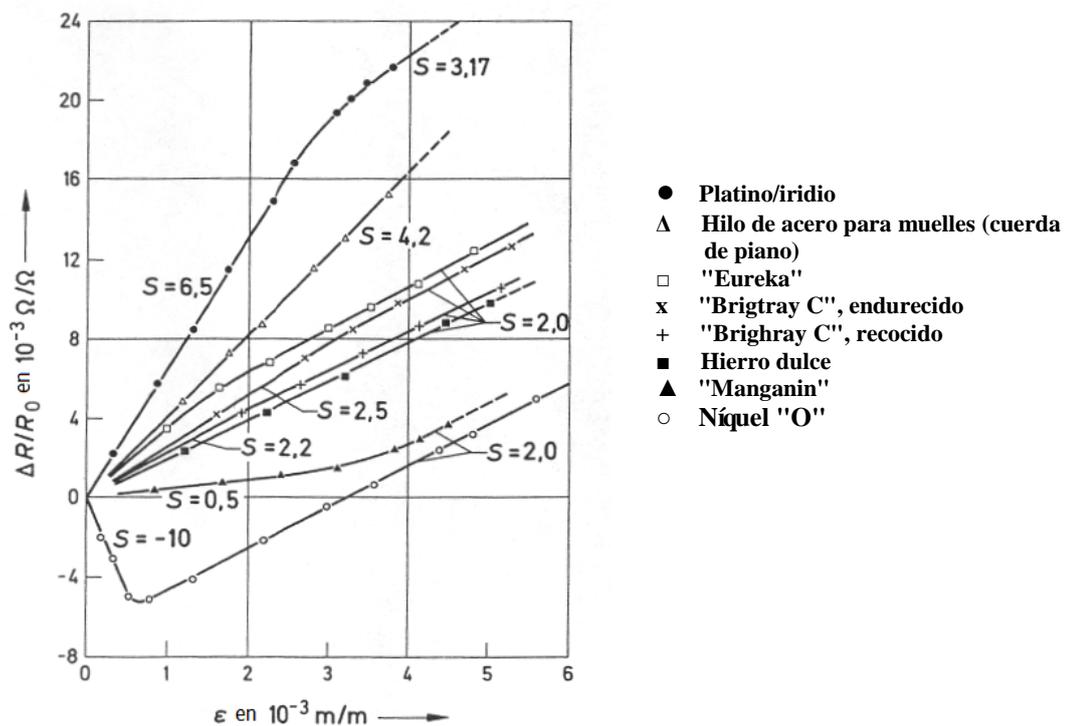


Figura 1.1-1: Características resistencia/deformación para hilos tensados sin restricciones (según [1-17])

1.1.2 Bandas semiconductoras

Al igual que para las bandas metálicas, el efecto utilizado para la medición con bandas semiconductoras se basa en la variación de la resistencia eléctrica. Sin embargo la relación resistencia/deformación se debe mayoritariamente a una variación de la movilidad de los electrones. La porción geométrica de la variación de resistencia es pequeña en comparación con las bandas metálicas y supone menos de un 2 %.

Actualmente sólo se utiliza el silicio para la fabricación de bandas extensométricas semiconductoras. Se extraen lingotes monocristalinos mediante el proceso de Czochralsky [1-18]. Para obtener la pureza necesaria (1 átomo de impureza por cada 10^{10} átomos de silicio), se extraen todos los átomos de impureza con el procedimiento de refinado por zonas. Posteriormente se añaden a la estructura cristalina ciertos átomos de impureza mediante difusión. Este proceso se denomina „dopaje“. Para el dopaje de los átomos de silicio cuadrivalentes se utilizan átomos trivalentes, átomos aceptores, como por ejemplo el boro o el galio, para formar semiconductores con conductividad tipo p mediante la creación de huecos. Si los átomos que se utilizan tienen cinco electrones de valencia, átomos donantes, como por ejemplo el fósforo o el arsénico, se produce un exceso de electrones y se forman semiconductores con conductividad tipo n. El nivel de dopaje determina la conductividad eléctrica. Una particularidad de los lingotes monocristalinos preparados de esta manera es que la variación de su resistencia eléctrica bajo la influencia de una deformación es de distinta magnitud para cada uno de los tres ejes de la estructura cristalina. Se trata de un efecto anisotrópico. Para una deformación positiva un semiconductor de tipo p muestra una variación positiva de su resistencia en el eje $\langle 111 \rangle$, y un semiconductor de tipo n muestra una variación negativa de su resistencia en el eje $\langle 100 \rangle$. En el caso de una deformación negativa el efecto se invierte. Mientras estos efectos se manifiestan notablemente en las direcciones mencionadas, para el resto de direcciones axiales son mucho más débiles. En la figura 1.1-2 se puede observar que el factor de banda, es decir, la variación de la resistencia respecto a la deformación, depende de la conductividad del silicio y por lo tanto del nivel de dopaje.

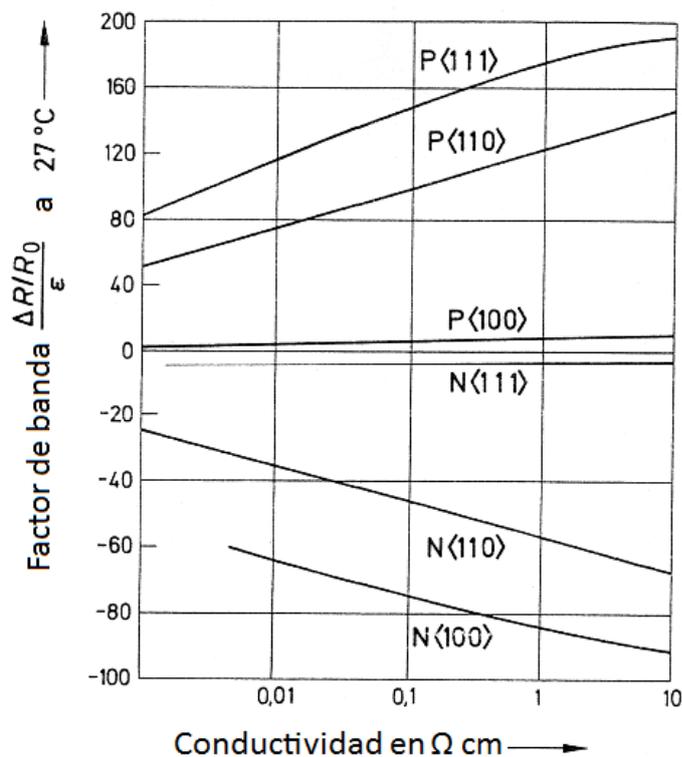


Figura 1.1-2: Factores de banda para lingotes monocristalinos de semiconductores de tipos p y n los tres ejes de la estructura cristalina en relación a su conductividad eléctrica (según [1-19])

Para la fabricación de bandas extensométricas el lingote monocristalino se dopa en finas tiras, cuya orientación longitudinal coincide con la dirección cristalina de mayor factor de banda.

Las bandas semiconductoras obedecen la relación

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \varepsilon \frac{T_0}{T} + C\varepsilon^2 \left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \dots \quad (1.1-3)$$

Los parámetros k , ε , T y C determinan su curva característica.

1.2 La cadena de medida

Las deformaciones que se miden con bandas extensométricas suelen ser muy pequeñas. Por consiguiente las variaciones de resistencia eléctrica son igualmente pequeñas y no se pueden medir directamente con un ohmímetro. Por lo tanto es necesario incluir la banda extensométrica en una cadena de medida que permita la determinación precisa de la variación de su resistencia.

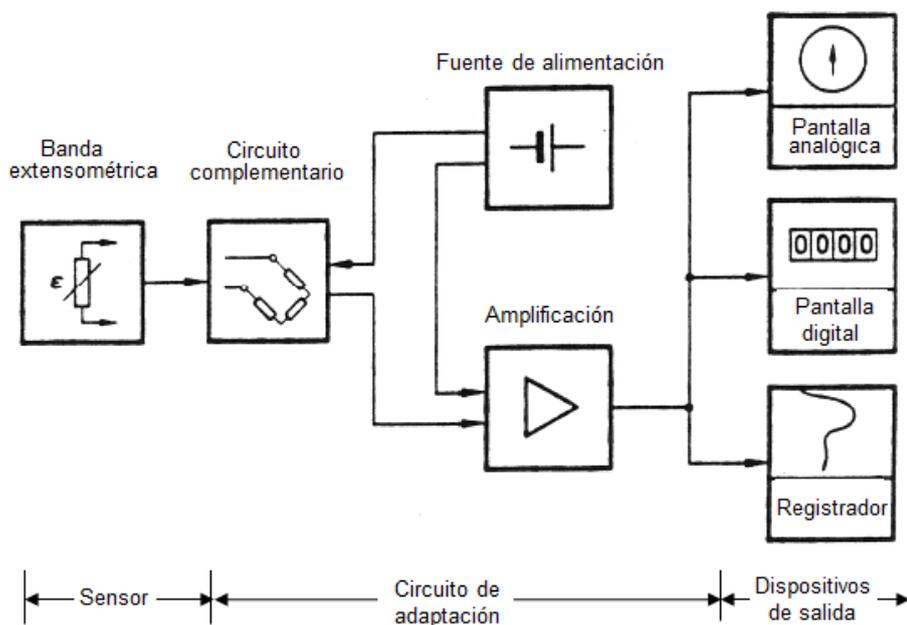


Figura 1.2-1: Esquema de una cadena de medida para la medición de deformaciones con una banda extensométrica

El primer componente de la cadena es la banda extensométrica que se encarga de transformar la deformación mecánica en una variación de resistencia eléctrica.

El segundo componente es un circuito de medición, se muestra un puente de Wheatstone con la banda como uno de sus brazos. Tanto la banda extensométrica como el circuito de medición son elementos físicamente pasivos. Se les tiene que suministrar energía para obtener una señal útil. Esta energía auxiliar proviene de una fuente externa, normalmente una fuente de tensión eléctrica constante, o en algunos casos también una fuente de corriente eléctrica constante.

Cuando la resistencia de la banda varía a causa de una deformación, el puente de Wheatstone pierde su simetría y se desequilibra. Así se obtiene una tensión a la salida del circuito proporcional al desequilibrio del puente (véase apartado 5).

Como tercer componente de la cadena de medición se añade un amplificador que amplifica la tensión proveniente del puente de Wheatstone al nivel necesario para el funcionamiento de los dispositivos indicadores. En ciertos casos los amplificadores pueden proporcionar una corriente eléctrica proporcional a la tensión de salida del puente de Wheatstone. Algunos modelos pueden suministrar tanto tensión como corriente. La tensión o corriente de salida de un amplificador lineal es proporcional a su tensión de entrada que se corresponde con la tensión de salida del puente de Wheatstone y por lo tanto también es proporcional a la deformación medida.

El cuarto componente de la cadena es el dispositivo indicador, que transforma la señal de salida del amplificador en un formato observable para el ser humano. En el caso más simple el resultado de la medición se muestra mediante la escala de un voltímetro o un amperímetro o con una serie de números en un dispositivo digital. Para registrar una deformación variable con el tiempo, es decir dinámica, es preferible el uso de dispositivos de grabación en lugar de meramente indicadores. La mayoría de amplificadores permiten la conexión de ambos tipos de dispositivos como alternativa o en paralelo como muestra la figura 1.2-1.

La descripción anterior de la cadena de medición sólo resume los elementos esenciales. En la práctica es común el uso de otros equipos adicionales, por ejemplo escáners, filtros, memorias de los valores de pico, interruptores de valor límite, grabadores de transitorios y otros. En lugar de los dispositivos indicadores se pueden conectar sistemas electrónicos de procesamiento de datos aumentando notablemente su versatilidad.

2 Términos y unidades utilizadas para la medición con bandas extensométricas

2.1 La deformación; definición y unidad de medida

En el lenguaje coloquial se utiliza el término „deformación“ para describir la elongación de una sección. Una deformación puede ser el resultado de la aplicación de una fuerza mecánica. Una goma elástica por ejemplo se alarga si se estira de ella. No obstante, una deformación puede presentarse sin que se haya aplicado ninguna fuerza, por ejemplo como resultado del calentamiento de un objeto.

En el primer caso se trata de una *deformación mecánica*.

En el segundo caso de una *deformación térmica*.

Se denomina „deformación“ por al proceso opuesto a la elongación o alargamiento. Una deformación por compresión (o acortamiento) ocurre también al aplicar una fuerza sobre el objeto, en este caso una fuerza de compresión. Cuando un cuerpo se enfría también ocurre un acortamiento debido a la contracción.

Surgen malentendidos a causa del uso coloquial del término deformación, ya que se refiere tanto a la variación de longitud absoluta como a la variación de longitud relativa. Esta confusión tiene raíces históricas.

2.1.1 Variación de longitud absoluta

Los primeros métodos, algunos de los cuales aun están en uso, medían la variación longitud absoluta de un objeto. Se empleaba el término “extensometría” para describir estos métodos de medición y actualmente aun se califica a los dispositivos como bandas “extensométricas”.

La variación de longitud absoluta Δl es la diferencia entre la longitud l (distancia entre dos puntos) en el momento de la medición y su longitud inicial, la longitud de base o longitud de referencia l_0 :

$$\Delta l = l - l_0 \quad (2.1-1)$$

Las variaciones de longitud absolutas se miden con dispositivos de medición de longitud o con dispositivos para medir la variación de longitud.
 La variación de la longitud Δl puede ser positiva o negativa como muestra la figura 2.1.1.

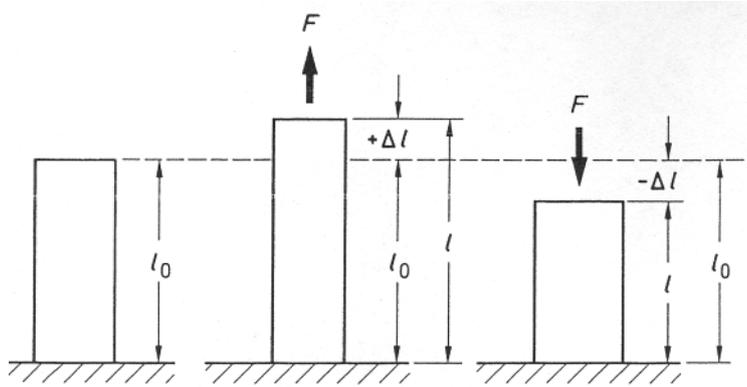
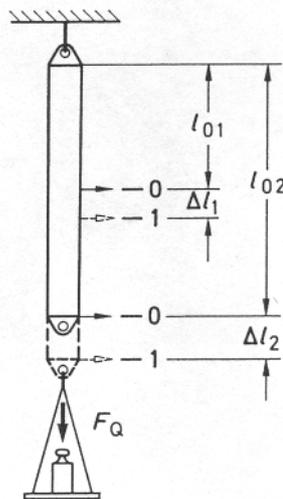


Figura 2.1-1: Variaciones de longitud absolutas Δl positivas y negativas

La ecuación (2.1-1) muestra como la variación de longitud absoluta, y por tanto el resultado de la medición dependen de la longitud de referencia seleccionada. La figura 2.1-2 muestra un experimento que ilustra este hecho.



**Figura 2.1-2: Experimento de „elongación absoluta“
 Aclaración en el texto.**

En un objeto en forma de tira, libremente suspendido, se marcan la longitud l_{01} y la longitud doble l_{02} como de base. Luego se aplica la fuerza F_Q sobre la tira. La medición muestra que la elongación Δl_2 es el doble que la elongación Δl_1 . Por tanto la variación de longitud es una función de la longitud de base:

$$\Delta l = f(l_0) \quad (2.1-2)$$

Sin embargo, si expresamos la variación de longitud en relación a la longitud de base obtenemos el mismo valor para ambos casos:

$$\frac{\Delta l_2}{l_{02}} = \frac{2 \Delta l_1}{2 l_{01}} = \frac{\Delta l_1}{l_1}.$$

2.1.2 Variación de longitud relativa o deformación

En el apartado „Variación de longitud absoluta“ ya se constató, que las relaciones $\Delta l_1 : l_{01}$ y $\Delta l_2 : l_{02}$ son equivalentes, asumiendo que las condiciones de deformación son las mismas. Por este motivo se utiliza la variación de longitud relativa como variable de medición en la teoría de la resistencia de materiales y para la extensometría. Se utiliza el símbolo ε para describir la elongación relativa.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.1-3)$$

El término „deformación“ es un término técnico recogido en la norma internacional ISO 31. Se utiliza el término deformación tanto para describir una elongación como para describir un acortamiento; en el primer caso se habla de una “deformación positiva”, en el segundo de una “deformación negativa”.

ε es positivo si Δl es positivo,
 ε es negativo si Δl es negativo.

2.1.3 La unidad de medida de la deformación [2-1]

Las longitudes se miden en la unidad de longitud, el metro [m]. La deformación ε se define como el cociente entre una variación de longitud Δl y una longitud de referencia l_0 (véase apartado 2.1.2). En consecuencia la unidad de deformación es [m/m]:

$$(\varepsilon) = \left\{ \frac{\Delta l}{l_0} \right\} \left[\frac{\text{m}}{\text{m}} \right].$$

Que es una ecuación adimensional.

Dado que las variaciones de longitud consideradas son normalmente muy pequeñas, se emplean los submúltiplos normalizados del metro como unidades:

$$\begin{aligned} 10^{-6} \text{ m} &= \mu\text{m} \\ 10^{-3} \text{ m} &= \text{mm} \\ 10^{-2} \text{ m} &= \text{cm} \end{aligned}$$

Dependiendo de la magnitud de la variación de longitud se escoge uno de los submúltiplos anteriores para obtener valores numéricos que sean de manejo cómodo. Dichas magnitudes se pueden escribir como potencias de diez o utilizando los prefijos estandarizados en DIN 1301. Los dos métodos son equivalentes (véase el ejemplo).

Ejemplo: Diferentes modos de representación de la unidad de medida de deformación.

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= 180 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{m}} = 180 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}. \\ \varepsilon_2 &= 2,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{m}} = 2,5 \frac{\text{mm}}{\text{m}} = 2500 \mu\text{m}/\text{m}. \\ \varepsilon_3 &= 3 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{m}} = 3 \frac{\text{cm}}{\text{m}} = 30000 \mu\text{m}/\text{m}.\end{aligned}$$

Frecuentemente se emplean también las designaciones

% en lugar de $10^{-2} \text{ m/m} = \text{cm/m}$
 ‰ en lugar de $10^{-3} \text{ m/m} = \text{mm/m}$.

Las unidades de porcentaje o por mil se deben reservar exclusivamente para las indicaciones de tolerancia. Se deben evitar para indicar medidas de deformación ya que se pueden confundir fácilmente con tolerancias o errores de medición como se muestra en el ejemplo siguiente.

Ejemplo: El significado de las indicaciones de porcentaje junto a valores de deformación.

- a) $\varepsilon = 2,72 \text{ cm/m} \pm 0,5\%$ significa:
 $27200 \mu\text{m}/\text{m} \pm 136 \mu\text{m}/\text{m}$,
- b) $\varepsilon = 2,72\% \pm 0,5\%$ no obstante, si el porcentaje se utiliza como medida de deformación significa:
 $27200 \mu\text{m}/\text{m} \pm 5000 \mu\text{m}/\text{m}!$

Las pseudo-unidades, como „micro-deformación“, „ μD “ o „ $\mu\varepsilon$ “, no tienen ningún fundamento matemático y no son conformes al cálculo dimensional. El ejemplo „ $\varepsilon = 250\mu\varepsilon$ “ demuestra que la denominación „ $\mu\varepsilon$ “, originario de EEUU, lleva a interpretaciones absurdas. Resulta matemáticamente inadecuado emplear símbolos de fórmula (ε por deformación) como unidades de medida.

Nota:

Una relación adimensional se caracteriza por tener la misma unidad en el numerador y en el denominador de la fracción, por ejemplo m/m. Esta fracción se podría simplificar matemáticamente, obteniendo un valor sin dimensión. Con ello se perdería la información física acerca de su origen a menos que se escribiera siempre : $\varepsilon = \dots 10^{-6}$ donde el símbolo de fórmula indica el significado del valor. En la medición con bandas extensométricas se reúnen varias relaciones adimensionales; como por ejemplo la variación relativa de la resistencia de la banda o la tensión relativa a la salida del puente de Wheatstone (véase el ejemplo, siguiente). Para evitar errores, es aconsejable indicar siempre la relación adimensional de las unidades.

Ejemplo: El uso de varias relaciones adimensionales.

Una deformación de

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = 0,001 \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

provoca en una banda extensométrica (con factor $k = 2$)

una variación relativa de su resistencia
$$\frac{\Delta R}{R_0} = 0,002 \frac{\Omega}{\Omega}.$$

En consecuencia se observa una tensión relativa a la salida del puente de Wheatstone (configurado en cuarto de puente).

$$\frac{U_A}{U_B} = 0,0005 \frac{\text{V}}{\text{V}}.$$

2.2 La tensión mecánica; definición y unidad de medida

Se define la tensión mecánica como la tensión ejercida sobre un material al aplicar una fuerza. Normalmente ocurre a causa de la aplicación de una fuerza externa, pero también a causa de fuerzas internas del material o de sistemas multicomponente. Las tensiones se clasifican de la siguiente forma

- a) Según el tipo: tensiones normales y de cizallamiento o cortantes;
- b) Según el origen: tensiones de tracción, compresión, flexión, torsión, residuales o térmicas.

Las tensiones mencionadas en b) se clasifican entre los tipos de tensiones mencionados en a). Es importante conocer el tipo de tensión para analizar la resistencia de los materiales, independientemente de su causa u origen.

Además se consideran estados de tensión uniaxiales, biaxiales, triaxiales y estados de tensión espaciales.

Las tensiones mecánicas no son accesibles a la medición directa. Las técnicas de rayos-X son una excepción, ya que se pueden determinar las tensiones del material en la escala microscópica a partir de las distorsiones en la estructura cristalina, es decir, a través de las variaciones relativas de la separación entre átomos. Este método está restringido a capas cercanas a la superficie con una profundidad de entre 5 y 15 μm [2-2].

Las tensiones se calculan según la teoría de la resistencia de materiales o a partir de las mediciones de deformación. Este último método se basa en la ley de Hooke (véase el apartado 8).

2.2.1 Las tensiones normales

Este término agrupa las tensiones de tracción y de compresión. Las tensiones normales surgen cuando se aplican fuerzas de tracción o compresión opuestas. La figura 2.2-1 muestra como se originan estas tensiones. El símbolo para la tensión normal es σ .

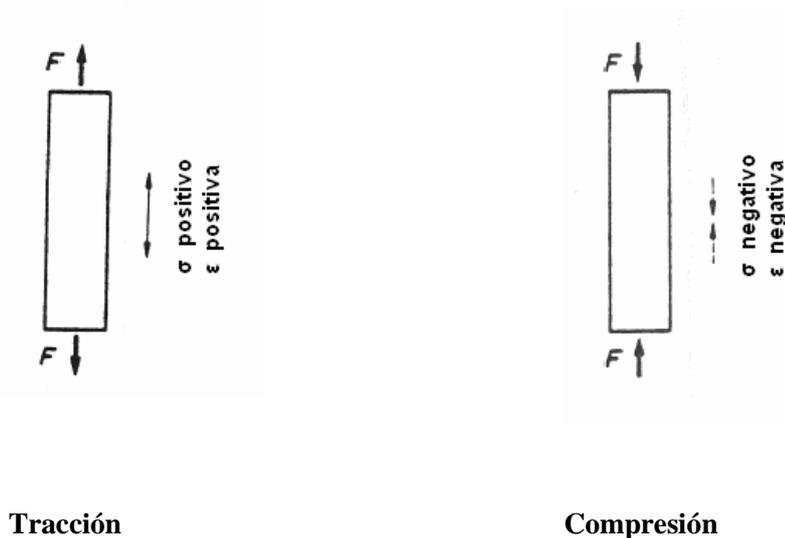


Figura 2.2-1: Tensiones normales positivas y negativas

Para la misma área de sección transversal la tensión en el material aumenta a proporcionalmente a la fuerza.

Si la fuerza es constante la tensión es inversamente proporcional al área de la sección transversal :

Área de la sección transversal grande \rightarrow tensión pequeña,
 Área de la sección transversal pequeña \rightarrow tensión grande.

Se requiere una fuerza en dirección opuesta para impedir que la pieza de la figura 2.2-1 sea arrastrada. Frecuentemente la fuerza de reacción no se identifica ya que proviene de las fijaciones u otras piezas de soporte. Las tensiones normales también aparecen en objetos en movimiento, por ejemplo en el calabrote entre un remolcador y un barco. Aquí la fuerza de la corriente contrarresta la fuerza de tracción del remolcador.

La tensión mecánica σ se define como el cociente entre la fuerza F y el área de la sección transversal de la pieza A :

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (2.2-1)$$

Las tensiones de tracción son positivas.
Las tensiones de compresión son negativas.

Antiguamente se utilizaban las siguientes unidades para la tensión mecánica:
en la ingeniería industrial o mecánica normalmente kp/mm^2
en la ingeniería civil normalmente kp/cm^2 .

Según el sistema SI (Système International d'Unités) [2-3 a 2-5] la unidad de fuerza es el “Newton” [N] y la unidad de área es el “metro cuadrado” [m^2], obteniéndose para la tensión mecánica el [N/m^2], conocida como „Pascal“ [Pa].

$$1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}.$$

Con esta unidad se obtienen valores numéricos muy grandes, por eso frecuentemente se expresa la fuerza en múltiplos decimales, daN o kN y el área en submúltiplos decimales, como por ejemplo cm^2 o mm^2 . Esto último está permitido por la normativa legal.

$$\begin{aligned} 1 \text{ N/mm}^2 &= 100 \text{ N/cm}^2 \\ 1 \text{ N/mm}^2 &= 10^6 \text{ Pa} (= \mathbf{1MPa}) \\ 1 \text{ N/cm}^2 &= 10^4 \text{ Pa} \end{aligned}$$

En alguna ocasión se puede ver daN/mm^2 , designación que lleva a valores similares a la antigua unidad kp/mm^2

$$1 \text{ daN/mm}^2 = 10 \text{ N/mm}^2 \approx 1 \text{ kp/mm}^2$$

Esta denominación únicamente representa un compromiso con la antigua costumbre aunque es inadecuada. En este libro se utilizará únicamente la denominación N/mm^2 .

2.2.2 Tensión de cizallamiento (o tensión cortante)

En el caso de las tensiones normales las fuerzas de tracción y de compresión actúan siempre sobre el mismo eje. Intentan comprimir o despedazar la pieza dependiendo de si están orientadas la una hacia la otra o al revés. Las tensiones de cizallamiento son otro tipo de tensiones esencialmente diferentes.

Para entender su origen hay que imaginarse dos fuerzas F_1 y F_2 que actúan en sentidos opuestos, pero únicamente separadas por una pequeña distancia, tal y como las que provocarían los filos de unas tijeras. La figura 2.2-2 muestra dos ejemplos.

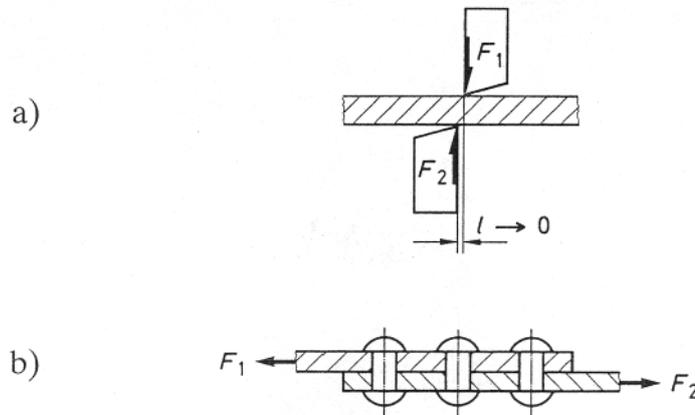


Figura 2.2-2: El origen de las tensiones de cizallamiento.

a) cizalla

b) fijación con remaches

Si las fuerzas son tan grandes que se supera la resistencia del material, las partes colindantes del material se deslizan a través de toda la sección transversal en direcciones opuestas y la pieza queda “cizallada”.

En la figura 2.2-2a las fuerzas están indicadas como medias flechas para simbolizar que la distancia l es muy pequeña y se aproxima a cero. El término cizallamiento se utiliza incluso si la distancia l es más grande (véanse los apartados 8.4.4 hasta 8.4.6). Para indicar las tensiones de cizallamiento se utiliza el símbolo τ .

El ejemplo de la figura 2.2-2b muestra una situación muy similar que se produce en una fijación con remaches.

Las tensiones de cizallamiento actúan en el interior del material y no se pueden observar externamente. Sin embargo, las tensiones de cizallamiento que ocurren por ejemplo a causa de un par de torsión sobre un eje se pueden detectar a través de las distorsiones en la superficie cilíndrica. La figura 2.2-3 muestra un ejemplo.

Una sección cuadrada marcada sobre la superficie del eje sin carga, delimitada por líneas paralelas al eje, se distorsiona en forma de rombo tras la aplicación de un momento de torsión sobre el eje. Las líneas dibujadas sobre su superficie siguen siendo paralelas entre sí pero tienen una forma de hélice muy pronunciada. El proceso se puede representar de la siguiente manera:

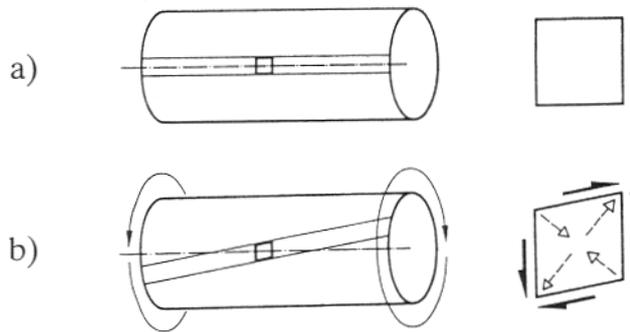


Figura 2.2-3: Distorsión superficial como resultado de una tensión de cizallamiento por torsión.

a) Eje sin carga. Las líneas sobre la superficie cilíndrica son paralelas al eje; el elemento de superficie es cuadrado

b) Eje con a una carga de torsión. Las líneas sobre la superficie forman en un ángulo respecto al eje; el elemento de superficie es ahora un rombo

Se puede considerar que el eje está compuesto por un gran número de discos circulares del grosor de una molécula colocados paralelamente al plano de sección transversal. Los momentos de torsión opuestos intentan girar los discos, uno en contra del otro (como sucede en un embrague) . Sin embargo, ya que los discos se unen elásticamente entre si por sus fuerzas de cohesión, sólo ocurre un diminuto desplazamiento angular entre discos adyacentes.

Las tensiones de cizallamiento que ocurren entre los discos no se pueden medir. La tensión de cizallamiento τ se puede calcular a partir de las dos tensiones normales principales σ_1 y σ_2 :

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} . \quad (2.2-2)$$

Las tensiones de cizallamiento siempre ocurren junto a tensiones normales (véase apartado 8.2-3).

Las tensiones normales principales en un estado de tensión biaxial son dos tensiones separadas por un ángulo de 90° en un mismo plano, por ejemplo, sobre la superficie de un objeto. En el ejemplo de la figura 2.2-3 ocurre una tensión normal positiva máxima en la dirección de la diagonal mayor del rombo sobre la superficie del objeto y una tensión normal negativa en la dirección de la diagonal menor.

Las unidades empleadas para las tensiones de cizallamiento son las mismas que para las tensiones normales.

2.2.3 Tensión residual, tensión térmica

Las causas de estas tensiones son obvias dadas sus denominaciones. Están compuestas por tensiones normales y de cizallamiento. Lo que las diferencia de otras tensiones denominadas según su origen, como las tensiones de flexión o de torsión, es que ocurren sin la implicación de fuerzas externas.

Las tensiones residuales pueden surgir en el material debido a los efectos de fuerzas internas, por ejemplo debido a cambios no uniformes de volumen en los tratamientos térmicos de las piezas para el endurecimiento del acero, por enfriamiento no uniforme de objetos moldeados en plástico o metal, en piezas soldadas o forjadas, debido a un procesamiento mecánico o debido al peso propio en objetos grandes [2-6]. Las tensiones térmicas son un tipo de tensiones residuales. Surgen en sistemas compuestos por piezas con distinta expansión térmica donde se dificulta la libre expansión térmica o a causa de un calentamiento no uniforme. Las tensiones residuales y las tensiones térmicas afectan al material de manera similar a las tensiones de las cargas. Reducen la capacidad de carga por fuerzas externas. Por lo tanto sólo se pueden responder adecuadamente las cuestiones acerca de la seguridad operativa de piezas y partes estructurales si se conocen la magnitud y la naturaleza de sus tensiones residuales. Estas tensiones sólo se pueden determinar si se “liberan” y se mide el grado de relajación elástica exhibido por el material en un estado sin carga. La “liberación” de estas tensiones se puede realizar de varias maneras.

En ciertas investigaciones científicas se corta la pieza en pequeñas partes para medir su relajación elástica [2-7]. De esta manera se obtiene una imagen completa de la distribución de la tensión pero se pierde la pieza. Por eso, estos métodos destructivos no son adecuados para los problemas habituales de análisis de tensiones. En su lugar se necesitan métodos con menor impacto sobre la pieza. Entre ellos está el método del taladro ([3-6 y 3-7] y apartado 8.3) y el método de núcleo anular [3-5]. Las rosetas para la medición de tensiones residuales se describen en la sección 3.2.2.3.

2.2.4 Estados de tensión

Se clasifican en

- a) estado de tensión uniaxial,
- b) estado de tensión biaxial o plano,
- c) estado de tensión triaxial o tridimensional.

El estado de tensión uniaxial es el caso más simple. Ocurre en barras a tracción y compresión, véase la figura 2.2-1.

Se tiene un estado de tensión biaxial cuando las fuerzas que causan las tensiones ocurren en dos ejes perpendiculares entre si. La descomposición de las direcciones efectivas de las fuerzas en dos ejes principales con un ángulo de 90° entre si está basada en planteamientos teóricos. Las direcciones efectivas de las fuerzas que actúan en el mismo plano, pero en distintos ángulos, pueden ser muy diferentes. Sin embargo, siempre se pueden descomponer en las dos direcciones principales.

Si las fuerzas pueden actuar en cualquier dirección se tiene un estado de tensión triaxial o tridimensional. De forma similar al estado biaxial se definen tres ejes principales todos ellos perpendiculares entre si.

Las mediciones de deformación solo se pueden realizar sobre las superficies accesibles de los componentes estructurales y en consecuencia sólo pueden dar información del estado de tensión del componente en su superficie. Mientras que resulta relativamente fácil analizar estados de tensión uniaxiales y biaxiales mediante las técnicas para la medición de la deformación y en particular con bandas extensométricas, los estados de tensión tridimensionales presentan dificultades ya que las mediciones necesarias en la dirección del tercer eje, es decir hacia el interior del objeto, normalmente resultan imposibles. No obstante, un objeto tridimensional sobre el que actúan fuerzas externas, presenta las mayores tensiones en su superficie! (Excepción: efecto de Hertz.) Para un diseñador, al que normalmente sólo le interesan los valores máximos de las tensiones, es suficiente determinar los valores de las tensiones en la superficie del componente. Su distribución en el interior es de menor importancia.

Los estados de tensión tridimensionales solamente se pueden analizar a partir de mediciones de la deformación si ésta se puede medir a lo largo del tercer eje, es decir, en profundidad. Esta posibilidad se da por ejemplo en las técnicas para la medición de modelos donde se pueden embeber las bandas extensométricas dentro de los modelos de plástico. En la ingeniería de la construcción también es posible ya que se puede embeber el instrumento para la medición de la deformación mientras se vierte el cemento.

2.3 Parámetros del material

2.3.1 El módulo de elasticidad, definición y unidad de medida

Un parámetro fundamental para indicar la capacidad de carga mecánica de un material es la resistencia a la tracción. Se determina en el laboratorio con ensayos de probetas de dimensiones estandarizadas [2-8]. La figura 2.3-1 muestra una representación esquemática del método utilizado.

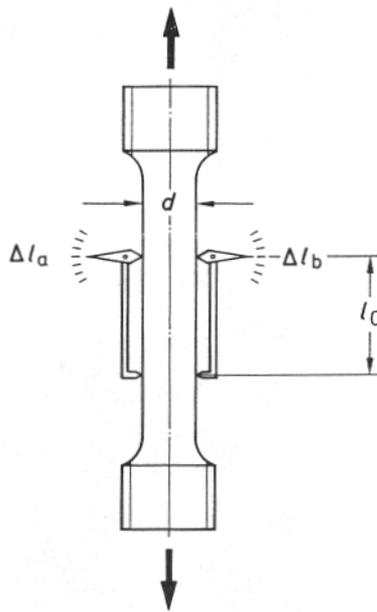


Figura 2.3-1: Esquema para determinar la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad estático de un material

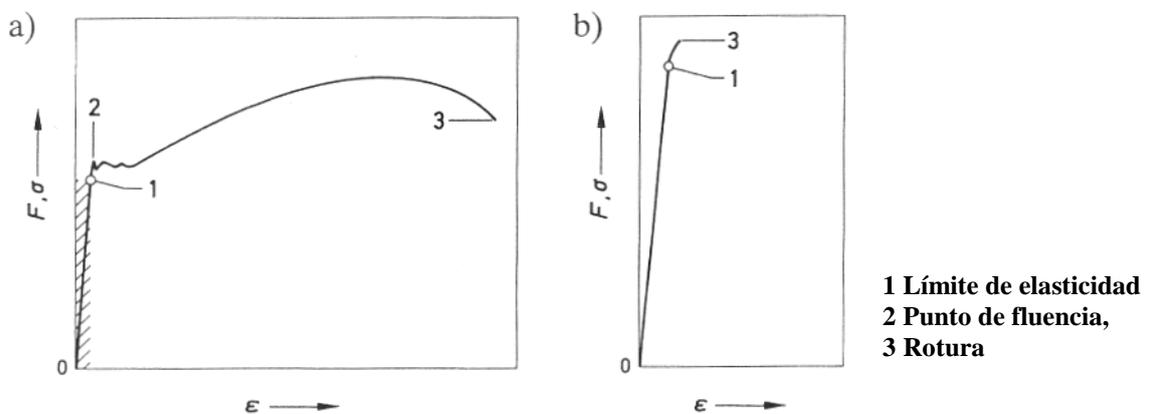


Figura 2.3-2: Ejemplos de curvas fuerza/deformación y tensión/deformación.
a) Curva característica de un material dúctil con una zona de fluencia ancha
b) Curva característica de un material frágil

La probeta del material se sujeta a la maquina de ensayos y se le aplica a una fuerza de tracción. La deformación resultante ϵ se mide en relación a la fuerza aplicada. El resultado se representa en una gráfica. En lugar de la fuerza F , se puede representar la tensión nominal σ que se calcula según la ecuación (2.2-1) a partir del área A_0 de la sección transversal de la probeta al inicio del ensayo.

La figura 2.3-2 muestra ejemplos de curvas $F/\varepsilon - \sigma/\varepsilon$. La forma de la curva σ/ε depende del material. Un material dúctil, es decir deformable plásticamente, muestra una amplia región de fluencia ancha, figura 2.3-2a, mientras que los materiales frágiles y los aceros de alta resistencia prácticamente no manifiestan fluencia, figura 2.3-2b.

En los materiales con elasticidad lineal se observa un incremento lineal de la curva σ/ε en la zona de deformación elástica. La pendiente en esta región del diagrama caracteriza la rigidez del material que se expresa como la relación entre σ y ε , y se denomina módulo de elasticidad o módulo de Young, se representa con el símbolo E .

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (2.3-1)$$

El módulo de elasticidad es el valor de la relación σ/ε y tiene las unidades [Pa] o [N/cm²] o [N/mm²].

$$\begin{aligned} 1 \text{ Pa} &= 1 \text{ N/m}^2 = 10^{-4} \text{ N/cm}^2 = 10^{-6} \text{ N/mm}^2 \\ \text{o } 1 \text{ N/mm}^2 &= 10^2 \text{ N/cm}^2 = 10^6 \text{ N/m}^2 = 10^6 \text{ Pa.} \end{aligned}$$

Esta designación puede suponer un problema para aquellos „no familiarizados“, especialmente si se deben satisfacer los requerimientos de un cálculo dimensional correcto. Estrictamente la designación debería ser:

$$(E) = \left\{ \frac{\sigma}{\varepsilon} \right\} \left[\frac{\text{N/mm}^2}{\text{m/m}} \right] \text{ o } \left[\frac{\text{N/cm}^2}{\text{mm}} \right] \text{ o } \left[\dots \right].$$

Como en las matemáticas se cancela la dimensión de la relación ε [m/m]. De esta manera el módulo de Young E tiene la misma dimensión que la tensión del material σ , aunque se trate de dos conceptos completamente diferentes.

Ejemplo:

$$E = \frac{70 \text{ N/mm}^2}{1000 \text{ } \mu\text{m/m}} = \frac{70 \text{ N/mm}^2}{10^{-3} \text{ m/m}} = 70000 \frac{\text{N/mm}^2}{\text{m/m}} = 70000 \text{ N/mm}^2$$

Todo material tiene un determinado módulo de elasticidad E . Los diferentes valores vienen dados por las distintas pendientes de las curvas σ/ε . En la figura 2.3-3, que sólo muestra las regiones lineales de las curvas, hay varios ejemplos.

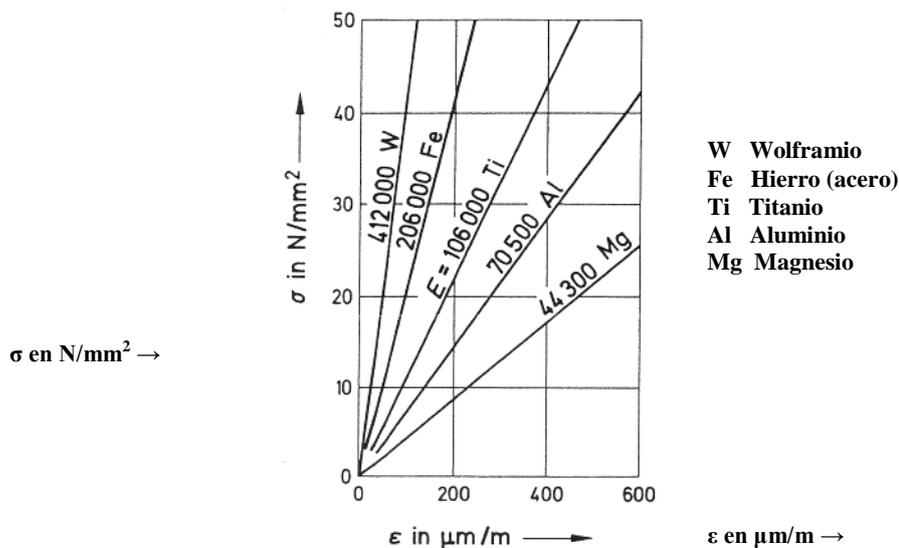


Figura 2.3-3: Ejemplos de módulos de elasticidad

Se pueden encontrar listados de los módulos de elasticidad E en las tablas de libros. Los valores representados en las tablas son siempre valores medios de un gran número de experimentos.

| Material | E [kN/mm ²] (0 ... 100°C) | Material | E [kN/mm ²] (0 ... 100°C) |
|------------------------|--|--|--|
| Aluminio | 66 | Molibdeno | 330 |
| AlCuMg | 77 | Metal Monel | 156 |
| AlMgSi | 69 | Níquel | 193 |
| AlMg 5 | 68 | Bronce para armas de fuego Rg5 | 93 |
| AlCuNi | 70 | Acero C15 | 204 |
| G-AISI | 75 | C35 | 202 |
| G-AISiMg | 75 | C60 | 200 |
| Bronce (= Bz) | 109 | 41Cr4 | 203 |
| G-Sn Bz 12 | 79 | X10 Cr13 | 216 |
| AlBz 5 | 123 | X12 CrNi 188 | 191 |
| AlBz 8 | 122 | 36% Ni-Acero | 142 |
| FeAlBz 10 | 123 | Titanio | 103 |
| Cobre | 123 | TiAl6V4 | 108 |
| CuBe (Cobre-Berilio) | 131 | | |
| CuNi55/45 (Constantán) | 161 | Adhesivos de bandas extensométricas | E [kN/mm²] (0 ... 50°C) |
| Magnesio | 44 | X60 Resina acrílica, cargada | 4,5 ... 6 |
| MgAl 7 | 43 | Z70 Cianocrilato | 3 |
| Latón (= Ms) | | H (Poliéster) | 3,5 |
| Ms 58 | 88 | EP250, EP310 (Resina epoxi) | 2,8 |
| Ms 60 | 88 | Cr 760 (Masilla cerámica) | 20 ... 21 |
| Ms 72 | 88 | | |

Tabla 2.3-1: Módulo de elasticidad de algunos materiales

Debido a las posibles modificaciones en las aleaciones etc. hay que esperar un pequeño porcentaje de desviación respecto a los valores de la tabla. Si se requiere una precisión mayor se debe realizar un experimento según el método descrito.

También se debe considerar que el módulo de elasticidad depende de la temperatura.

La tabla 2.3-1 muestra los módulos de elasticidad de algunos materiales comunes.

2.3.2 El módulo de elasticidad transversal (o módulo cortante)

El módulo de elasticidad transversal G facilita el cálculo de la tensión de cizallamiento. No se trata de un parámetro del material independiente como el módulo de elasticidad E (apartado 2.3.1) o el coeficiente de Poisson ν (apartado 2.3.3), sino que se calcula a partir de éstos.

$$G = \frac{E}{2} \cdot \frac{1}{1+\nu} = \frac{E}{2(1+\nu)} \approx 0,385 E \text{ für } \nu = 0,3. \quad (2.3-2)$$

(... $\approx 0,385 E$ para $\nu = 0,3$.)

Como el módulo E , el módulo cortante se expresa en N/mm^2 (apartado 2.3.1). Describe la relación entre la tensión de cizallamiento τ y el ángulo de la deformación de cizallamiento γ medido en radianes:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}. \quad (2.3-3)$$

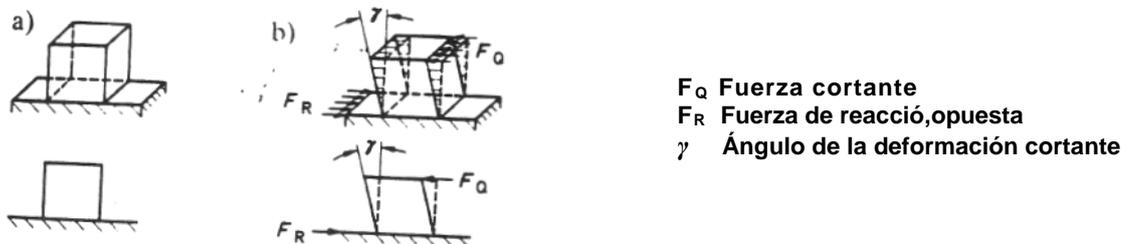


Figura 2.3-4: El ángulo de la deformación de cizallamiento γ en un material sometido una tensión cortante.

- a) sin carga
- b) con carga

2.3.3 El coeficiente de Poisson

Si se estira de una goma elástica, esta se alargará pero a la vez se hará más fina y estrecha; si se comprime un cilindro de caucho se vuelve más corto y a la vez más ancho.

El científico francés *Simeon Denis Poisson* (1781 -1840) descubrió el efecto siguiente durante sus investigaciones:

Si se aplica una fuerza de tracción F_Z sobre una barra, esta se alargará $\Delta l/l_0 = \varepsilon_l$ (deformación longitudinal); al mismo tiempo su grosor y anchura disminuyen $\Delta b/b_0 = \varepsilon_q$ (contracción transversal), ε_l es positivo, ε_q es negativo, figura 2.3-5a.

Si se aplica una fuerza de compresión F_d sobre una barra, ésta se acortará $\Delta l/l_0 = \varepsilon_l$ („deformación longitudinal negativa“); al mismo tiempo su grosor y anchura aumentan $\Delta b/b_0 = \varepsilon_q$ (expansión transversal). ε_l es negativo, ε_q es positivo, Figura 2.3-5b.

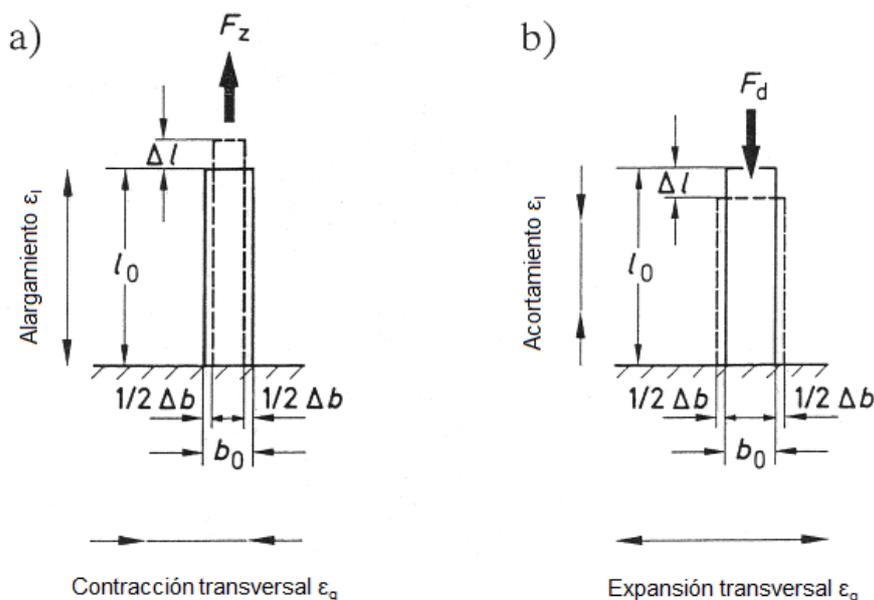


Figura 2.3-5: Contracción transversal y expansión transversal

Se define la relación siguiente:

$$\left| \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_q} \right| = \mathbf{m \text{ (módulo de Poisson)}} \quad (2.3-4)$$

En la teoría de la estabilidad mecánica a menudo se asigna la letra griega μ (mu) como símbolo del coeficiente de Poisson. Sin embargo, debido a que la letra μ se emplea frecuentemente en ingeniería con otros significados, ha aumentado el uso de la letra ν (nu). Actualmente se pueden encontrar ambos símbolos en las publicaciones. En este libro se utilizará la letra ν .

$$\frac{1}{m} = \left| \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l} \right| = \mathbf{\nu \text{ (coeficiente de Poisson)}} \quad (2.3-5)$$

El coeficiente de Poisson depende del material y es válido en la región de deformación elástica del material. Su valor es aproximadamente 0,3 para metales, aunque puede variar considerablemente como muestra la tabla 2.3-2. En plásticos el coeficiente de Poisson ν es aproximadamente 0,4; en el caso de materiales incompresibles, p.ej. el caucho o el agua, así como en la región de deformación plástica de los metales su valor es $\nu = 0,5$.

| Material | ν | Material | ν |
|------------------------|-------|--|-------|
| Aleaciones de aluminio | 0,33 | Plata, recocida | 0,37 |
| Niobio | 0,38 | endurecida | 0,39 |
| Vidrio | 0,22 | Acero | 0,28 |
| Caucho | 0,5 | Acero de construcción, laminado en caliente | 0,26 |
| Fundición gris | 0,25 | 17-7PH | 0,28 |
| Inconel | 0,29 | PH15-7 Mo | 0,28 |
| Cobre | 0,33 | Invar, 36% Ni | 0,29 |
| Magnesio | 0,35 | XCrNi 18,9 (SS304) | 0,305 |
| Latón | 0,33 | XCrNiMo 18.12 (SS 316) | 0,33 |
| Molibdeno | 0,32 | Titanio | 0,34 |
| Monel | 0,32 | Vanadio | 0,36 |
| Níquel | 0,31 | Wolframio | 0,284 |
| Platino | 0,39 | Zircaloy 2 | 0,39 |
| Renio | 0,49 | | |

Tabla 2.3-2: Coeficiente de Poisson ν de algunos materiales

Nota:

La tabla 2.3-2 contiene los valores del coeficiente de Poisson ν de distintas fuentes. Teniendo en cuenta la gran dispersión en valores se recomienda determinar el coeficiente de Poisson en un experimento si se requiere una mayor precisión, p.ej. midiendo la deformación longitudinal y la contracción transversal con bandas extensométricas en condiciones idénticas. Los resultados obtenidos se deben corregir con los métodos descritos en el apartado 7.5 para suprimir los errores producidos por la sensibilidad transversal de la banda extensométrica.

Importante:

Incluso en las tablas de los libros, el coeficiente de Poisson ν siempre se indica como valor numérico; es decir sin su signo. Esta regla, con orígenes históricos, también es válida para la tabla 2.3-2 y debe tenerse en cuenta al escribir fórmulas.

2.3.4 La expansión térmica

Todo objeto variará sus dimensiones ante una variación de su temperatura.

Un calentamiento produce una expansión.

Un enfriamiento produce una contracción.

Las elongaciones debidas a las variaciones de temperatura no producen tensiones mecánicas en el material si:

- a) no se impide la expansión o contracción del objeto, p.ej. con sujeciones o fijaciones
- b) el objeto tiene una temperatura uniforme en toda su superficie

| Material | α [°C] | | | | | | | |
|---|-------------------------------|------|------|-------------------------------|------|------|-------------------------------|------|
| | -196 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 800 |
| Metales | | | | | | | | |
| Aluminio (99,5 %) | -22,8 | 23,8 | 24,5 | 25,5 | 26,5 | 27,4 | 28,3 | |
| AlZnMgCu 1,5 | -17,8 | 23,4 | 24,4 | 22,5 | | | | |
| Duraluminio (95 Al; 0,04 Cu resto Mg, Mn, Si, Fe) | | 23,5 | 24,5 | 28,0 | 26,7 | 27,3 | | |
| Plomo | -28,8 | 29,0 | 29,8 | 31,1 | | | | |
| Bronce (85 Cu, 95Mn, 8 Sn) | -14,9 | 17,5 | 17,9 | 18,3 | 18,8 | 19,2 | | |
| Fundición | -8,4 | 10,4 | 11,1 | 11,8 | 12,3 | 12,9 | 13,5 | 14,7 |
| Constantán (80 Cu; 40 Ni) | -11,9 | 15,2 | 15,8 | 16 | 16,4 | 16,7 | | |
| Cobre | -13,9 | 16,5 | 16,9 | 17,2 | 17,7 | 18,1 | 18,5 | |
| Magnesio | -21,1 | 26 | 27,1 | 27,9 | 28,8 | 29,8 | | |
| Latón (62 Cu; 38 Zn) | -16,4 | 18,4 | 19,3 | 20,1 | 21 | | | |
| Molibdeno | -4,2 | 5,2 | 5,4 | 5,5 | 5,6 | | | |
| Níquel | -10 | 13 | 13,6 | 14,3 | 14,9 | 15,2 | 15,5 | 16,1 |
| Acero | | | | | | | | |
| Acero dulce | -8,8 | 12 | 12,8 | 13,1 | 13,6 | 14,1 | 14,7 | |
| Acero Invar (64 Fe; 36 Ni) | | 1,5 | 3,8 | 5,3 | 7,8 | 9,4 | 10,8 | 13,1 |
| 1.4301 (X5CrNi 18,9) | | 16,1 | 17,1 | | | | | |
| Titanio (TiAl6 V4) | | 8,4 | 8,8 | 8,9 | 9 | 9,2 | | |
| Wolframio | -3,8 | 4,5 | 4,5 | 4,7 | 4,7 | 4,5 | 4,5 | 4,5 |
| Vidrio | | | | | | | | |
| Jenaer 16 III | -5,9 | 8,1 | 8,4 | 8,7 | 9 | 9,3 | | |
| Jenaer 1565 III | | 3,5 | 3,6 | 3,7 | 3,9 | 4,1 | | |
| Vidrio de sílice (Cuarzo) | 0,16 | 0,5 | 0,6 | 0,83 | 0,82 | 0,8 | 0,58 | |
| Zerodur 25 | -0,18 | 0,02 | 0,02 | | | | | |
| Plásticos | $\alpha = 50^{\circ}\text{C}$ | | | $\alpha = 50^{\circ}\text{C}$ | | | $\alpha = 50^{\circ}\text{C}$ | |
| Acetilcelulosa | 80 - 90 | | | Poliamida | | | 90 - 100 | |
| Resina acrílica | 70 - 80 | | | Poliéster (PET) | | | 100 - 150 | |
| Resina epoxi | 80 | | | Poliestireno (PS) | | | 60 - 80 | |
| Resina fenólica | 50 - 80 | | | PS resistente a impactos | | | 80 - 100 | |
| Poliacetal | 90 | | | Poliuretano | | | 190 | |
| Polietileno (PE) de alta densidad | 160 - 180 | | | Cloruro de polivinilo (PVC) | | | 70 | |
| Polietileno de baja densidad | 230 | | | PVC resistente a impactos | | | 80 - 100 | |

Tabla 2.3-3: Valores medios del coeficiente de expansión térmica α para varios materiales y

distintos rangos de temperatura entre 20 y ϑ °C en $\frac{m}{m} \cdot \frac{1}{K}$.

Si se impide la expansión térmica, surgen tensiones térmicas en el material (véanse los apartados 2.2.3 y 8.4.7).

Hay definiciones para la expansión longitudinal, para la expansión superficial y la expansión en volumen. La expansión térmica longitudinal es de interés en la medición de deformaciones. El coeficiente de expansión longitudinal α , conocido también como coeficiente de expansión térmica lineal, denota la variación relativa de la longitud en 10^{-6} m/m por K:

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \cdot \frac{1}{\Delta\vartheta} = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta\vartheta} \text{ in } \left[\frac{\text{m/m}}{\text{K}} \right] = \left[\frac{1}{\text{K}} \right] \quad (2.3-6) \text{ (in = en)}$$

$l_1 = l_0 =$ Longitud inicial antes del cambio de temperatura, es decir, longitud de referencia

$l_2 =$ Longitud final tras el cambio de temperatura

$\Delta l =$ Variación de la longitud a causa del cambio de temperatura

$\Delta\vartheta =$ Variación de la temperatura (positiva si se trata de un calentamiento, negativa si se trata de un enfriamiento)

En este caso la relación m/m también se cancela, de manera que la unidad es solamente 1/K.

Nota:

El coeficiente de expansión longitudinal α depende tanto del material como de la temperatura. Por eso en las tablas se encuentran valores diferentes para distintos rangos de temperatura. Estas diferencias no deben interpretarse como saltos discretos en las características de expansión del material.

2.4 Tipos de carga sobre la banda extensométrica

La manera en que actúa la carga sobre la banda extensométrica durante la medición afecta a las características de la misma. Por eso se indican ciertos valores límite para algunas de sus características, p.ej. distintos límites de temperatura o distintos límites de alargamiento entre otros. A continuación se presentará como deben interpretarse los términos „medición estática“, „medición cuasi-estática“ y „medición dinámica“ comúnmente utilizados en la literatura y/o en las especificaciones técnicas de las bandas extensométricas.

2.4.1 Mediciones estáticas (con referencia al cero)

„El término ‘medición estática’ para las técnicas de medición con bandas extensométricas incluye todas aquellas mediciones de deformación o componentes de deformación que son constantes en el tiempo. También se utiliza, por ejemplo, para describir un proceso constante en el tiempo sobre el que se superpone otro proceso variable en el tiempo .“

(Cita de [2-1]). Para la banda extensométrica esto significa que los errores en la señal medida debidos a perturbaciones dentro de la banda durante un período de tiempo no superan un cierto nivel. La señal de medición se puede referenciar al cero existente al principio de la medición.

2.4.2 Mediciones cuasi-estáticas

Se denominan „mediciones cuasi-estáticas“ a aquellos procesos que varían muy lentamente, cuya velocidad de variación en el tiempo es tan pequeña que el instrumento de visualización se puede leer evaluado con suficiente precisión sin tener que recurrir a métodos especiales.

2.4.3 Mediciones dinámicas (sin referencia a un cero)

„Todas aquellas mediciones de procesos de variación de deformación donde únicamente se determina la componente dinámica, por ejemplo la amplitud de una oscilación, se denominan mediciones dinámicas“ (cita de [2-1].)

Esta definición requiere un análisis detallado. Si en las especificaciones técnicas de una banda extensométrica encontramos datos distintos para „mediciones dinámicas“ que para „mediciones estáticas“, éstos se referirán a procesos que varían rápidamente para los cuales los efectos dependientes del tiempo en la banda no provocan efecto. En el caso de que se asigne un valor estático medio a un proceso oscilante son válidos los límites para mediciones estáticas con referencial al cero si también hay que determinar el valor estático o promedio. Sería más conveniente hablar de mediciones “sin referencia a un cero” que hablar de “mediciones dinámicas”.

3 La banda extensométrica, criterios de selección

Los criterios que se deben considerar para de seleccionar un determinado tipo de banda del catálogo del fabricante son tan múltiples y variados como las tareas y condiciones a las que se enfrentan las bandas durante su aplicación. No hay ningún tipo de banda que cumpla de manera óptima todos los requisitos. Por este motivo existen numerosos tipos de bandas extensométricas que se pueden complementar con fabricaciones especiales si es necesario. Es cuestión de la política comercial del fabricante si su catálogo de productos se mantiene dentro de ciertos márgenes razonables o alcanza un volumen exagerado. La mayoría de los problemas se pueden solucionar con una gama de productos cuidadosamente estudiada de magnitud abarcable, sin tener que recurrir a fabricaciones especiales. Al mismo tiempo se facilita la selección al usuario, aspecto especialmente importante si su experiencia es reducida o nula. Se ha demostrado que la mitad de las tareas de medición se pueden resolver con una colección de unas dos docenas de bandas extensométricas distintas.

Los planteamientos siguientes deberían posibilitar la selección del tipo de banda adecuado utilizando unos criterios lógicos. De todas formas es inevitable que en ocasiones surjan situaciones contradictorias que fuerzan a tomar un compromiso, aunque éste es un fenómeno común en la ingeniería que no sólo ocurre en el caso de las bandas extensométricas.

El autor sabe por su propia experiencia que en muchas ocasiones el usuario sólo tiene una idea muy aproximada de lo que sucede en el punto de medición. Un análisis más profundo antes de medición puede ayudar a prevenir errores caros y llevar a mejores resultados. El sistema de selección presentado aquí requiere que el usuario analice su problema particular de medición. Para utilizar este sistema se deben cumplir dos requisitos:

Primer requisito: La tarea de medición debe tener un objetivo claro y se deben conocer los detalles del proceso así como las condiciones de contorno.

Segundo requisito: Se deben conocer las características de la banda extensométrica.

La tabla 3.0-1 debería servir como ayuda al tomar la decisión para cumplir el primer requisito. Los factores más importantes que afectan a la selección del tipo de banda extensométrica están enumerados y encabezan cinco grupos. Esta tabla puede servir como una „ lista de control“, para que el usuario no olvide ninguna consideración importante. Cuanto más exhaustivo sea el análisis de las condiciones que afectan a la medición, mejor se podrá evaluar el coste y esfuerzo necesarios, y más altas serán las probabilidades de éxito.

| |
|---|
| <p>1. Objetivo de la medición</p> <p>Primario: medir la deformación</p> <p>Secundario: análisis experimental de tensiones, fabricación de transductores - control de procesos - dispositivos de seguridad</p> |
| <p>2. Condiciones mecánicas en el punto de medición</p> <p>2.1 Estado tensional Uniaxial - biaxial - direcciones principales conocidas o desconocidas</p> <p>2.2 Topografía del campo de tensiones Homogéneo - heterogéneo - variación brusca (tensiones en entallas) Determinación del valor medio o máximo</p> <p>2.3 Tipo de sollicitación Estática: magnitud - dirección (positiva/negativa) - número de aplicaciones Dinámica: impacto – estocástica (aleatoria) - cíclica - alterna - pulsante (positiva/negativa) – amplitud - número de ciclos - valores referidos al cero o no</p> <p>2.4 Relación señal/ruido o magnitud útil/ magnitud perturbadora Por ejemplo, fuerza normal como magnitud útil con superposición de un momento flector como magnitud de perturbación</p> |
| <p>3. Condiciones ambientales</p> <p>3.1 Duración de la medición Sólo una vez - corta – repeticiones cortas -larga - periodo de funcionamiento requerido - duración prevista del adhesivo</p> <p>3.2 Temperatura Magnitud - rango (antes, durante y entre mediciones) - velocidad de variación - radiación unilateral - coeficiente de dilatación térmica del material del componente</p> <p>3.3 Elementos perturbadores Intensidad - duración efectiva</p> <p>3.3.1 Humedad del aire - agua - agua a presión - vapor - hielo</p> <p>3.3.2 Aceite (para transformadores, parafina, para máquinas, hidráulico)</p> <p>3.3.3 Productos químicos (sólidos, líquidos, gaseosos, reactivos, inertes)</p> <p>3.3.4 Presión - vacío</p> <p>3.3.5 Campos eléctricos - campos magnéticos - flujos energéticos (por ejemplo: corrientes de soldeo, descargas electrostáticas)</p> <p>3.3.6 Radiación de alta energía</p> <p>3.3.7 Fuerzas externas (choque, impacto, presión del terreno)</p> |
| <p>4 Condiciones eléctricas en el punto de medición</p> <p>4.1 Circuito de medición Cuarto de puente - circuito de tres hilos - medio puente - cuarto de puente doble - puente completo</p> <p>4.2 Alimentación de la banda extensométrica Corriente continua - corriente alterna (frecuencia portadora) - potencial respecto a masa (tierra) - alimentación continua / a impulsos (tiempo - velocidad de pulsación)</p> <p>4.3 Cable Longitud - resistencia - aislamiento</p> |
| <p>5. Condiciones de aplicación</p> <p>5.1 Material del componente Maquinabilidad - adhesividad y eventualmente soldabilidad</p> <p>5.2 Acceso para aplicación Accesibilidad – uso de decapado u otros tratamientos superficiales - resistencia a disolventes y temperatura</p> <p>5.3 Ruta de los cables</p> <p>5.4 Condiciones espaciales Banda extensométrica –cable – producto de cobertura – tapas de protección</p> |

Tabla 3.0-1: Tabla para el análisis de los requisitos que se deben cumplir en un punto de medición con bandas extensométricas

Nunca se pueden eliminar completamente los resultados imprevistos pero se pueden minimizar.

Un conocimiento previo de las características de las diferentes bandas extensométricas es necesario para cumplir el segundo requisito y escoger la banda óptima.

La determinación de los parámetros característicos de las bandas no se realiza siempre según los mismos métodos, de manera que los resultados se pueden interpretar de diferentes maneras. El propósito de la directriz 2635, que fue elaborada y publicada por la VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Regelungstechnik [2-1], fue paliar esta situación y fomentar un método universal de medición. Se está trabajando para lograr una adaptación internacional. En [3-1] están descritos los objetivos y el contenido de la directriz. Las especificaciones se adjuntan en cada paquete de bandas extensométricas; los datos de serie están en los catálogos. En el apartado 3.3 (datos técnicos) se dan más detalles, así como valores empíricos.

Dado que los efectos de interferencia no ocurren todos simultáneamente, tampoco es necesario evaluar todas las características, sino únicamente aquellas relacionadas con las condiciones de la aplicación, que se pueden determinar previamente con ayuda de la tabla 3.0-1. Lo mismo es válido para los métodos de fijación o de protección contra efectos externos adversos mecánicos o químicos. En este caso no sólo se debe examinar su idoneidad, sino también su aplicabilidad.

3.1 Ámbitos de aplicación

En principio todas las bandas extensométricas se pueden utilizar tanto para el análisis experimental de tensiones como para la construcción de transductores. Sin embargo hay ciertas diferencias entre los distintos tipos de bandas extensométricas que hacen que sean más o menos apropiadas para ciertas aplicaciones.

3.1.1 Análisis de tensiones, técnicas de medición de modelos, biomecánica

Las bandas extensométricas robustas y flexibles, que pueden ser empleadas en condiciones adversas, tienen ventajas obvias para el análisis experimental de tensiones, incluyendo las técnicas de medición de modelos y la biomecánica. Las bandas que utilizan la poliamida sintética como soporte de la rejilla de medición y con la identificación de serie „Y“ forman parte de este grupo. Esta serie contiene un gran número de distintos tipos de bandas extensométricas adecuadas para resolver todo tipo de tareas de análisis de tensiones.

También existen numerosos tipos especiales, p. e. las rosetas de taladro o las rosetas de núcleo anular para la determinación de tensiones residuales en componentes estructurales; cadenas de bandas para investigar la distribución de las tensiones en estructuras complejas; bandas con soportes metálicos que se sueldan por puntos a la zona de medición, y muchos más. Los catálogos de bandas contienen más información.

3.1.2 Construcción de transductores

Para el diseño de transductores no es necesaria esta amplia variedad de tipos. En su lugar, se exige una mayor precisión de medición. Las bandas que cumplen los requisitos máximos de precisión para células de carga calibradas, son idénticas a las bandas extensométricas de la serie „G“. El soporte de la rejilla de medición es de resina fenólica reforzada con fibra de vidrio.

Es posible la fabricación de bandas especiales si la demanda es suficiente. Para ello es necesario llegar a un acuerdo con el fabricante.

La serie „K“ se diseñó especialmente para la construcción de transductores. Una publicación especializada proporciona más detalles acerca de sus características y ámbitos de aplicación.

HBM también suministra bandas especiales de diseño optimizado para tareas concretas si hay una demanda suficiente. La empresa posee las más modernas instalaciones para la producción de negativos [3-51] que permiten explotar plenamente las posibilidades de diseño que ofrecen las técnicas de fotograbado para la fabricación de bandas en lámina. Sin embargo, esto no pretende inducir al usuario a encargar la fabricación de bandas específicas ya que entraría en contradicción con el hecho previamente mencionado de que en la mayoría de casos una pequeña variedad de tipos de banda es suficiente. Las bandas extensométricas especiales sólo se deben emplear cuando es necesario cumplir con ciertas características o requisitos. En estos casos se aconseja realizar una solicitud explicando exactamente cual es su aplicación. En ocasiones es posible encontrar una forma adecuada dentro de la colección de negativos especiales existente.

3.2 Tipos de bandas extensométricas

Hay una amplia oferta de bandas extensométricas de distintos tamaños y formas. Aparte de las distintas longitudes de la rejilla de medición hay diversos diseños con diferente posicionamiento de las conexiones. Se distingue entre bandas lineales de disposición simple y doble (paralela), rosetas X con los ejes de medición cruzados a 90°, rosetas R con tres ejes de medición colocados en ciertos ángulos el uno del otro, cadenas de bandas extensométricas y muchos otros diseños especiales.

La gran variedad de formas y tamaños es el resultado de la adaptación a distintos problemas y aplicaciones. Los apartados siguientes tratan los distintos criterios para la selección de una banda extensométrica adecuada.

3.2.1 La longitud de la rejilla de medición

La figura 3.2-1 es una representación esquemática de una selección de bandas extensométricas de distintos tamaños y en algunos casos con diferente posicionamiento de las conexiones.

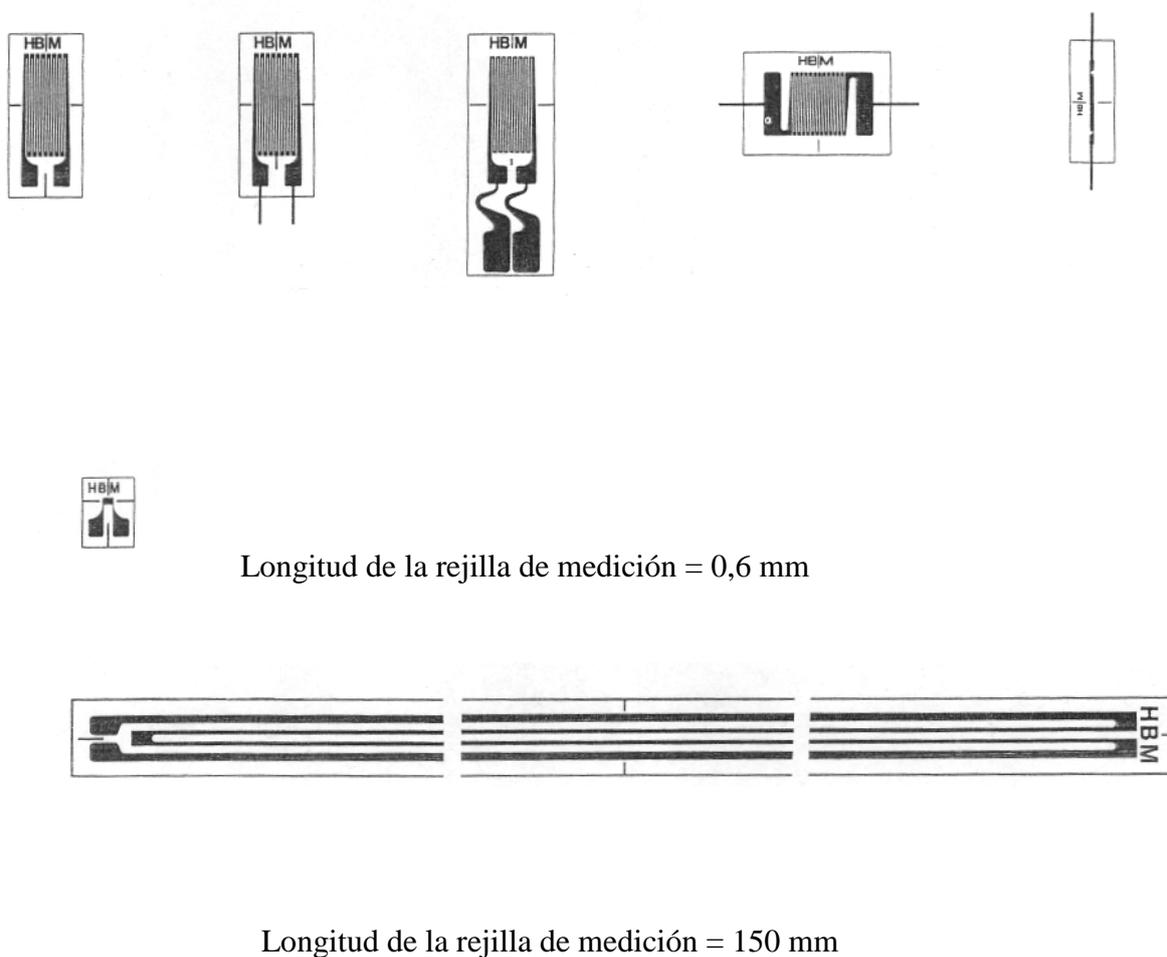


Figura 3.2-1: Algunos diseños típicos de rejillas de medición para “bandas lineales”

3.2.1.1 Campo de deformación homogéneo

El primer criterio es el espacio disponible sobre el objeto a medir. Si el tamaño lo permite las bandas con una rejilla de entre 3 y 6 mm resultan óptimas, tanto por su calidad como por la facilidad de su aplicación.

La disposición de las conexiones en el lateral de la rejilla y el diseño extremadamente estrecho de la misma consideran restricciones de espacio en el punto de medición.

La idea frecuentemente encontrada de que la sensibilidad de la banda depende de su longitud es incorrecta. La sensibilidad de una banda metálica es proporcional a la variación relativa de su longitud (deformación), no a la variación absoluta. En este sentido la longitud absoluta de la banda extensométrica no tiene ningún efecto sobre su sensibilidad. De todas formas, las bandas extremadamente pequeñas solamente se deberían utilizar cuando es técnicamente necesario, por ejemplo, al analizar tensiones en entallas. Por lo tanto sería mejor considerar recortar el soporte de una banda más grande para adaptarla al espacio disponible.

Naturalmente se plantea la pregunta si se puede recortar una parte de la banda. La respuesta es "sí", pero se debe saber dónde y conocer las posibles consecuencias.

Para ello es necesaria una pequeña digresión a la mecánica de la transferencia de la deformación a la rejilla de medición de la banda (figura 3.2-2).

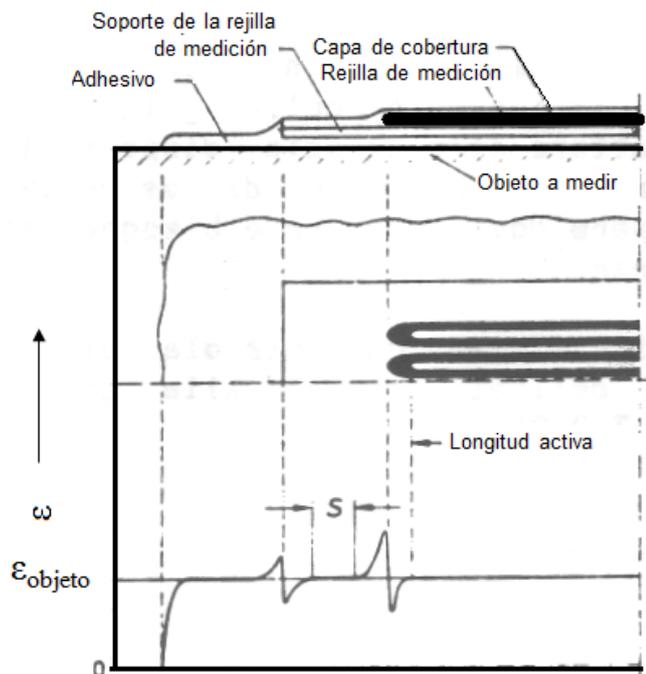


Figura 3.2-2: Ilustración esquemática de la transferencia de la deformación a la rejilla de medición de la banda extensométrica

Asumimos que la deformación del objeto a medir es uniforme y de magnitud ϵ_{objeto} . Esta deformación tiene que transmitirse a través del adhesivo y el soporte hasta la rejilla de medición. Para ello son necesarias ciertas fuerzas que son insignificantes comparadas con las fuerzas que actúan sobre el objeto si éste no es demasiado fino.

Existen secciones de transición para la transferencia de la deformación del objeto a medir a través de las distintas capas limítrofes hasta llegar a la rejilla de medición de la banda. Dichas secciones surgen en cada límite entre dos capas, es decir:

- entre el objeto y la capa adhesivo,
- entre la capa de adhesivo y el soporte de la rejilla,
- entre el soporte y la rejilla de medición.

La longitud de las secciones de transición depende del grosor de cada capa y de su rigidez, es decir, del módulo E de elasticidad de los distintos materiales. El diagrama muestra como tras cada sección de transición hay un tramo en el que la deformación del objeto de prueba es igual a la deformación parcial de los distintos componentes de la banda. En cada sección de transición de un componente de la banda al siguiente se produce un aumento de la deformación que se compensa por la caída en el componente siguiente.

Al soporte de la rejilla se le puede recortar si es necesario un trozo de tamaño „S“ como está indicado en el diagrama sin que esto afecte a las características de la banda extensométrica. Si se recorta un trozo mayor, la sección de transición comienza a extenderse hacia la zona activa de la rejilla de medición. Esto provoca una reducción aparente de la sensibilidad a la deformación expresada mediante el factor de banda k (véase apartado 3.3.1). Este efecto es muy pequeño para una banda con una rejilla larga, mientras que para una banda de rejilla muy corta puede significar un pequeño porcentaje de pérdida de sensibilidad. Si se recortan demasiado las secciones de transición del soporte de la rejilla de medición, también se puede producir un efecto negativo sobre la fluencia de la banda (véase apartado 3.3.9).

Para los materiales sintéticos, incluyendo los adhesivos y soportes de rejilla, el módulo E de elasticidad depende de la temperatura. Esto significa que para temperaturas elevadas las secciones de transición se hacen más largas y viceversa, un hecho a considerar en los casos en que aplique. La lámina de soporte debe sobrepasar la rejilla de medición como mínimo 1 o 2 mm. Un recorte lateral del soporte de la banda, es decir paralelo a la dirección de medición tiene muy poca influencia sobre su sensibilidad transversal (véase apartado 3.3.3). Teniendo en cuenta que la sensibilidad transversal es muy pequeña en las bandas modernas, este efecto se puede ignorar y por consiguiente se puede recortar el soporte hasta llegar casi al borde de la rejilla de medición.

3.2.1.2 Campo de deformación heterogéneo

La banda extensométrica mide la media aritmética de las condiciones de deformación existentes bajo su rejilla de medición. Este hecho se tiene en cuenta a la hora de escoger la longitud más adecuada de la rejilla.

Si se busca el valor medio se usa una rejilla de medición larga . Un ejemplo característico son las mediciones sobre hormigón (o también madera, plásticos reforzados con fibra de vidrio, etc.). Una banda corta mediría tensiones parciales que estarían por encima de la media en la región del mortero y por debajo de la media en la región del árido [3.2], véase figura 3.2-3.

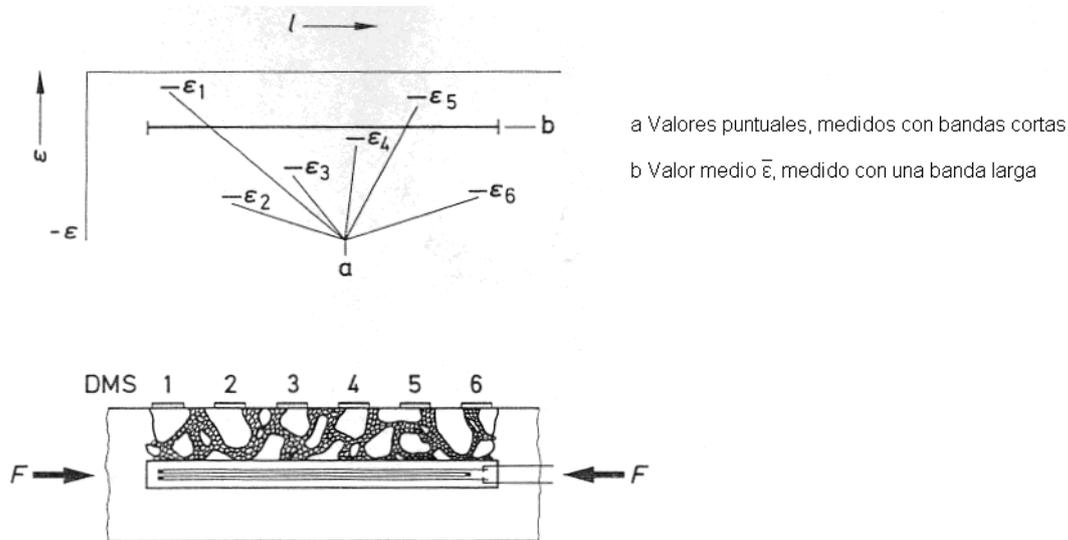


Figura 3.2-3: Ejemplo de aplicación de una banda con una rejilla de medición larga que mide un valor medio de la deformación sobre un material heterogéneo, por ejemplo hormigón

La relación entre los valores máximos y mínimos de deformación en el caso del hormigón oscila entre 1: 3 hasta 1: 15, según el tipo de árido empleado. La rejilla de medición debe ser al menos 4 o preferiblemente 5 veces más larga que la partícula de árido más grande para obtener un valor medio fiable. El diagrama de la figura 3.2-4 muestra el error de medición esperado en función de la relación longitud de rejilla/tamaño de partícula.

Lo contrario ocurre si se busca el valor máximo de la deformación o un valor de deformación local en un campo de tensiones heterogéneo, por ejemplo el valor máximo de la tensión en una entalla. En tal caso es conveniente utilizar una banda corta, ya que una banda larga aportaría un valor medio indeseado.

El diagrama de la figura 3.2-5 muestra esquemáticamente la dependencia entre el valor medido y la longitud de la rejilla de medición. La curva indica la variación real de la deformación a lo largo de la probeta con entallas. Los valores de ordenada $\epsilon_1 \dots \epsilon_4$ muestran las medidas que se obtienen si se utilizan rejillas de medición para la banda aplicada de longitudes $l_1 \dots l_4$ respectivamente. El valor de pico solo se obtiene correctamente con la banda corta de longitud l_4 .

Basándose en esto se podría suponer que lo ideal sería una longitud de rejilla „cero“ pero, obviamente, hay que establecer ciertos límites. Técnicamente es posible fabricar bandas con una longitud de rejilla de 0,2 mm pero a medida que se acorta la rejilla aumentan los problemas para transmitir la deformación a la rejilla de la banda.

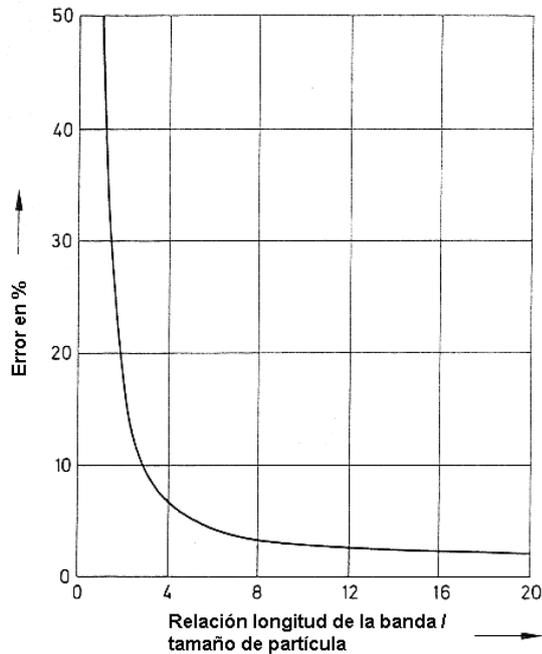


Figura 3.2-4: Error de medición para materiales heterogéneos (p.ej. hormigón) función de la relación longitud de banda/tamaño de partícula (según [3-3])

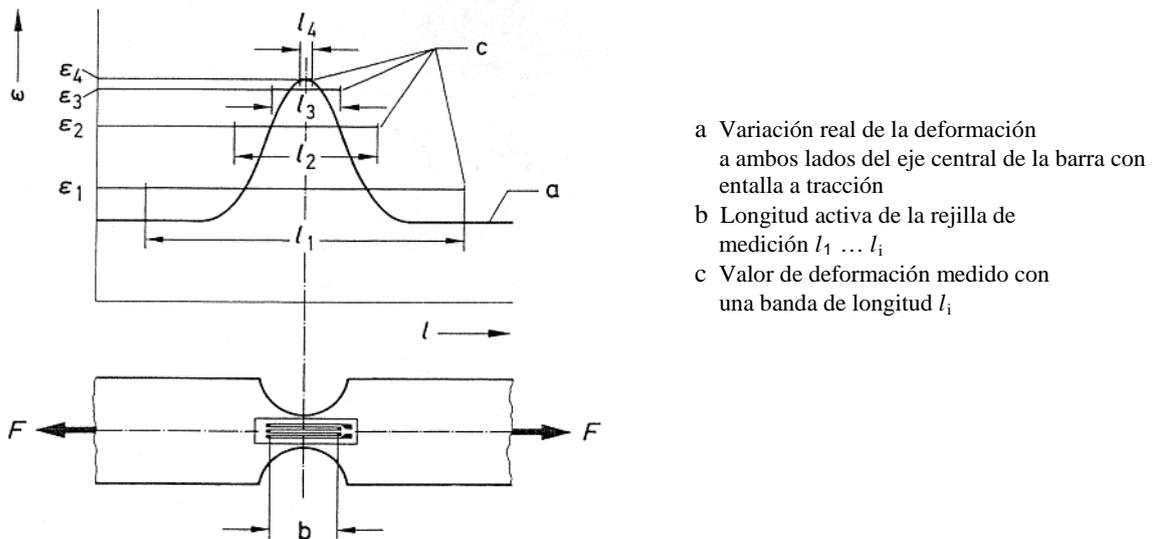


Figura 3.2-5: Influencia de la longitud de rejilla l sobre el valor medido debido al promediado durante la medición de picos de tensión (esquemático)

Estos problemas surgen principalmente al fijar la banda sobre el objeto a medir. En presencia de entallas es especialmente difícil y se generan importantes errores de medición. También hay que tener en cuenta que con una rejilla de medición de área pequeña la disipación térmica a través del objeto a medir es muy baja, lo que significa que la corriente de alimentación que genera calor debido al efecto Joule, debe mantenerse al mínimo. Éste es un factor a tener en cuenta a la hora de seleccionar y ajustar la fuente de alimentación. Por eso se debe evitar escoger una banda extensométrica demasiado corta. Como aproximación:
Longitud de rejilla $\leq \frac{1}{2}$ radio de la entalla.

3.2.1.3 Estados dinámicos de defopración

Las bandas extensométricas también son muy apropiadas para la medición de estados de deformación dinámicos. Si se trata de deformaciones que varían en el tiempo, pero que son uniformes a lo largo de la sección de medida para la selección de la banda hay que atenerse a los argumentos expuestos en el apartado 3.2.1.1. Si se trata de procesos oscilantes de alta frecuencia o de choque la longitud de la rejilla de medición es un factor a tener en cuenta (véase el apartado 3.3.7).

3.2.2 Bandas múltiples, sus ventajas y ámbitos de aplicación

Las bandas múltiples tienen varias rejillas de medición sobre un mismo soporte. Los diseños más frecuentes son las bandas dobles, las cadenas y las rosetas. Su principal ventaja radica en que se mantiene la separación y orientación entre las rejillas con mucha precisión. Otra ventaja es que son fáciles de aplicar ya que se pueden fijar varias rejillas con un solo paso. De hecho hay algunas aplicaciones para las que se requiere un espacio muy pequeño entre las rejillas de medición y que sólo se pueden realizar con bandas múltiples ya que sería técnicamente imposible con bandas simples.

3.2.2.1 Cadenas de bandas para determinar el gradiente de tensión

En el apartado sobre las tensiones en entallas se explicó la influencia que tiene la longitud de la rejilla sobre el resultado de la medición. En la práctica las relaciones no son tan claras de manera que no es posible determinar el pico de la tensión con certeza. Es posible que no solo sea de interés conocer el valor de pico sino también la variación de la carga sobre una sección o el desplazamiento del valor de pico bajo el efecto de un punto de carga variable. Las cadenas de bandas se desarrollaron para resolver este tipo de problemas.

Las cadenas de bandas extensométricas reúnen una serie de rejillas de medición del mismo tipo o alternan distintos tipos en intervalos regulares, pero siempre sobre un mismo soporte.

La figura 3.2-6. muestra algunos de los tipos más importantes.

Cada cadena contiene 10 rejillas individuales o 5 grupos cada uno con 3 rejillas. Al final de cada cadena hay una rejilla adicional que se puede aplicar por separado a un punto conveniente y se puede utilizar como rejilla suplementaria o de compensación.

Las cadenas de bandas se fabrican en varios tamaños. La dimensión T (paso) señala la distancia entre los ejes centrales de dos rejillas adyacentes, para la cadena de rosetas es la distancia entre dos grupos de rejillas. Las cadenas se fabrican con distintos pasos (1 mm, 2 mm, 4 mm). Para informaciones más detalladas véanse los catálogos actuales.

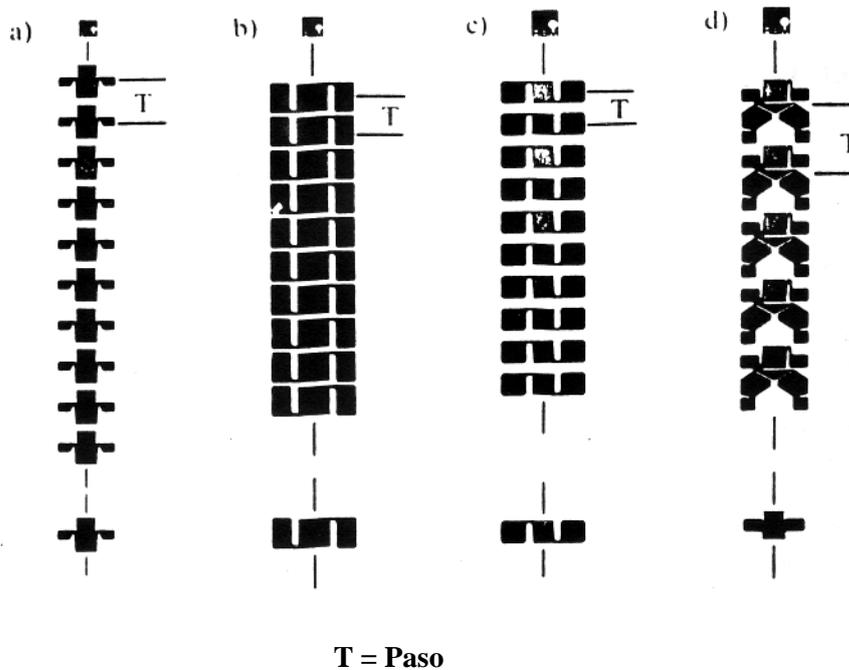


Figura 3.2-6: Formas de cadenas de bandas extensométricas

- a) rejillas paralelas al eje longitudinal de la cadena
- b) rejillas perpendiculares al eje longitudinal de la cadena
- c) rejillas alternando entre la posición paralela y perpendicular al eje longitudinal de la cadena
- d) rejillas en grupos de 3 con ángulos de $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ respecto al eje longitudinal de la cadena (cadena de rosetas)

La figura 3.2.7 muestra la determinación de la distribución de la tensión en la sección redondeada de la base de un diente de una rueda dentada, como un ejemplo de la aplicación de las cadenas de bandas extensométricas [3-4]. Para ello se midieron las tensiones tangenciales y transversales en 50 puntos de la base del diente utilizando 5 cadenas.

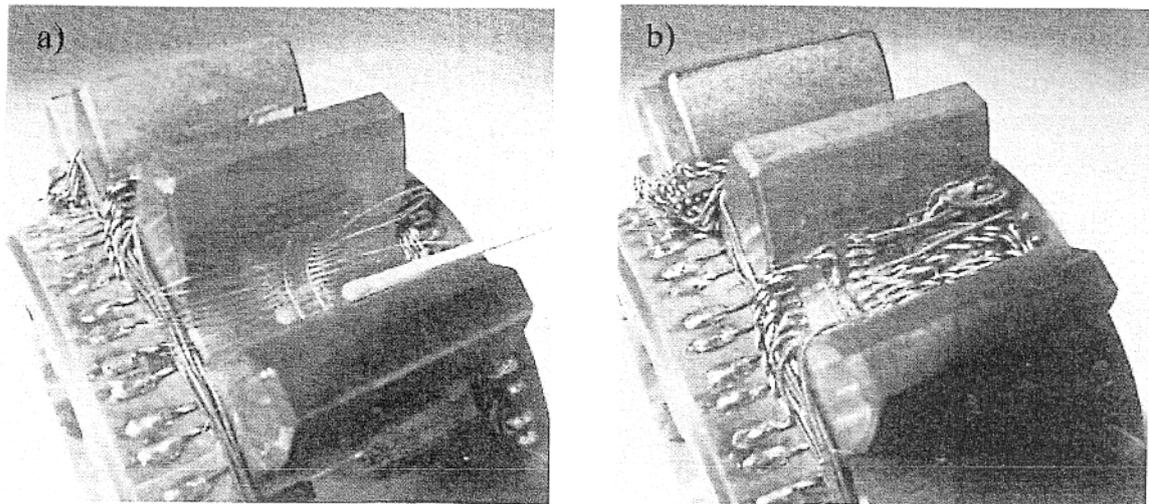


Figura 3.2-7: Medición de la deformación mediante cadenas de bandas en la base del diente de una rueda dentada [3-4]

- a) cadena de bandas instalada y una cerilla para comparar su tamaño
- b) instalación completa, lista para la medición

La imagen de la izquierda muestra la cadena fijada sobre la pieza y una cerilla para comparar su tamaño. La imagen de la derecha muestra el punto de medición completamente instalado. La figura 3.2-8 muestra las tensiones tangenciales obtenidas en una rueda dentada ensayada con tres puntos de carga distintos (izquierda: tensiones de compresión, derecha: tensiones de tracción).

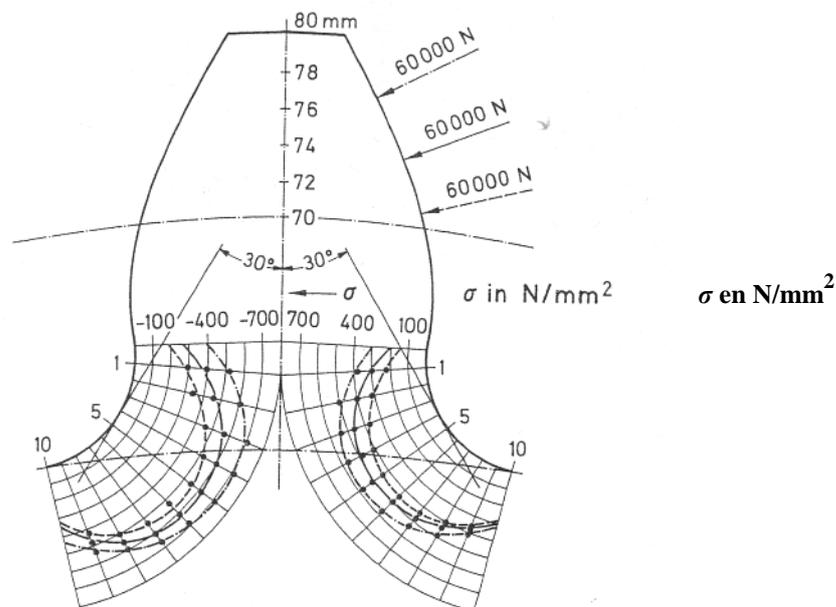


Figura 3.2-8: Tensiones tangenciales en la base de un diente de la rueda dentada

Las investigaciones se realizaron en el centro de investigación de transmisiones y ruedas dentadas de la TU-München. En este ejemplo no era posible predecir la posición del máximo de tensión; además se observa cierta dependencia respecto al punto de carga. Este tipo de mediciones solo se pueden realizar satisfactoriamente con cadenas de bandas extensométricas.

3.2.2.2 Rosetas de bandas para la determinación de los estados biaxiales de tensión

La denominación „Roseta“ se deriva de la forma original de las bandas múltiples con varias rejillas en forma de estrella cruzadas sobre un mismo soporte; ahora se emplea para todas las bandas múltiples cuyos ejes de rejilla se entrecruzan. Originalmente era necesario colocar las rejillas cruzadas debido a la gran longitud de las mismas, aunque hoy en día aun se emplean ocasionalmente. Las nuevas técnicas de fabricación, especialmente la técnica del fotograbado, producen rosetas con las rejillas una al lado de la otra, véase la figura 3.2-9. Ambos tipos presentan ventajas y desventajas.

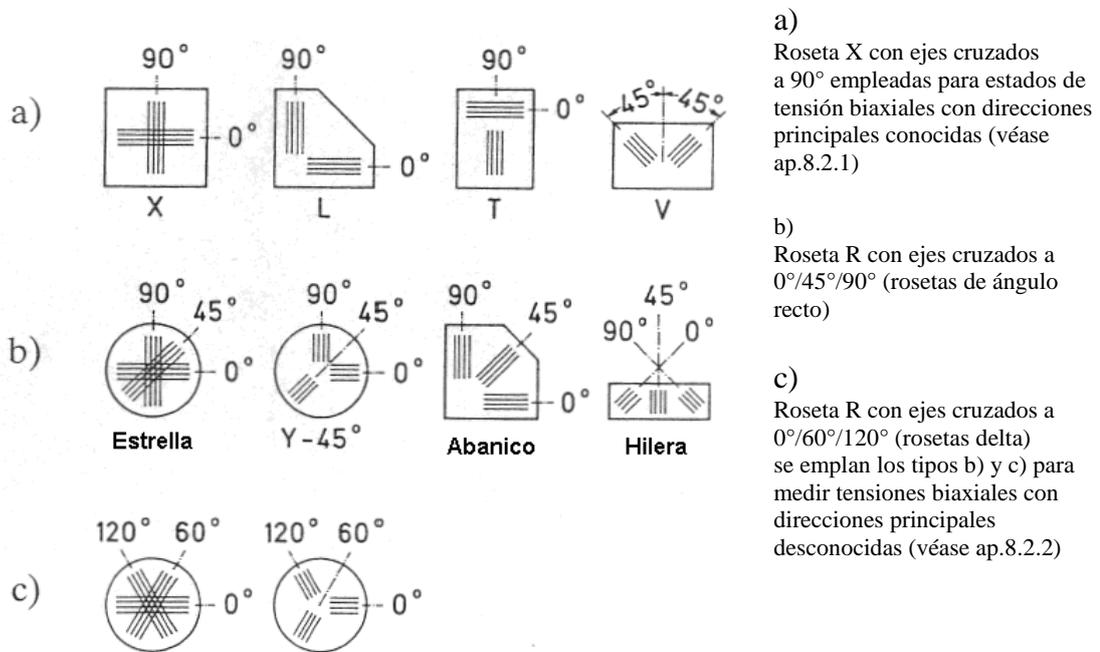


Figura 3.2-9: Rosetas extensométricas

En el caso de las rosetas en forma de estrella o de cruz, las rejillas de medición están colocadas una sobre la otra. Su principal ventaja es que las distintas componentes de la tensión se pueden medir casi en el mismo punto. Las desventajas surgen debido a las distintas distancias de las rejillas respecto a la superficie del objeto a medir, especialmente cuando aparecen tensiones de flexión en objetos finos o en superficies curvadas. Para objetos finos y especialmente para aquellos materiales con un bajo módulo de elasticidad (plásticos) debe tenerse en cuenta la rigidez elevada debido a la construcción más gruesa de las rosetas apiladas ya que puede impedir su deformación [3-52]. El calor acumulado como resultado de la disipación desfavorable en las rejillas superior y central se puede contrarrestar reduciendo la tensión de alimentación. En este sentido las rosetas con las rejillas colocadas una al lado de la otra sobre el mismo plano son más adecuadas. Sin embargo el espacio que requieren puede generar problemas al medir objetos reducidos o con picos de tensión en la región de la roseta. Por este motivo se fabrican rosetas de distintos tamaños y formas.

Se emplea la letra X para codificar las rosetas con dos ejes de rejilla que se cruzan en un ángulo de 90° (Figura 3.29a). La letra X se emplea también para todas las rosetas con los dos ejes de las rejillas cruzados aunque las rejillas estén colocadas en forma de T, L o de V.

En el análisis de tensiones se utilizan rosetas de tipo X para investigar estados de tensión biaxiales siempre y cuando se conozcan las direcciones principales. Con ellas se obtienen tensiones positivas y negativas para el cálculo acumulativo en el diseño de transductores simples y en aplicaciones relacionadas, por ejemplo para la supervisión de maquinaria industrial (véase apartado 8.4).

El código para las rosetas con tres rejillas de medición es „R“. Existen dos formas básicas, que se diferencian por el intervalo angular entre las rejillas: $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ y $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ (figura 3.2-9b y c). El valor de los ángulos se refiere siempre a las direcciones de las rejillas independientemente de la forma en que estas estén colocadas sobre el soporte, bien sea en forma de estrella, Y, delta o abanico. Las rosetas de tipo “R” se emplean para analizar tensiones biaxiales de direcciones principales desconocidas. En el apartado 8.2 hay ejemplos y fórmulas para evaluar la medición con rosetas.

3.2.2.3 Rosetas para la investigación de tensiones residuales

Se explicará el método para medir las tensiones residuales en piezas estructurales a partir de un ejemplo. Se pretende examinar las tensiones residuales en una placa, véase la figura 3.2-10. Puede que sean tensiones normales uniaxiales o biaxiales con direcciones principales desconocidas y que también se les superpongan tensiones de flexión.

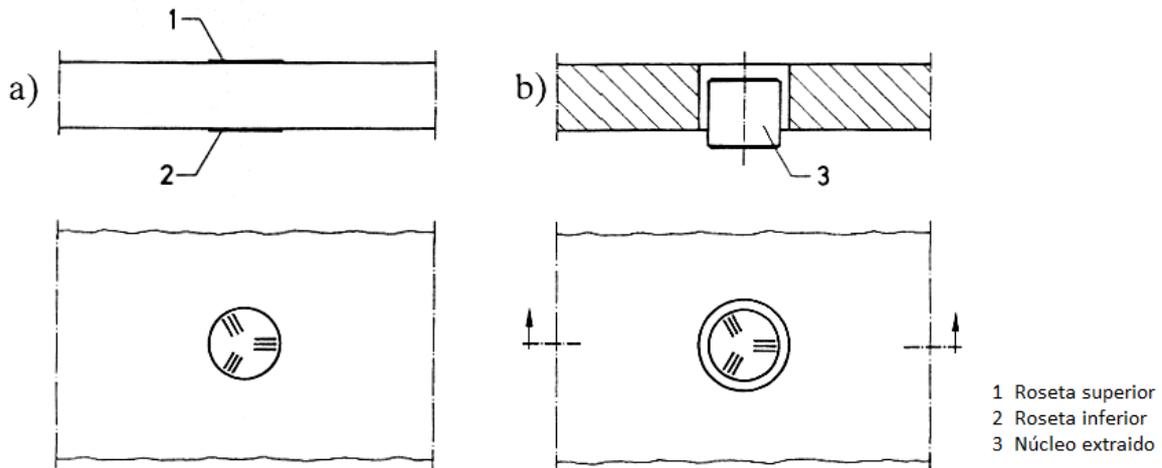


Figura 3.2-10: Ejemplo que ilustra el método para la determinación de tensiones residuales
a) estado inicial
b) estado después de extraer un “núcleo”

Se fija una roseta en el punto de interés y se establece la dirección de la rejilla respecto al objeto. Entonces se registran los valores de las 3 rejillas de medición. Este es el estado inicial. Si es probable que exista superposición de tensiones de flexión se aplicará una roseta adicional en una posición exactamente opuesta a la primera al otro lado de la pieza. Posteriormente la sección del material conteniendo la roseta se extrae mediante una fresa anular u otro método adecuado. El núcleo extraído queda libre de las fuerzas que le transmitía el material de su alrededor y regresa a su estado natural distensionado.

Una nueva medición de las rejillas de la roseta muestra la variación que se evalúa según los métodos y fórmulas para la medición con rosetas del apartado 8.2. Únicamente se debe tener en cuenta que la tensión medida tiene el signo exactamente opuesto a la tensión residual.

Se ha descubierto que no es necesario extraer el núcleo completo del objeto a medir, especialmente cuando hay partes estructurales complejas afectadas y cuando el acceso desde ambos lados, que únicamente es factible para una placa, resulta imposible. Basta con fresar un surco anular poco profundo suficiente para liberar la tensión en la superficie del núcleo, véase la figura 3.2-11.

Para este método, conocido como „método de núcleo anular“ las restricciones del espesor del objeto no aplican. La profundidad del surco anular influye en el grado de liberación de tensión obtenido y se debe considerar al evaluar los resultados. En [3-5] se describen los principios teóricos, así como la evaluación de las mediciones. La figura 3.2-12. muestra una roseta especial de núcleo anular con un diseño óptimo para este procedimiento.

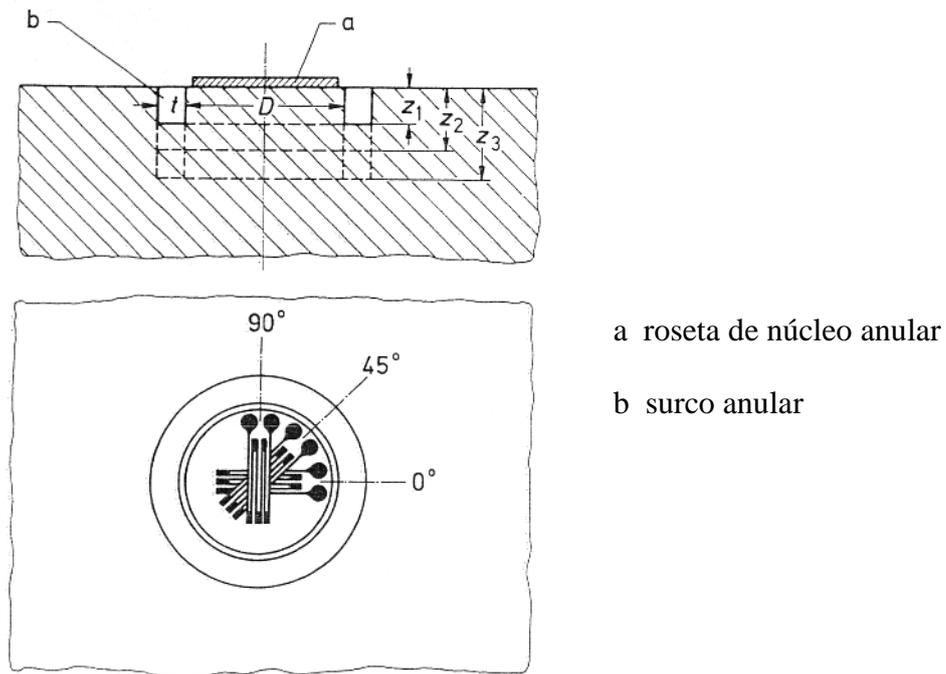


Figura 3.2-11: Esquema del método de núcleo anular según Böhm y Wolf

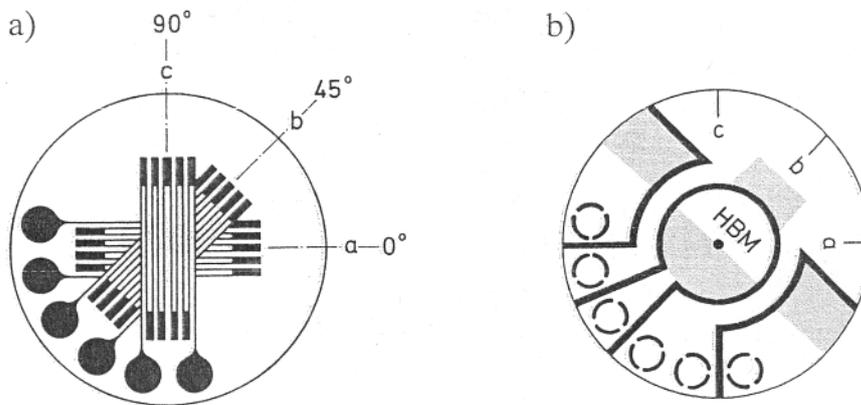


Figura 3.2-12: Roseta especial para el método de núcleo anular según Böhm y Wolf
a) colocación de las rejillas
b) roseta completa

Un procedimiento más antiguo para medir tensiones residuales es el método del taladro. Se taladra un pequeño agujero que perturba las condiciones de tensión. Se modifican las líneas del flujo de fuerzas y se deforma el contorno del agujero, véase la figura 3.2-13.

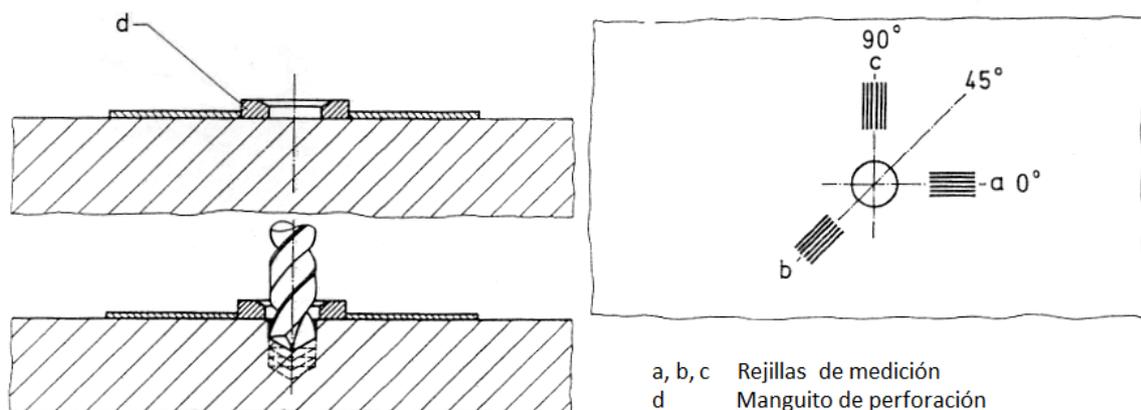


Figura 3.2-13: Esquema del método del taladro

Es suficiente taladrar un agujero de una profundidad igual a su diámetro. Una rosca especial para el método del taladro tiene 3 rejillas de medición situadas en $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ grados, para posibilitar un análisis cualitativo y cuantitativo. Un manguito garantiza una posición centrada de la perforación, un factor importante para la precisión de los resultados. La figura 3.2-14 muestra una rosca para el método del taladro.

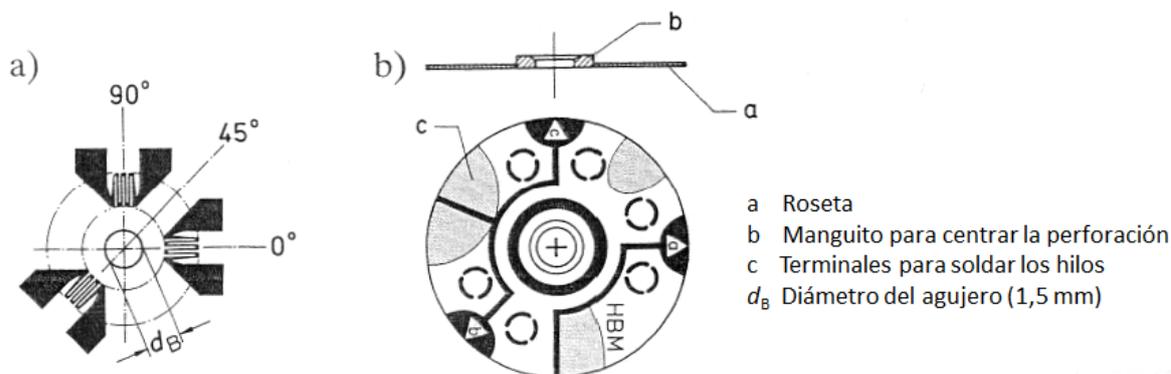


Figura 3.2-14: Roseta especial RY 61 para el método del taladro

- a) Colocación de las rejillas
- b) Roseta completa

El incremento de tensión en los bordes del agujero debido a los efectos de entalla crea restricciones para este método. El material puede deformarse hasta llegar al punto de fluencia aunque las tensiones residuales estén por debajo de este límite.

Los principios de este método así como los procedimientos de evaluación se tratan en [3-6, 3-7] y en el apartado 8.3.

3.2.3 Bandas especiales

Aparte de las bandas con distintas formas de rejilla adaptadas a la aplicación, hay bandas especiales que se diferencian de las bandas normales por ejemplo por la manera en que se fijan al objeto a medir. Hay por lo menos 3 ejemplos que merecen ser mencionados. Aparte existen otros tipos que no se tratarán. Para más información véanse los catálogos de productos.

3.2.3.1 Bandas extensométricas para soldar

Tienen una base metálica p. ej. de acero inoxidable y la fijación se realiza mediante la soldadura por puntos. La figura 3.2-15 muestra un ejemplo. Debido a la base de acero tienen una rigidez muy elevada. Por eso sólo se pueden utilizar en objetos gruesos y fuertes p.ej. para la construcción.

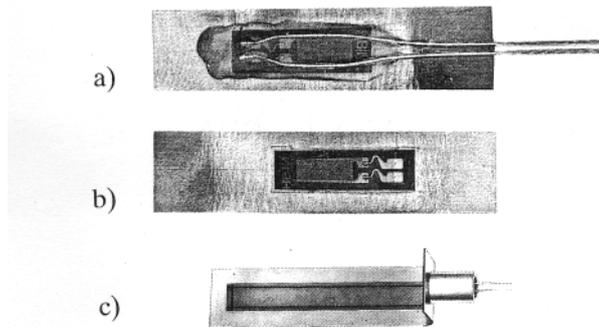


Figura 3.2-15: Ejemplos de bandas para soldar
a) banda con base metálica, terminales de hilo y protección
b) banda con base metálica
c) banda con encapsulado metálico

3.2.3.2 Bandas de rejilla libre, bandas para altas temperaturas

Las bandas de rejilla libre o soporte amovible se emplean principalmente a temperaturas extremas (altas o bajas). La rejilla está fijada sobre un soporte auxiliar que se elimina durante la aplicación, véase la figura 3.2-16. Para su fijación se utilizan adhesivos cerámicos que junto con las rejillas de aleación de platino y wolframio permiten realizar mediciones (sin referencia al punto cero) a altas temperaturas de hasta 800 °C.

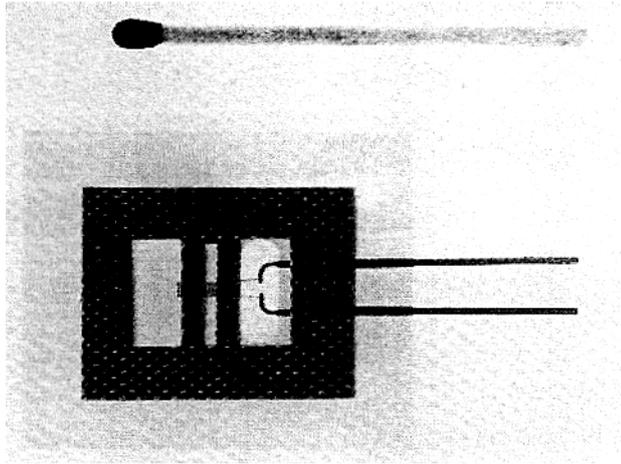


Figura 3.2-16: Banda de rejilla libre oporte amovible para altas temperaturas; adecuada para la fijación mediante adhesivos de cerámica *)

3.2.3.3 Bandas soldables de alta temperatura

En contraposición a las bandas mencionadas previamente de rejilla libre cuya fijación es muy complicada, el sistema de bandas Ailtech que permite una fijación por puntos de soldadura resulta ventajoso. Se fabrican en versiones de medio puente y de cuarto de puente.

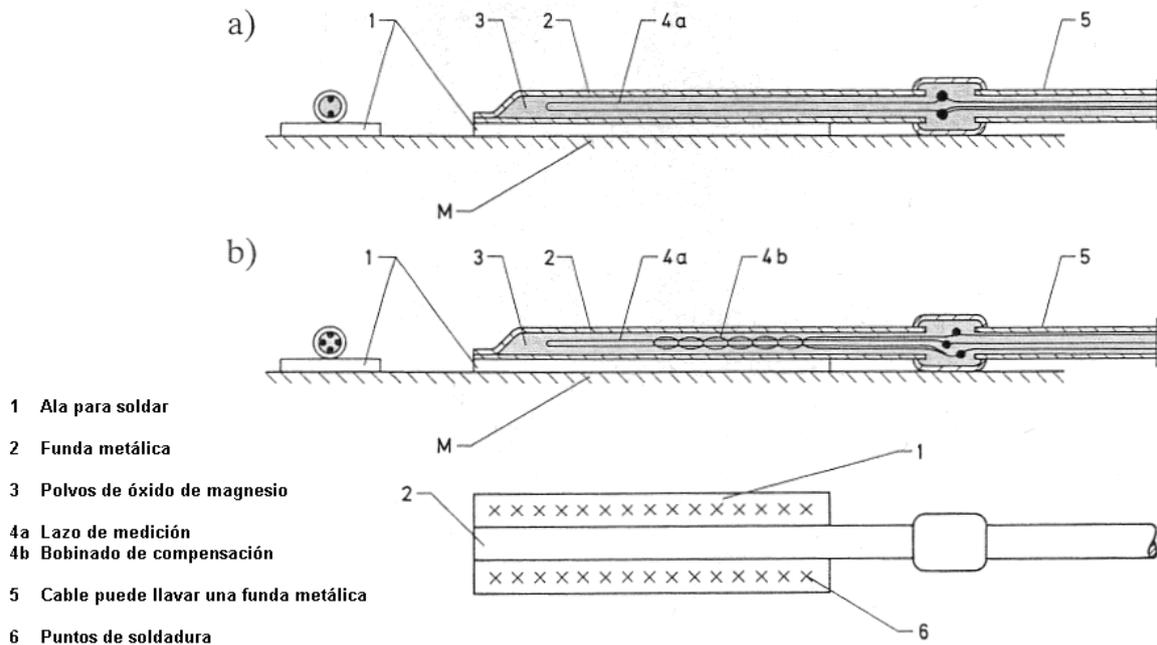


Figura 3.2-17: Esquema de una banda encapsulada soldable de alta temperatura según el sistema Ailtech/Eaton
 a) versión de cuarto de puente
 b) versión de medio puente (lazo la medición y bobinado pasivo para la compensación de temperatura)

*) Eliminada del catálogo de HBM

El hilo de medición se embebe en polvo de MgO compactado dentro de un tubo metálico (figura 3.2-17). También existen versiones con cables dentro de una funda metálica. El rango de temperatura de las bandas con rejillas de PtW va desde los $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$, y hasta los $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ para mediciones sin referencia al 0. Para más información consúltense [3-8 a 3-10, 3-14, 3-18, 3-19, 3-23, 3-50].

3.2.4 La resistencia eléctrica

Las bandas extensométricas se fabrican con distintas resistencias. Los valores de las mismas tienen un origen histórico pero han demostrado ser útiles y por eso continúan en uso. El valor más común es el de $120\ \Omega$. La mayor selección de bandas se encuentra para este grupo de resistencias. Se emplean principalmente para el análisis de tensiones, los sistemas de monitorización etc. Las bandas de $350\ \Omega$, $700\ \Omega$ y $1000\ \Omega$ también se utilizan ampliamente para la fabricación de transductores.

No existe una respuesta definitiva a la pregunta de cual es el mejor valor. Hay tres puntos importantes para la selección de la resistencia de la banda extensométrica:

- la adaptación a la instrumentación donde se conectará a la banda,
- la ponencia eléctrica permitida en la banda,
- los efectos de las conexiones entre la banda y el resto de instrumentación.

En ocasiones hay requerimientos contradictorios, que fuerzan el compromiso.

Los amplificadores de medición HBM tienen un campo de adaptación tan amplio que la resistencia de la banda no representa ninguna dificultad.

Con un amplificador de corriente continua conectado a las bandas de alta resistencia con tensiones de alimentación elevadas se mejoran las características de deriva del punto cero a causa del amplificador. Por otra parte un circuito de alta resistencia es más propenso a formar antenas y captar interferencias que uno de baja resistencia. Si no se aísla perfectamente esto puede fácilmente provocar errores de medición.

En los cables de medición largos hay un efecto de atenuación, que no sólo ocurre con frecuencias portadoras, sino también - y esto normalmente se pasa por alto - en las señales de medición dinámicas de alta frecuencia. Este efecto es menos acusado con cables de baja resistencia (véase apartado 7.4).

Las resistencias eléctricas de las conexiones, p.ej. los cables, los bornes, los anillos de rozamiento etc., influyen en menor medida si la resistencia de la banda es más alta. Por otra parte las variaciones de la resistencia de aislamiento tienen menor efecto si la resistencia de la banda es menor (véase apartado 7.2).

En la mayoría de casos la banda de $120\ \Omega$ es la mejor opción.

3.2.5 El rango de temperaturas útiles

Es muy complicado responder a la pregunta de cuales son los límites de temperatura admisibles para el uso de bandas extensométricas. El motivo son los distintos efectos que influyen sobre los parámetros de la banda al nivel de temperatura relevante, el tiempo de exposición a dicho nivel de temperatura y también el error de medición tolerable. Por este motivo en [2-1] aparece el siguiente comentario bajo el título „resistencia a la temperatura” :

„Según recomienda esta directriz todas las características principales de la banda se deben indicar en relación a la temperatura. De esta manera el usuario está en condiciones de evaluar los límites de temperatura admisibles para sus mediciones.“

En cuanto al efecto de la temperatura sobre la calidad de una medición hay que tener en cuenta dos factores:

- el nivel de la temperatura,
- su variación durante la medición.

A una temperatura elevada es importante saber cuanto tiempo puede aguantar la fijación de la banda y también que otros efectos cabe esperar. Aquí, la temperatura nunca aparece como una variable independiente, ya que siempre está relacionada con el tiempo ya sea el tiempo de subida o de permanencia de la temperatura; siempre viene acompañada de influencias externas, tales como las condiciones atmosféricas que provocan un efecto físico, p.ej. la presión, o químico, p.ej. oxidación, incluidos los procesos de transformación de la aleación de las rejillas.

Para poder considerar los límites operativos de una fijación concreta hay que tener en cuenta las condiciones del entorno y aquí es donde comienzan las dificultades a la hora de dar una respuesta. Solo se puede dar una respuesta muy general para las aplicaciones más comunes. Normalmente el efecto de la temperatura no produce cambios drásticos, a partir de los cuales se pueden establecer límites concretos; hay una transición gradual entre correcto, pasable e inservible. Su clasificación depende de la precisión deseada.

En términos generales se puede decir que es más fácil operar a bajas temperaturas que a temperaturas elevadas. También es importante distinguir entre mediciones con o sin referencia al punto cero (véase apartado 2.4); en el primer caso los límites de temperatura serán bastante más bajos que en el segundo (también considerando la dependencia temporal). Hay que tener en cuenta que no sólo importan los datos de la banda sino también los del adhesivo, el aislamiento, el cableado etc.

Los siguientes valores pueden servir como orientación para hacerse una idea de los límites operativos de las bandas extensométricas metálicas:

Para las mediciones sin referencia al punto cero el rango de temperaturas va desde -269°C hasta 800°C . Para mediciones con referencia al punto cero de corta duración el límite superior es de unos 500°C , haciendo uso de todas las medidas posibles de compensación y corrección de errores. Para las bandas con una rejilla de constantán el rango se reduce de -200°C hasta $+200^{\circ}\text{C}$, para „calidad de transductor“ de -20°C hasta $+70^{\circ}\text{C}$, y para los más altos requisitos de precisión (células de carga) es tan sólo de -10°C hasta $+40^{\circ}\text{C}$ con un límite temporal de 20 minutos.

La abundancia de publicaciones, especialmente para el área de altas temperaturas, es un indicador de la especial problemática que existe; además indica que el desarrollo en éste ámbito aun está en progreso [3-8 hasta 3-23].

Las variaciones de temperatura afectan sobretodo al punto cero, es decir al punto de referencia de la medición. Los errores se pueden mantener dentro de márgenes razonables mediante bandas de autocompensación (véase apartado 3.3.4) y/o con el uso de métodos de compensación (véase apartado 7.1).

Las mediciones a temperaturas por encima de los $200 \dots 300^{\circ}\text{C}$ presentan problemas tanto con la estabilidad del punto cero como con la duración [3-23]. Parece que las bandas capacitivas (vease el apartado 1.0.4) pueden llenar este hueco [1-11 hasta 1-15].

3.3 Datos técnicos

Los parámetros y características descritos en esta sección son significativos para la medición con bandas extensométricas y también aportan información útil para la selección de una banda extensométrica teniendo en cuenta requisitos especiales. Los valores numéricos que aparecen se determinaron siguiendo las directrices descritas en [2-1]. Otro aspecto a tener en cuenta es que la mayoría de los parámetros de la banda sólo pueden establecerse una vez ésta se ha fijado sobre el objeto a medir. En este sentido las características del adhesivo también pueden influir en los parámetros de la banda, p.ej. pueden reducir el rango de temperaturas operativas.

Debe quedar claro que sólo se pueden dar límites dentro de ciertos márgenes de medición. Estos límites rara vez son absolutos; el tiempo, la temperatura u otros parámetros de influencia pueden desplazar los límites aceptables. Por este motivo en [2-1] se emplean gráficas que muestran la variación de los parámetros bajo la influencia de algunas variables importantes en lugar de un simple valor numérico.

3.3.1 La sensibilidad a la deformación (factor de banda) de las bandas extensométricas metálicas

En el apartado 1.1.1 se explica la relación física entre la deformación y la variación de la resistencia de un conductor eléctrico metálico. También se menciona la existencia de metales que exhiben una relación lineal entre la variación relativa de la resistencia y la deformación. Si estos metales, que son varios tipos de aleaciones, a su vez exhiben un coeficiente de temperatura de la resistencia eléctrica bajo o insignificante, son escogidos para la fabricación de bandas extensométricas. Se emplean otras aleaciones si hay requerimientos especiales respecto a la estabilidad a temperatura o respecto a la resistencia contra la fatiga durante procesos de carga dinámicos.

La sensibilidad de una banda se expresa a través de la relación entre la variación relativa de la resistencia y la deformación, y se representa con el símbolo k :

$$k = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0} = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon}. \quad (3.3-1)$$

Las unidades dimensionales relevantes son

$$(k) = \left\{ \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0} \right\} \text{ en } \left[\frac{\Omega/\Omega}{\text{m/m}} \right].$$

Las unidades únicamente son importantes para cálculos dimensionales, en la práctica se cancelan de manera que el “factor k ” aparece como una cantidad adimensional.

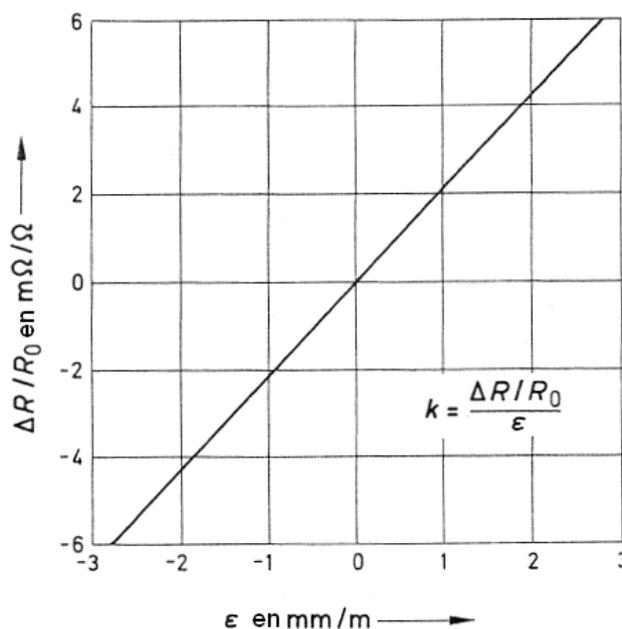


Figura 3.3-1: Curva característica de una banda metálica y la definición del factor de banda k

En el diagrama resistencia- deformación, la pendiente de la curva representa el factor de banda k , véase la figura 3.3-1.

En contraste con el parámetro S (véase. eq.1.1-2) definido en el apartado 1.1.1 que caracteriza al conductor estirado, el factor k (factor de proporción) caracteriza la banda completa. Las influencias de la configuración de la rejilla y la transferencia de deformación de las condiciones de a la rejilla causan una diferencia entre los factores S y k , si bien suele ser muy pequeña. Por este motivo el fabricante determina y anota el factor de banda k en cada paquete a partir de una muestra de cada lote aplicando métodos estadísticos para el control de calidad según las directrices de [2-1].

Es imposible ajustar el factor de banda k durante el proceso de fabricación para conseguir un valor específico. La tabla 3.3-1 muestra valores medios del factor de banda k para aleaciones de rejilla comunes.

| Material de la rejilla Nombre comercial | Composición típica [%] | Factor de banda k medio aproximado |
|--|----------------------------|---|
| Constantán | 57 Cu, 43 Ni | 2,05 |
| Karma | 73 Ni, 20 Cr, Rest Fe + Al | 2,1 |
| Nicromo (cromo-níquel) | 80 Ni, 20 Cr | 2,2 |
| Platino-wolframio | 92 Pt, 8 W | 4,0 |

Tabla 3.3-1: Factor de banda k promedio para bandas con distintas aleaciones de rejilla

El hecho de que las bandas extensométricas metálicas poseen una característica lineal es válido con ciertas restricciones. Se ha observado que las bandas de constantán tienen una característica no lineal para grandes deformaciones de hasta $150\ 000\ \mu\text{m}/\text{m} = 15\ \text{cm}/\text{m}$. Su relación es parabólica y se puede describir aproximadamente por el polinomio $\varepsilon^* = \varepsilon + \varepsilon^2$. ε^* corresponde al valor medido y ε es el valor real. Se puede suponer que otras aleaciones muestran un comportamiento similar. Para más información véase el apartado 3.3.6.

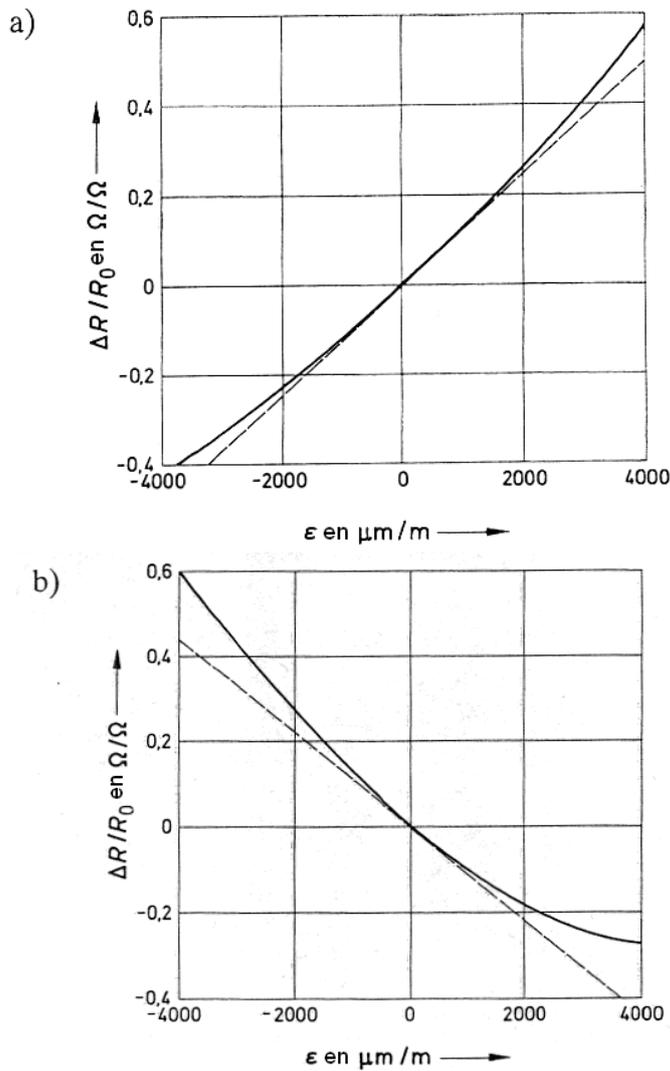
Si se emplea la banda en regiones de grandes deformaciones, tal y como se acostumbra hacer para los circuitos de cuarto de puente, la característica no lineal de la banda se compensa automáticamente (véanse apartado 5.2 y [3-29]).

3.3.2 El factor de banda para bandas semiconductoras

En el apartado 1.1.2 se constató que la curva característica de una banda semiconductor es parabólica. La figura 3.3-2 muestra las curvas características para bandas semiconductoras de silicio de tipo p y de tipo n .

Las características dependen de la temperatura, como señala la ecuación (1.1-3).

La dependencia de la temperatura se puede reducir con un deformaciones más fuerte del silicio; sin embargo se reduce el factor de banda al mismo tiempo, de manera que hay que llegar a un compromiso.



Línea continua: curva características a la temperatura ϑ_0 .

Línea discontinua: tangente en el punto $\varepsilon = 0 \rightarrow \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\vartheta_0} = k\varepsilon$

Figura 3.3-2: Curvas características para bandas semiconductoras:
a) de silicio tipo p 0,020 Ωcm

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\vartheta_0} = k\varepsilon + c\varepsilon^2 = 119,5 \cdot \varepsilon + 4000 \cdot \varepsilon^2,$$

b) de silicio tipo n 0,031 Ωcm

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\vartheta_0} = k\varepsilon + c\varepsilon^2 = -110 \cdot \varepsilon + 10000 \cdot \varepsilon^2.$$

Es imposible describir la curva característica mediante un valor similar al factor de banda k para bandas metálicas. Esto sólo es posible para la pendiente de la tangente a una temperatura de referencia v_0 tal y como muestra la figura 3.3-2. Para las bandas semiconductoras de tipo p disponibles comúnmente los factores de banda k oscilan entre los +110 y +130, y entre -80 y -100 para las bandas de tipo n.

Si las deformaciones a medir no superan los $\pm 1000 \mu\text{m/m}$ y la tolerancia de error es de hasta $\pm 5 \%$, se pueden simplificar las mediciones asumiendo un factor de banda k constante. Si se requieren resultados más precisos se debe corregir la medición. Muchos fabricantes incluyen tablas de corrección calculadas individualmente con sus bandas semiconductoras simplificando notablemente la evaluación de los resultados para el usuario.

En este libro no se describirán otras particularidades de las bandas semiconductoras en relación con las variaciones de temperatura o a causa de desviaciones de la temperatura v respecto a la temperatura de referencia v_0 . En [3-24] hay una explicación detallada.

3.3.3 La sensibilidad transversal

Idealmente, las bandas extensométricas únicamente deberían reaccionar en su dirección “activa” a una deformación con una variación de su resistencia y esto debería ocurrir según la relación descrita por el factor de banda k . La dirección “activa” se determina por la dirección de los hilos o partes conductoras de la rejilla de medición, véase la figura 3.3-3.

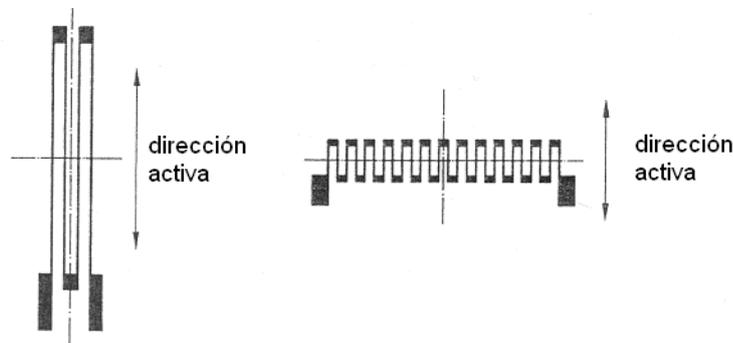


Figura 3.3-3: La dirección activa de una banda extensométrica

Nota:

Para las bandas resistivas, los términos „dirección activa“ o „banda activa“ siempre se refieren a la dirección de medición o a las bandas de medición (en contraste a las bandas de compensación). Este es el uso común de dichos terminos que no debe confundirse con el término físico transductor activo. En sentido físico una banda extensométrica activa sería una banda piezoeléctrica tal y como se describe en el apartado 1.0.5.

En ocasiones se observan leves variaciones en la resistencia eléctrica cuando actúan sobre la banda deformaciones perpendiculares a la dirección activa de la banda.

La definición de sensibilidad transversal se basa en las siguientes suposiciones:

a) Si se aplica una carga uniaxial en la dirección “activa” de la banda, véase la figura 3.3-4a, ésta presenta un factor de banda k_1 , descrito por la expresión:

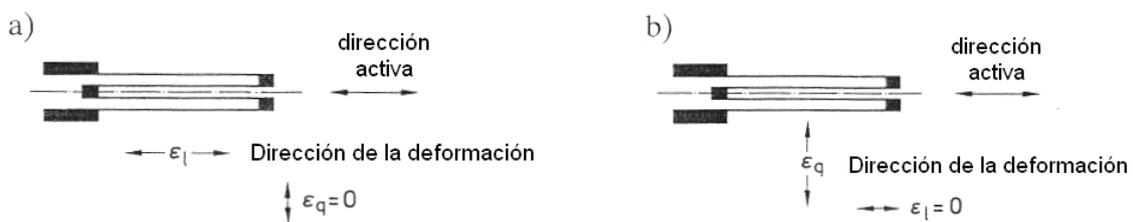
$$k_1 = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_l} \quad (3.3-2)$$

b) Si se aplica una carga uniaxial en dirección transversal a la dirección “activa” de la banda, véase la figura 3.3-4b, ésta también presenta un factor de banda k_q , generalmente más pequeño descrito por la expresión:

$$k_q = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_q} \quad (3.3-3)$$

La sensibilidad transversal q se define como el cociente entre el factor de banda k_q , transversal a la dirección de medición y el factor de banda k_1 en la dirección de medición.

$$q = \frac{k_q}{k_1} \quad (3.3-4)$$



ε_l deformación longitudinal de la banda

ε_q deformación transversal de la banda

Figura 3.3-4: Definición de la sensibilidad transversal

- a) la dirección de la deformación coincide con la dirección “activa” de la banda**
- b) la dirección de la deformación es perpendicular a la dirección “activa” de la banda**

Inicialmente se pensó que la sensibilidad transversal de las bandas extensométricas era causada por las partes de la rejilla que transcurren en dirección transversal a la dirección activa. Esencialmente esta suposición era correcta para los diseños originales de bandas extensométricas para los que se empleaban rejillas de hilos enrollados con una amplia distancia entre ellos (figura 3.3-5a). Por este motivo las medidas de mejora en la construcción se centraron precisamente en este punto debil. Con el empleo de métodos refinados de enrollamiento, se logró reducir la distancia entre hilos hasta 0,1 mm (figura 3.3-5b).



Figura 3.3-5: Distintas formas de rejillas y métodos para reducir la sensibilidad transversal
a) forma original
b) enrollamiento estrecho
c) puentes transversales gruesos
d) conexiones transversales anchas

Siguiendo otra idea se intentó contrarrestar la sensibilidad transversal uniendo los hilos longitudinales de la rejilla con gruesos puentes transversales (figura 3.3-5c). Este método, muy complicado de realizar durante la fabricación, aportó una reducción considerable de la sensibilidad transversal aunque no consiguió eliminarla por completo.

Para las nuevas bandas en lámina (figura 3.3-5d) se retoma la idea de los puentes transversales uniendo las secciones longitudinales mediante gruesas conexiones transversales. Sin embargo la fabricación en lámina es mucho más fácil que con hilos. Una investigación experimental realizada con bandas en lámina aportó los siguientes resultados:

En la zona ancha de las conexiones transversales se dan pequeñas variaciones de resistencia positivas cuando se experimentan deformaciones positivas, véanse las figuras 3.3-6b y c. Este proceso se reduce a una pequeña zona al final de la rejilla. Por eso el efecto es más notable para las rejillas cortas que para las rejillas largas ya que la influencia relativa de la parte distorsionada es mayor. En las figura 3.3-7, se muestran los resultados de las mediciones que lo confirman.

Un segundo efecto superpuesto surge a causa de las fuerzas que actúan lateralmente a lo largo de las secciones longitudinales estirando la rejilla en dirección transversal (figura 3.3-6d). El efecto de dichas fuerzas sobre el conductor depende de sus dimensiones y de las fuerzas que se transmiten. Un conductor embebido totalmente en el material portador soportará más carga que uno fijado encima. En las bandas con rejilla de constantán o de Karma este efecto causa una variación ligeramente negativa de la resistencia para deformaciones positivas. Esto explica la sensibilidad transversal negativa que se observa ocasionalmente.

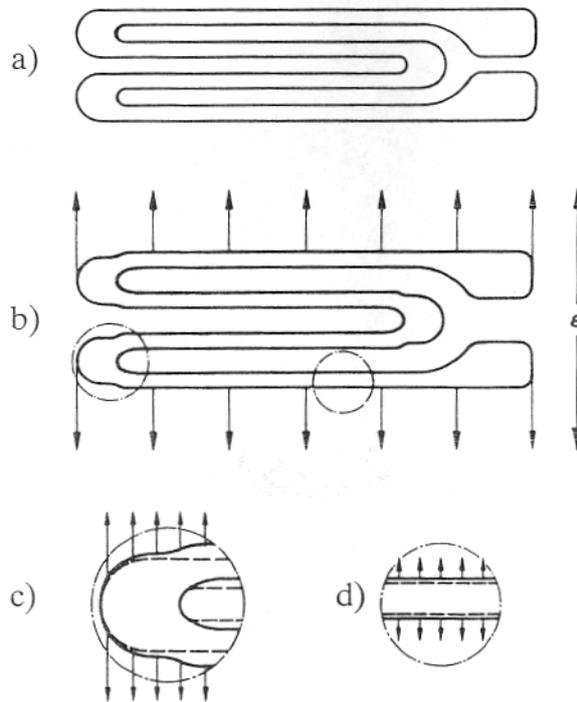


Figura 3.3-6: Las causas de la sensibilidad transversal de las bandas extensométricas

- a) estado inicial
- b) estado de deformación transversal
- c) deformación de las conexiones transversales
- d) deformación en el resto de la rejilla

Para el diseño de bandas extensométricas se intenta escoger una geometría que presente una sensibilidad transversal muy pequeña. Esto no siempre es posible, ya que también hay otras consideraciones que juegan un papel importante para el diseño.

Mientras que el factor de banda k_1 se mide con un campo de deformación uniaxial, la medición del factor de banda k se realiza con un campo de tensión uniaxial (véase apartado 3.3.1). Por lo tanto hay una diferencia entre k_1 y k que depende de la sensibilidad transversal de la banda.

Esto no supone una desventaja para la fabricación de transductores, ya que los transductores siempre se calibran una vez terminados. Esto mismo es válido para todas las aplicaciones en las que se determina la relación entre señal y variable medida mediante calibrado.

Para el análisis experimental de tensiones biaxiales es necesario realizar correcciones (véase el apartado 7.5) aunque se puede prescindir de ello si la sensibilidad transversal es suficientemente pequeña ($q \leq 0,01$) [7-3].

El diagrama de la figura 3.3-7 muestra los resultados de una investigación con diferentes series de bandas extensométricas según el método descrito en [2-1].

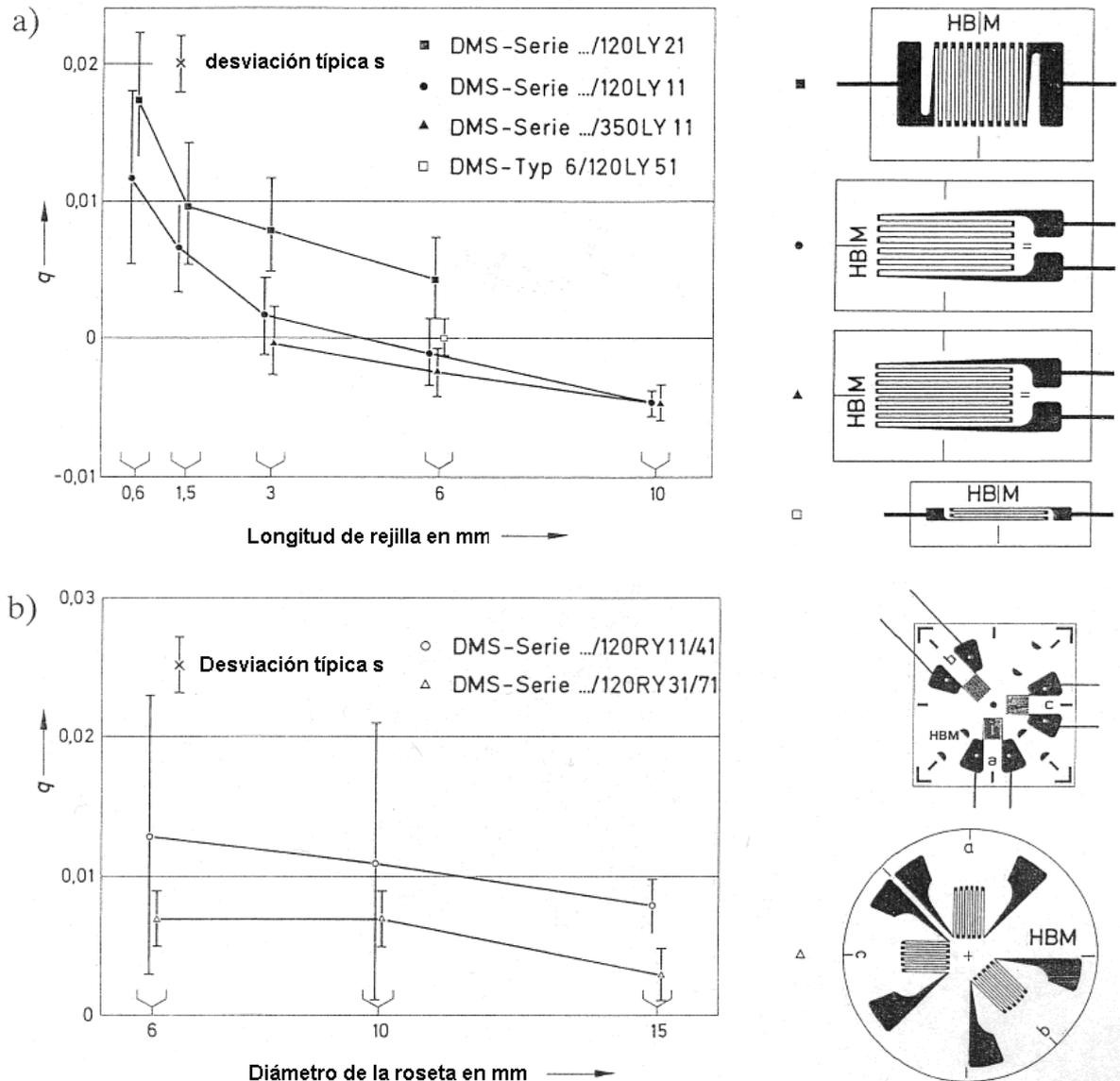


Figura 3.3-7: La sensibilidad transversal q en relación con la longitud de rejilla para algunas series de bandas y rosetas extensométricas
a) bandas lineales
b) roseta

3.3.4 La respuesta a la temperatura de una banda instalada

Se entiende como respuesta a la temperatura la variación a causa de la temperatura de la señal medida sin la presencia de carga alguna o con una carga totalmente constante. Una respuesta a

la temperatura puede ocurrir si durante el periodo de observación, es decir entre el cero o registro del valor de referencia y la lectura del valor de medición, cambia la temperatura del objeto a medir o la del ambiente. La respuesta a la temperatura es reversible y los efectos de la temperatura desaparecen cuando se vuelve a las condiciones de temperatura iniciales. En la literatura la respuesta a la temperatura a menudo se denomina “deformación aparente”, un término que no hace ninguna referencia a su causa.

Hay varios factores que afectan la respuesta a la temperatura ε_{ϑ} :

- la dilatación térmica del material de la pieza, α_B
- la dilatación térmica del material de la rejilla α_M
- el coeficiente de temperatura de la resistencia eléctrica del material de la rejilla, α_R
- la variación de la temperatura $\Delta\vartheta$ como la variable causante de los efectos

Además, la respuesta a la temperatura de la resistencia eléctrica del cableado conectado en serie con la banda puede contribuir a la respuesta a la temperatura. Este aspecto se analizará en el apartado 7.1. No se debe confundir la respuesta a la temperatura con la deriva térmica, que es un proceso irreversible que a su vez se superpone a la respuesta a la temperatura (véase apartado 3.3.4.2). Se puede realizar un cálculo aproximado de la respuesta a la temperatura de una banda extensométrica utilizando la ecuación.

$$\varepsilon_{\vartheta} = \left(\frac{\alpha_R}{k} + \alpha_B - \alpha_M \right) \Delta\vartheta \quad (3.3-5)$$

El resultado sólo se puede emplear como una guía para un cierto rango de temperaturas, ya que los parámetros α_R , α_B , α_M y k dependen a su vez de la temperatura. Por eso es más correcto representar la respuesta a la temperatura en forma de gráfico.

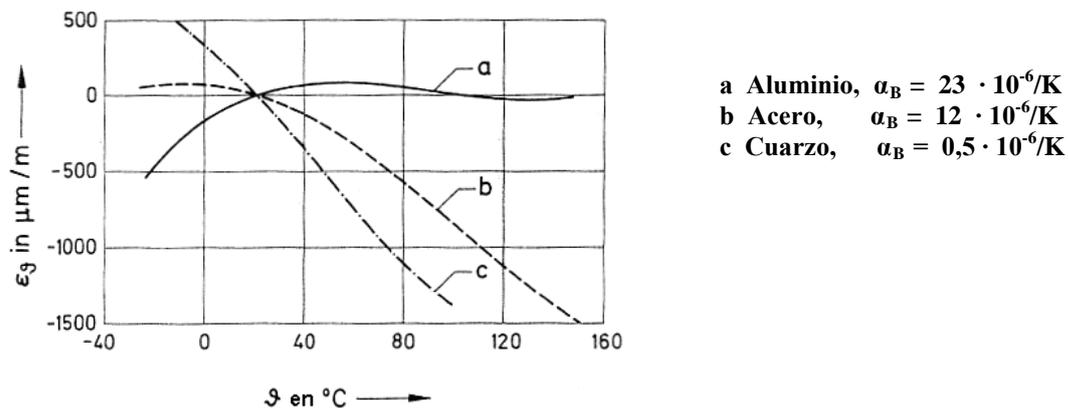


Figura 3.3-8: Un ejemplo de respuestas a la temperatura de distintos puntos de medición empleando el mismo tipo de banda extensométrica sobre distintos materiales

Si se fijan bandas de idénticas características sobre materiales con distintos valores α_B , se obtienen curvas distintas de ε_v . La figura 3.3-8 muestra algunos ejemplos.

La curva es válida asumiendo que el objeto a medir tiene suficiente rigidez, como para que las fuerzas causadas por la banda y el adhesivo no tengan efecto. Esta suposición es válida para todos los objetos metálicos excepto para aquellos extremadamente delgados.

El resultado de una medición durante la cual el objeto es expuesto tanto a una variación de la temperatura como a una carga mecánica es la suma de la deformación mecánica y la térmica. La parte térmica de la deformación indicada es, por tanto, un error. Este resultado insatisfactorio se puede remediar mediante bandas de auto-compensación de temperatura (véase apartado 3.3.4.1) o con procedimientos de compensación (véase apartado 7.1) [3-25, 3-26].

3.3.4.1 Bandas autocompensadas térmicamente

Es posible influir sobre la banda extensométrica mediante ciertos procesos de fabricación de manera que la respuesta a la temperatura se minimice para un cierto rango de temperaturas. Para ello se aprovecha la posibilidad cambiar el coeficiente de temperatura de la resistencia eléctrica del material de la rejilla. Este resultado se puede obtener añadiendo elementos de aleación correctivos al constantán (empleada mayoritariamente) o a través de un tratamiento térmico. La figura 3.3-9 muestra que se pueden obtener valores tanto positivos como negativos.

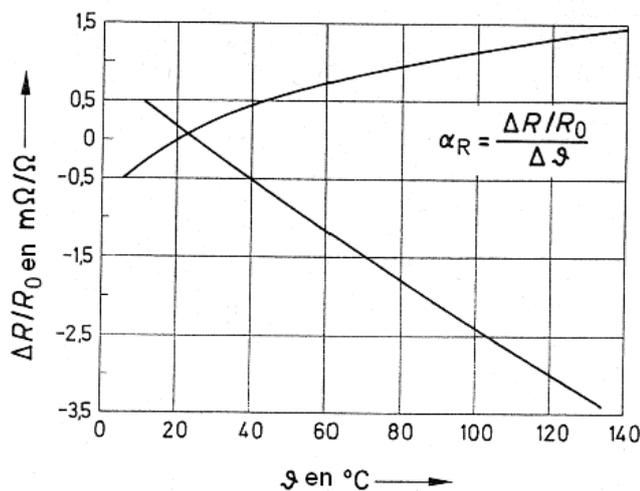


Figura 3.3-9: Los coeficientes de temperatura α_R para distintas composiciones de constantán

α_R debe ajustarse de manera que

$$\alpha_R = (\alpha_M - \alpha_B) k \quad (3.3-6)$$

La términos no lineales ignorados en esta ecuación impiden una compensación completa. La figura 3.3.10 muestra hasta que punto se alcanza la misma (si se compara la escala de ordenadas con la de la figura 3.3.8).

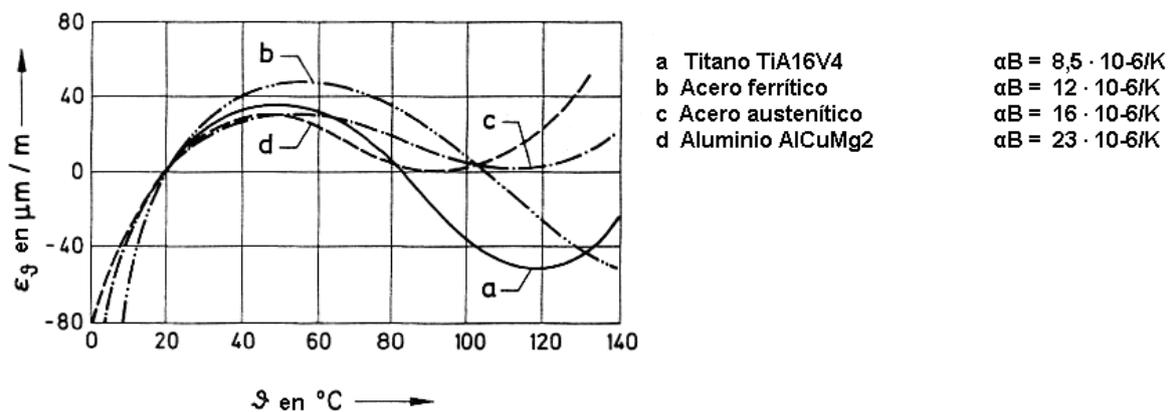


Figura 3.3-10: Respuestas residuales a la temperatura residuales para bandas autocompensadas térmicamente con ajuste óptimo a los coeficientes de dilatación térmica de varios materiales entre 10 y 130°C

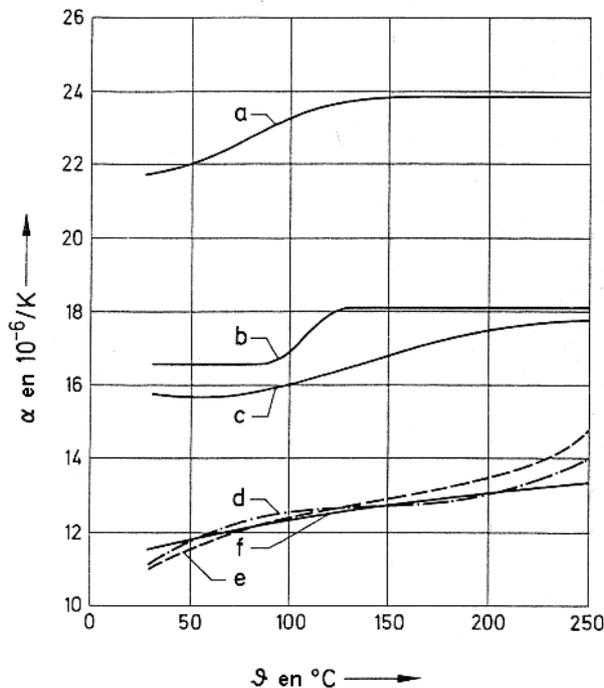
Las bandas de este tipo se denominan bandas extensométricas con coeficiente de temperatura ajustado bandas autocompensadas térmicamente. Las curvas con la respuesta a la temperatura tal y como muestra la figura 3.3-10 se incluyen en la hoja de características de las bandas. Sólo son validas si el material del componente tiene las mismas características de dilatación térmica que la muestra de material a partir de la cual se mide la curva. Esta condición no se cumple en todos los casos como muestra la figura 3.3-11. El diagrama contiene coeficientes de dilatación térmica diferenciales para distintos materiales; esto es el valor de la pendiente de la curva de dilatación en cada punto. Se puede observar como incluso el tratamiento del material, por ejemplo si este fue laminado o recocido, produce cambios. La curva para X5CrNi18 9 laminado muestra una anomalía, que puede explicarse por el efecto de las tensiones residuales en la muestra ensayada. Ocasionalmente se observan también condiciones anisotrópicas.

Una banda autocompensada térmicamente obviamente no puede compensar este tipo de anomalías. Las desviaciones de las características de temperatura del material del componente respecto a las curvas de temperatura adjuntas a la banda no se deben atribuir a la misma. Es posible compensar el error restante empleando los métodos descritos en el apartado 7.1. En este contexto resulta relevante la cita siguiente de [3-27]:

„Es imprescindible saber que el coeficiente de expansión de un material depende de :

1. su composición,
2. el tratamiento térmico;
- 3 el historial de deformaciones en frío;
4. el nivel de temperatura,
5. el historial de variaciones de temperatura;
6. el tiempo transcurrido a temperatura elevada.

Por lo tanto es posible que un material exhiba tres coeficientes de dilatación térmica distintos como resultado de tres tratamientos térmicos distintos aunque estos tratamientos obtengan características de resistencia comparables. Además los coeficientes de dilatación térmica pueden variar diferencialmente con la temperatura en los tres casos . En la mayoría de casos es posible fabricar bandas extensométricas que se adapten al coeficiente de dilatación térmica de un material estructural en concreto para un rango de temperaturas específico suponiendo que las características de dilatación térmica del material se pueden repetir en cada ensayo y en cada ciclo de temperatura. La mayoría de bandas extensométricas son más repetibles y estables en este aspecto que los materiales sobre los que se realizan las mediciones de deformación.”



- a Aleación de aluminio AlCuMg2
- b Acero austenítico X5CrNi18 9 laminado
- c Acero austenítico X5CrNi18 9 recocido
- d Acero de herramientas 50CrV4 laminado
- e Acero de herramientas 50CrV4 recocido
- f Acero de construcción St37

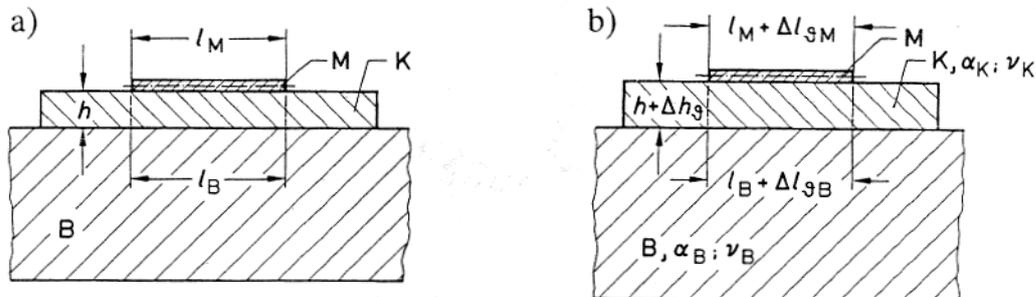
Figura 3.3-11: La dependencia de la temperatura para varios coeficientes lineales de dilatación térmica

La adaptación de las bandas extensométricas de autocompensación de temperatura a la dilatación térmica del material del componente es óptima para superficies planas; existen desviaciones en superficies curvadas con un radio de curvatura pequeño.

Se deben cumplir los requisitos siguientes para la correcta aplicación de las bandas extensométricas:

Si la superficie de aplicación es plana, la banda sigue la dilatación térmica del componente, es decir, la deformación de la banda y la del componente son idénticas; la ecuación 3.3.5 describe esta situación y la figura 3.3.12 muestra las condiciones de manera exagerada por claridad.

Para simplificar se asume que el soporte de la rejilla y el adhesivo son un solo material.



- B componente
- M rejilla de medición
- K capa intermedia formada por el soporte de la rejilla y el adhesivo
- h grosor de la capa K

Figura 3.3-12: Influencia de un cambio de temperatura sobre la fijación de una banda extensométrica aplicada sobre una superficie plana

a) Condición inicial a la temperatura ϑ_0

b) Condición a la temperatura $\vartheta_0 + \Delta\vartheta$

La longitud original del componente l_B varía en $\Delta l_{\vartheta B}$ a causa de la variación de la temperatura $\Delta\vartheta$. La banda irremediablemente sufre exactamente la misma variación de su longitud. La longitud de la rejilla de medición l_M que era igual a la sección l_B del componente considerado varía $\Delta l_{\vartheta M}$. Por lo tanto:

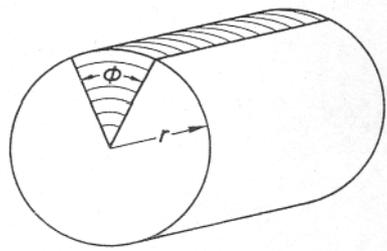
Si $l_B = l_M$ se tiene $\Delta l_{\vartheta B} = \Delta l_{\vartheta M}$

Por consiguiente las deformaciones también son iguales:

$$\frac{\Delta l_{\vartheta B}}{l_B} = \varepsilon_{\vartheta B}; \quad \frac{\Delta l_{\vartheta M}}{l_M} = \varepsilon_{\vartheta M}; \quad \varepsilon_{\vartheta B} = \varepsilon_{\vartheta M}.$$

El aumento del grosor h en Δh_{ϑ} no influye sobre el estado de deformación ya que una banda aplicada correctamente sobre una superficie plana sigue las deformaciones longitudinales.

A continuación se examinarán estas relaciones en una superficie curvada. Para ello consideramos una sección de un rodillo, véase la figura 3.3-13.



φ ángulo del arco
r radio del rodillo

Figura: 3.3-13: Sección del rodillo

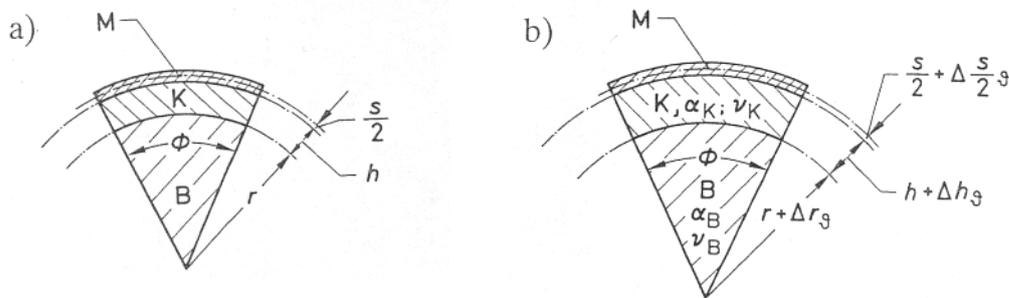
La dilatación térmica en la dirección axial a lo largo de una capa superficial es la misma que para una sección plana, $\epsilon_{vB} = \alpha_B \cdot \Delta\vartheta$.

En dirección circunferencial la dilatación térmica es:

$$\epsilon_{\vartheta B} = \frac{r\phi\alpha_B\Delta\vartheta}{r\phi} = \alpha_B\Delta\vartheta.$$

Tal y como se esperaba la dilatación térmica es la misma que para una superficie plana.

La figura 3.3-14 muestra la sección transversal del rodillo incluyendo la capas de fijación de la banda; el grosor de las capas se muestra de manera exagerada por claridad.



s grosor de la rejilla de medición
K, B, M, h véase la figura 3.3-12

Figura 3.3.-14: Sección del rodillo con una banda aplicada sobre su superficie

- a) Condicion inicial a la temperatura V_0
- b) Condicion a la temperatura $V_0 + \Delta V$.

Las capas K y M tienen el mismo significado que para la pieza plana (véase la figura 3.3-12). Ante un calentamiento las secciones r , h y s no se expanden con la misma relación que el material del componente debido a los distintos coeficientes de dilatación térmica. Además hay una variación adicional superpuesta del grosor de las capas K y M debido a la constricción de Poisson. Por lo tanto la dilatación térmica de la rejilla de medición ϵ_{vM} sobre la superficie curvada es distinta que para la superficie plana.

La expansión térmica de la rejilla de medición en la región de su plano neutro, es decir en la línea $s/2$ se describe mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{\vartheta M} = \frac{\{r \alpha_B + h [\alpha_K + 2 \nu_K (\alpha_K - \alpha_B)]\} + s/2 [\alpha_M + 2 \nu_M (\alpha_M - \alpha_B)]}{r + h + s/2} \Delta \vartheta. \quad (3.3-8)$$

Mientras que las deformaciones ε_{ν_B} y ε_{ν_M} eran iguales para la placa plana, aquí hay una diferencia. Por eso las respuestas a la temperatura de los puntos de medición son distintas. Se han calculado dos ejemplos para ilustrar la variación de la respuesta a la temperatura.

Ejemplo 1:

- r = radio del eje: 5 mm
- h = grosor del adhesivo mas el soporte de la rejilla: 100 μm
- s = grosor de la rejilla: 5 μm
- α_B = coeficiente de dilatación térmica del componente: $12 \cdot 10^{-6}/\text{K}$
- α_K = coeficiente de dilatación térmica del adhesivo: $70 \cdot 10^{-6}/\text{K}$
- α_M = coeficiente de dilatación térmica del material de la rejilla: $15 \cdot 10^{-6}/\text{K}$
- ν_K = coeficiente de Poisson para el adhesivo y el soporte de la rejilla: 0,4
- ν_M = coeficiente de Poisson para el material de la rejilla: 0,3

Resultado: $\varepsilon_{\vartheta M} = 14,05 \cdot 10^{-6}/\text{K}$

Frente a $\varepsilon_{\vartheta B} = 12,00 \cdot 10^{-6}/\text{K}$

Diferencia $\varepsilon^* (\vartheta) = +2,05 \cdot 10^{-6}/\text{K}$

Ejemplo 2:

Para un radio de $r = 10$ mm (el resto de datos se mantiene igual)

$$\varepsilon_{\vartheta M} = 13,04 \cdot 10^{-6}/\text{K}.$$

La diferencia $\varepsilon^* (\vartheta)$ es solamente $+ 1,04 \cdot 10^{-6}/\text{K}$.

Conclusiones:

- La respuesta a la temperatura de los puntos de medición depende del contorno de la superficie. Aquellas aplicaciones donde la rejilla de medición se curva en su dirección activa (cuando sigue la curva tangencialmente) muestran respuestas a la temperatura diferentes de las aplicaciones donde la rejilla se mantiene plana.
- La diferencia entre las dos condiciones disminuye con el incremento del radio de curvatura.

- La influencia de la curvatura disminuye si la dilatación térmica del material del componente es similar a la del soporte de la rejilla y el adhesivo.
- El signo de la variación de la respuesta a la temperatura para una superficie cóncava es opuesto al de una superficie convexa.
- Para componentes metálicos la variación de la respuesta a la temperatura aumenta con el grosor del adhesivo.
- Las bandas con autocompensación térmica están diseñadas para ser fijadas sobre superficies planas. El efecto de compensación efectivo se reduce en superficies curvadas.
- El efecto de compensación de temperatura del puente de Wheatstone también se reduce si la banda “activa” y la banda de “compensación” se aplican sobre superficies con distintos contornos.

Por lo tanto los errores de medición sólo pueden ocurrir si la temperatura del objeto a medir varía durante la medición.

Puede que los errores debidos a la respuesta a la temperatura explicados anteriormente sean insignificantes para el análisis experimental de tensiones, pero no lo son para la fabricación de transductores donde se requiere una alta precisión de medición. Si la causa del error es conocida se puede encontrar una solución. En la práctica hay dos métodos fundamentales a tener en cuenta :

- Proveer la superficie del cilindro con pequeñas secciones planas en las zonas de aplicación de la banda para corregir efectos erróneos, una medida fácilmente adoptable para la fabricación de transductores.
- Aplicar la capa de pegamento lo más fina posible.

3.3.4.2 La deriva térmica

La deriva térmica es causada principalmente por cambios microestructurales del material y la oxidación o corrosión de la rejilla de medición, o bien por la liberación de tensiones en la banda o en el adhesivo a causa de influencias térmicas. La deriva térmica depende de la temperatura y del tiempo, y provoca variaciones irreversibles del punto cero en la banda extensométrica.

Los elementos de la aleación, así como el estado de tratamiento mecánico y térmico de la rejilla contribuyen esencialmente a la deriva térmica. Los materiales de rejilla laminados o estirados en frío presentan una deriva más acentuada que se nota a temperaturas relativamente bajas (p.ej. 100 °C), mientras que las aleaciones con un templado blando derivan menos. Igual que para la respuesta a temperatura, el historial mecánico de la banda afecta las características de deriva. Un material con un templado blando se puede deformar por tensiones hasta llegar a la deformación plástica cargas dinámicas o por laminado en frío cambiando así sus características.

La deformación plástica puede ocurrir en ciertas ocasiones a causa de las distintas dilataciones térmicas en la rejilla y el componente. Así mismo un manejo inadecuado de la banda durante su aplicación puede contribuir a ello.

Los adhesivos también contribuyen a la deriva térmica. Por eso es posible que dos bandas del mismo tipo exhiban distintas propiedades de deriva, dependiendo de si son fijadas con adhesivos de fraguado en frío o de fraguado en caliente.

A altas temperaturas los efectos metalúrgicos influyen de forma considerable sobre las características de deriva de las bandas extensométricas. En [3-23] se describe este fenómeno detalladamente.

La deriva térmica únicamente produce errores en mediciones con referencia al punto cero. Este error se puede eliminar por los efectos compensadores del puente de Wheatstone empleando circuitos de medio puente o de puente completo y también con puentes de cuarto o de dos cuartos si se emplean bandas de compensación. Para ello se deben cumplir los mismos requisitos que para la compensación de la respuesta a la temperatura, véase el apartado 7.1. La efectividad de la compensación será, sin embargo, menor que para la respuesta a la temperatura debido a las amplias variaciones entre las distintas muestras.

3.3.5 La dependencia con la temperatura de la sensibilidad de la banda (del factor de banda)

La sensibilidad de una banda se expresa mediante el factor de banda k (véase apartado 3.3.1). El factor de banda indicado en el paquete es válido a temperatura ambiente. Varía con la temperatura dependiendo del material empleado para la rejilla de medición. La figura 3.3-15 muestra las variaciones relativas del factor de banda k en relación con la temperatura para cuatro aleaciones de rejilla comunes.

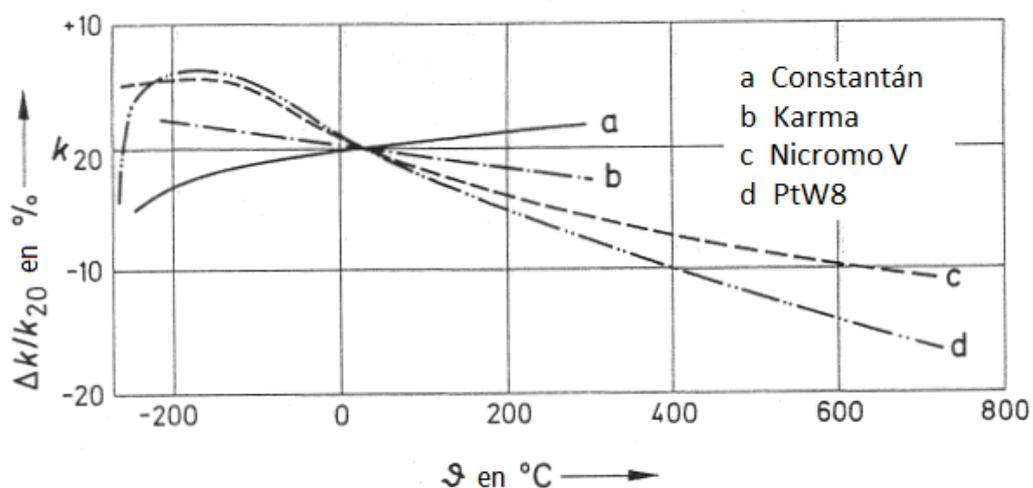


Figura 3.3-15: La dependencia de la temperatura del factor de banda k para cuatro aleaciones de rejilla comunes

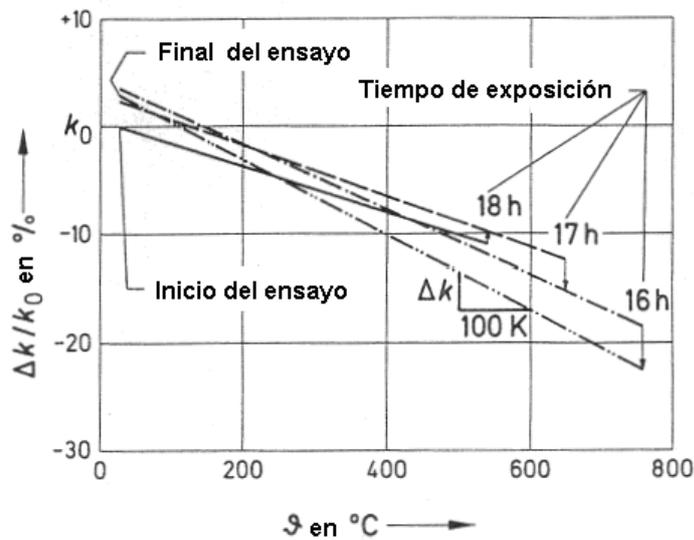


Figura 3.3-16: La dependencia del factor de banda k de la temperatura y del tiempo de exposición para bandas de Platino-Wolframio (PtW8)

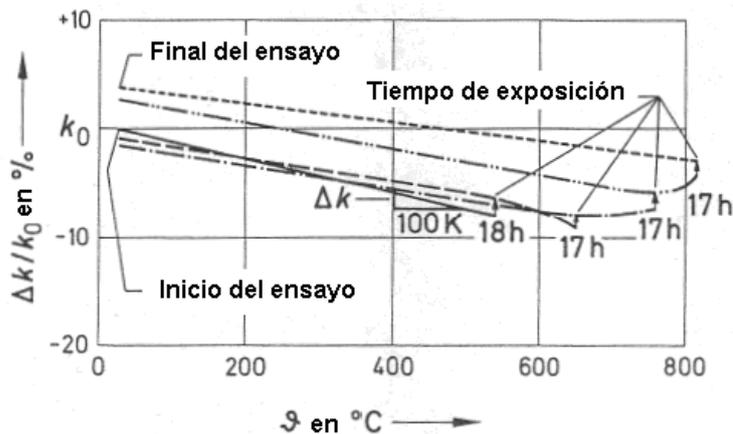


Figura 3.3-17: La dependencia del factor de banda k de la temperatura y del tiempo de exposición para bandas de Nicromo-V

La hoja de datos incluida en cada paquete de bandas contiene indicaciones acerca de la dependencia con la temperatura del factor de banda. Para las aleaciones de alta temperatura Platino-Wolframio y Nicromo V se observa una variación adicional del factor de banda k en relación con el nivel de temperatura y el tiempo de exposición, tal y como se ve en las figuras 3.3-16 y 3.3-17.

3.3.6 El alargamiento estático

El uso de bandas extensométricas está restringido generalmente a deformaciones en el rango $\leq \pm 3000 \mu\text{m/m}$. Sin embargo, estos límites se amplían notablemente para mediciones sobre materiales sintéticos o para la investigación en la región de deformación plástica de metales. Se plantea la cuestión de hasta que punto se pueden medir grandes deformaciones con bandas extensométricas.

En este contexto es quizá relevante considerar el comportamiento de las bandas extensométricas ante grandes deformaciones, véase también [3-28, 3-29].

El alargamiento máximo de una banda extensométrica depende de su construcción y de los materiales que la componen. Hay series de bandas con un alargamiento máximo de ± 2 cm/m, mientras que otras aceptan deformaciones de hasta ± 20 cm/m ($1 \text{ cm/m} = 10000 \mu\text{m/m}$). Para más detalles consúltense las hojas de datos. Según las indicaciones de [2-1] estos datos son válidos para bandas con una longitud de rejilla de 6mm. La experiencia muestra que una banda larga soporta mejor las grandes deformaciones que una corta.

A causa de las enormes deformaciones plásticas el material de la rejilla se endurece y pierde sus propiedades dúctiles originales. Por eso resulta imposible o casi imposible realizar mediciones repetidas, a no ser que no se haya superado el alargamiento máximo de la banda. No se conocen investigaciones sobre la repetibilidad de grandes deformaciones empleando únicamente una parte de la elongación posible de la banda. Su realización sería difícil con el aparato descrito en [2-1] porque no se podría obtener ninguna conclusión fiable respecto a la repetibilidad de la deformación superficial de la barra plásticamente deformada.

El uso de bandas para grandes deformaciones en mediciones sobre caucho o materiales similares no es práctico y es prácticamente imposible, no solo por irreproducibilidad la elongación sino también por que en los materiales blandos restringen la elongación. Para estos casos serian más adecuados otros aparatos con una fuerza de restricción menor. Aparte de los transductores habituales adecuados para este propósito, en [3-30] se describe la instrumentación auxiliar necesaria para la medición de deformaciones sobre caucho empleando bandas extensométricas.

Para grandes deformaciones tanto la banda como el puente de Wheatstone (véase apartado 5.2) presentan un comportamiento no lineal que no se puede ignorar. Mientras que el comportamiento no lineal del puente de Wheatstone está adecuadamente documentado en la literatura, no hay información sobre las características no lineales de las bandas extensométricas en la región de grandes deformaciones. En ocasiones el único error considerado es el error de linealidad del „cuarto de puente“, el circuito más utilizado para grandes deformaciones. Una investigación realizada en la región entre $\pm 15 \text{ cm/m} = \pm 150000 \mu\text{m/m}$ según las directrices de [2-1] reveló que la curva característica de una banda metálica con rejilla de constantán está curvada, véase la figura 3.3-18. En el gráfico se muestra la deformación real ϵ en la abscisa y el valor ϵ^* en la ordenada, calculado a partir de la medición de la resistencia según la ecuación (3.3-9).

$$\epsilon^* = \frac{\Delta R/R_0}{k} \quad (3.3-9)$$

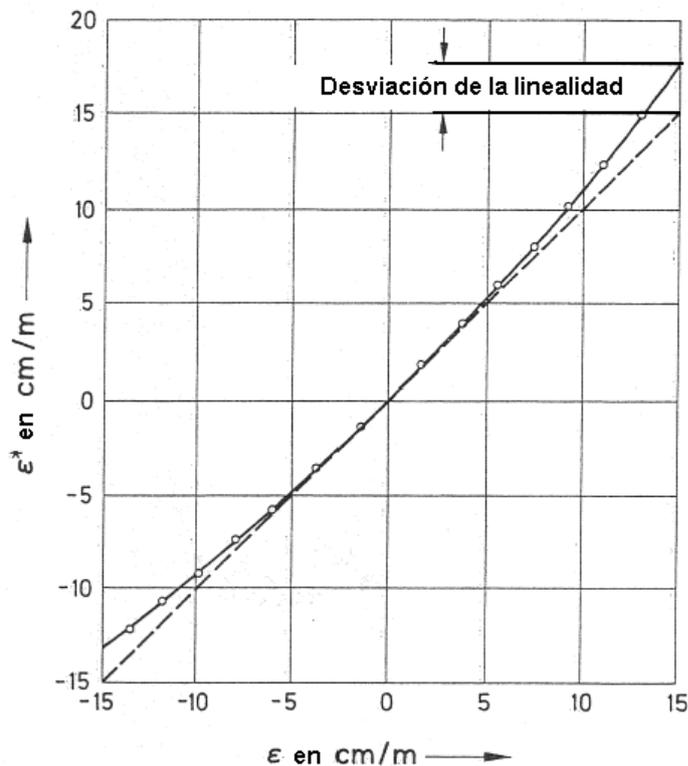


Figura 3.3-18: Valor de medición ϵ^* en función de la deformación real ϵ para una banda con grandes deformaciones

La distancia sobre la ordenada entre la curva y la tangente discontinua de pendiente $\epsilon^* = \epsilon$ señala la desviación de la linealidad de la banda.

Los resultados presentados aquí sólo son estrictamente válidos para el tipo de banda investigado debido a posibles efectos de borde. No obstante, se puede asumir que otras bandas con rejillas de medición de distintas formas o incluso distintas aleaciones presentan un comportamiento similar, siempre y cuando éstas sean adecuadas para medir grandes deformaciones.

Aquí se debería mencionar que las desviaciones de la linealidad de la banda extensométrica y las del circuito de cuarto de puente se compensan mutuamente en su mayoría (véase apartado 5.2 y [3-29]).

Los cambios microestructurales de la rejilla que acompañan la deformación plástica alteran el coeficiente de temperatura de la resistencia eléctrica. Por este motivo no se pueden fabricar bandas para grandes deformaciones con autocompensación de temperatura. Otras bandas con autocompensación pierden esta cualidad cuando sufren una gran deformación plástica. Para las bandas de constantán como material de la rejilla el cambio se produce en la dirección de una respuesta de temperatura positiva.

El alargamiento máximo de una banda extensométrica sólo se puede obtener con una fijación adecuada. Para ello se exige que el adhesivo presente la suficiente elasticidad y fuerza de fijación así como una aplicación impecable de la banda.

En el apartado 4.1 se tratan los requisitos y condiciones que debe cumplir el adhesivo.

3.3.7 Medición de la deformación dinámica

Las bandas extensométricas son excelentes para la medición de procesos dinámicos de deformación. Debido a su peso despreciable no se produce ningún efecto perceptible en las características vibratorias del objeto ensayado. Respecto a la banda, hay diversos puntos que se deben tener en cuenta :

- Sus características de fatiga y a vibración permanente.
- La frecuencia más alta que se puede medir fiablemente con bandas extensométricas.

En este caso el medio de fijación tienen una escasa influencia. Sin embargo no se debe pasar por alto que bajo ciertas circunstancias la soldadura por puntos puede modificar las características vibratorias del objeto medido. En cambio, las fijaciones mediante adhesivos a altas frecuencias presentan un descenso del límite superior con el aumento de la temperatura. La causa está relacionada con la reducción del módulo de elasticidad del adhesivo y también del soporte de la banda, produciendo un efecto negativo sobre la tasa de transferencia. Por otro lado el límite superior de frecuencia medible mediante bandas extensométricas es tan alto que sólo puede alcanzarse e investigarse empleando aparatos especiales [3-31, 3-32]. En condiciones normales, incluyendo las cargas de choque, las frecuencias de la vibración a medir permanecerán muy por debajo de este límite.

3.3.7.1 Características a vibración permanente

Si una banda extensométrica se ve expuesta a una carga dinámica permanente pueden surgir irregularidades en la indicación de la deformación dependiendo de la amplitud y la variación de la carga. Estas irregularidades se deben a problemas con la rejilla de medición o con las conexiones.

El material del soporte y el adhesivo suelen tener una resistencia a la fatiga tan grande que no son sensibles al daño.

En las bandas con rejilla metálica la fatiga del material ocurre como resultado de la carga de vibración permanente que se presenta de dos maneras:

- Dependiendo de la amplitud y la variación de la carga aumenta la resistencia eléctrica que se presenta como deriva dinámica del punto cero.
- Con el aumento del daño del material, ocurren grietas microscópicas en los bordes de grano del metal de la rejilla que se propagan lentamente hasta llegar a la fractura permanente.

En [3-33] se describe un método para determinar las características a vibración permanente de una banda extensométrica; [2-1] emplea este mismo procedimiento. Los gráficos con las características a vibración permanente de la figura 3.3-19a hasta c han sido obtenidos con este método. Las líneas continuas indican la deriva del cero en $\mu\text{m}/\text{m}$ que surge de la combinación entre la amplitud de la deformación oscilatoria ε_w y el número de ciclos de carga n , correspondiente a los valores señalados. Las líneas discontinuas indican la fractura permanente de la rejilla (M) o las conexiones (Z). En el gráfico 3.3-19b se indica además una curva de fatiga (M) para una deformación media ε_m positiva superpuesta a la deformación oscilatoria. La prueba se realizó hasta llegar a un máximo de ciclos de carga $n = 10^7$.

El diagrama 3.3-19c difiere sustancialmente de los restantes. El texto de la publicación dice: „Una variación de la deformación del punto cero de $10 \cdot 10^{-6}$ solo ocurre aplicando cargas muy grandes. En la prueba ejecutada y para las cargas investigadas no se alcanzó una variación del cero de $30 \cdot 10^{-6}$ o mayor en ningún caso.“ Las investigaciones propias del autor confirman un buen comportamiento a vibración permanente de este tipo de banda hasta una amplitud de la deformación oscilatoria de $\pm 3000\mu\text{m}/\text{m}$. Para ello se empleó un material de rejilla con un límite de elasticidad superior al habitual. Desafortunadamente el límite de elasticidad del material de la rejilla no se puede aumentar ilimitadamente. Por eso solo es posible realizar ensayos continuos con grandes amplitudes empleando equipos auxiliares para la reducción de la deformación tal y como se describen en [3-30] o con transductores como el que muestra la figura 3.3-33.

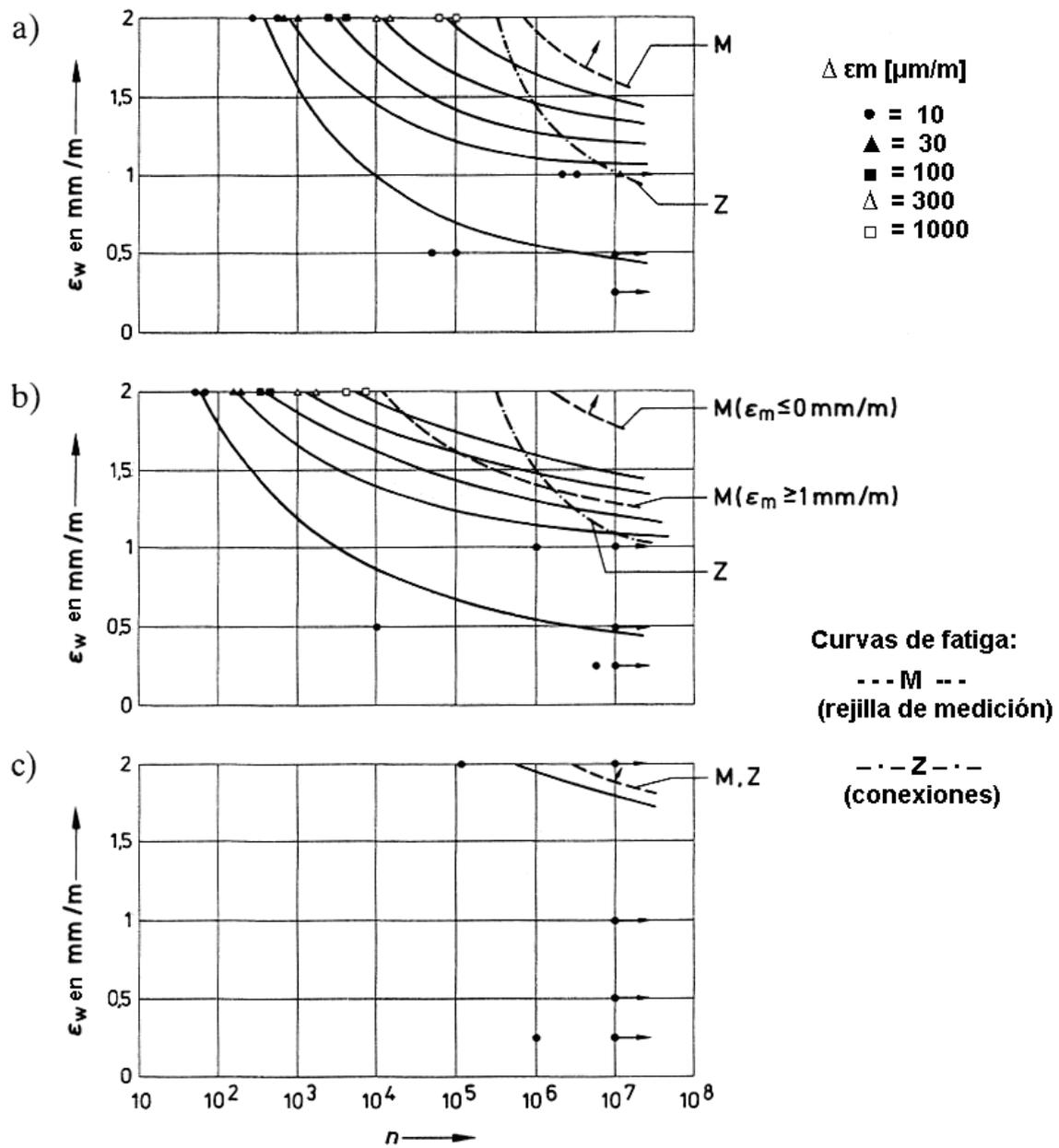
Además hay una dependencia mutua entre las características de vibración permanente y la deformación estática máxima. La deformación estática máxima de una banda con alta resistencia a la vibración llega a unos 1 ... 2 cm/m (10000 ... 20000 $\mu\text{m}/\text{m}$), mientras que las bandas que soportan grandes deformaciones no presentan unas buenas características a vibración permanente.

El material para rejillas de medición llamado „Isoelastic“, de procedencia americana, destaca por su buen comportamiento ante vibración permanente pero a la vez por su elevada respuesta a la temperatura. Además reacciona fuertemente a los campos magnéticos. Según le consta al autor los fabricantes de bandas extensométricas europeos no lo emplean.

La figura 3.3-20 muestra buenos resultados para bandas en lamina, en este caso para un rango extenso de deformación oscilatoria de hasta $\pm 3000\mu\text{m}/\text{m}$. Se puede interpretar como un comportamiento típico para bandas de alta calidad. La siguiente afirmación es generalmente válida:

La resistencia a fatiga es máxima en la región negativa, menor en la región intermedia y mínima en la región positiva. Las bandas con una rejilla larga muestran una resistencia a fatiga un poco mejor que las bandas cortas.

Un consejo práctico: Si se debe realizar una medición en la región positiva y las circunstancias lo permiten, se aplicará la banda después de someter al objeto ensayado a la mitad de la carga máxima. De esta manera la banda experimentará una deformación oscilatoria con una amplitud equivalente a la mitad de la carga máxima.



Una flecha simboliza que el efecto pertinente aun no ha ocurrido para este número de ciclos de carga.

Figura 3.3-19: Curvas para vibración permanente de varios tipos de banda extensométrica con rejilla de hilo (de [3-33]) *

a) HBM-tipo 20/600 FB1

b) HBM-tipo 20/600 FB3

c) HBM-tipo 20/120 FB4S

*) eliminada del programa de HBM

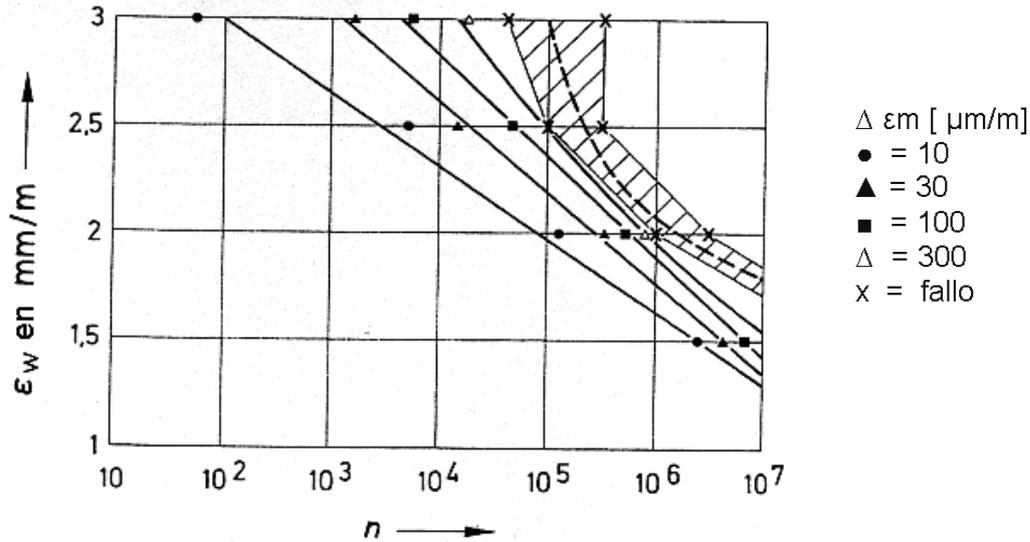


Figura 3.3-20: Curvas de vibración permanente para bandas en lámina
 La deriva del cero en función de la amplitud de la oscilación de la deformación, ϵ_w y el número de ciclos de carga n .

Finalmente es importante mencionar que es más probable que los problemas ocurran en los cables y conexiones que lleva a la banda que en la misma banda. Las experiencias practica así lo confirma. Por eso se emplean materiales para los cables altamente flexibles y los cables se llevan por rutas lo más libres de tensión posibles.

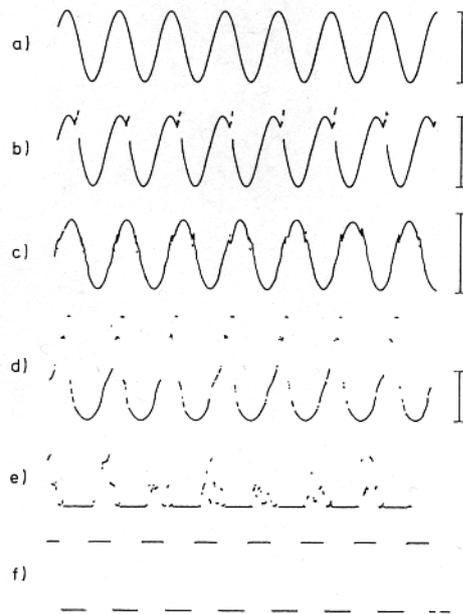


Figura 3.3-21: Diagramas con oscilaciones típicas tras la aplicación de cargas oscilantes
 (según [3-33]).
 Las marcas de calibrado en la parte derecha del diagrama muestran una amplitud de onda de $4000 \mu\text{m}/\text{m}$ tal y como la indicaría por una banda no dañada.

En el osciloscopio se puede observar claramente el comienzo de la fractura permanente de la banda. Las pequeñas grietas iniciales en la rejilla se reconocen como picos en la señal de oscilación positiva y pueden extenderse hasta llegar a ser un “campo de espigas” a medida que propaga la grieta. Una vez se ha completado la fractura el conductor únicamente funciona como un interruptor, véase la figura 3.3-21.

En el caso de las bandas semiconductoras la “rejilla” de silicio monocristalino posee una resistencia a la vibración ideal a lo largo de toda la región de deformación de unos $\pm 5000 \mu\text{m/m}$. Desafortunadamente esto no es así para las conexiones, véase la figura 1.0-9.

Es improbable encontrar grietas en el adhesivo o en el soporte como resultado de una carga dinámica continua debido a la alta resistencia a las cargas alternantes de los materiales en cuestión.

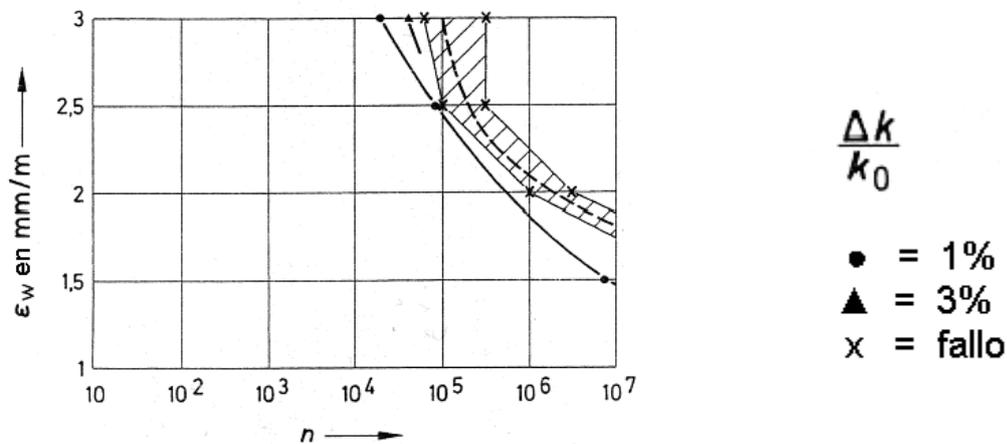


Figura 3.3-22: Variación del factor de banda k después de aplicar una carga alternante en función de la amplitud de la deformación ϵ_w y del número de ciclos de carga n

Además de las variaciones de carga obtenidas en los ensayos de vibración permanente y de la deriva de punto cero que las acompaña interesa saber cual es la influencia sobre la sensibilidad de la banda, es decir sobre el factor de banda k . En el diagrama de la figura 3.3-22 se puede observar como un incremento del factor de banda en un 1% es el primer síntoma de un fallo inminente. Las diferencias de sensibilidad obtenidas anteriormente están dentro de los límites de error de la instrumentación de medida.

3.3.7.2 La frecuencia de corte

Los trabajos realizados por Oi [3-31] y Bagaria/ Sharpe [3-32] son útiles para evaluar la capacidad de las bandas extensométricas para registrar procesos dinámicos de deformación. Oi estudió la variación brusca de la deformación que ocurría al fracturar una barra de acero endurecida con entalla. Bagaria y Sharpe investigaron la repetición de una onda de choque producida por un péndulo de impacto al golpear el martillo la base de una barra de acero.

Las superficies de contacto eran planas con una tolerancia de 325 nm y tenían una rugosidad entre 76 y 127 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Estos valores son de interés ya que reflejan el enorme esfuerzo necesario para acercarse lo máximo posible a obtener un salto rectangular. También mencionar que estas condiciones nunca ocurren en las tareas habituales de medición. Esto quedará claro tras la descripción de un experimento.

Los planteamientos expuestos a continuación son relevantes al considerar la capacidad de una banda extensométrica para registrar un salto rectangular:

La variación brusca de deformación recorre la longitud completa de la banda en el tiempo t . Debido a la promediación de la banda, la señal producida aumentará linealmente hasta el valor máximo a la velocidad de propagación del pulso de deformación dependiendo de la longitud de la rejilla de medición. La velocidad de propagación corresponde a la velocidad del sonido c . El periodo de tiempo t_{th} teóricamente requerido para alcanzar el valor de medición completo es igual a

$$t_{th} = \frac{l_{DMS}}{c}. \quad (3.3-10)$$

Debido a varias influencias, que no han sido completamente aclaradas, la señal registrada transcurre tal y como muestra la figura 3.3-23c.

Para la función escalón el tiempo de subida t_a se define como el periodo entre 10 % y 90 % del valor de medición.

Oi llegó a la ecuación

$$t_a = t_b + 0,8 \frac{l_{DMS}}{c}. \quad (3.3-11)$$

Donde el término t_b es un periodo de tiempo dependiente del banco de pruebas, Oi lo fija en $0,5\mu\text{s}$ y Bagaria/Sharpe lo reducen a $0,2\mu\text{s}$.

La relación entre la longitud de la banda l_{DMS} y la longitud de onda λ tiene un efecto importante sobre la precisión con la que se registran los procesos sinusoidales. Si suponemos que la longitud de la banda es igual a la longitud de onda de una onda estacionaria o de propagación sinusoidal la banda registra el valor cero como promedio de las partes positivas y negativas de la vibración, a pesar de que los valores de pico pueden ser bastante grandes. Por eso el objetivo es intentar minimizar la relación $l_{DMS} : \lambda$ para obtener resultados suficientemente precisos. En la figura 3.3-24 se supone de un proceso sinusoidal y se indica la relación porcentual entre el valor de pico de la deformación real y el valor indicado por la banda en función de la relación $l_{DMS} : \lambda$. El diagrama se calcula asumiendo que el centro de la banda está situado en el punto de máxima deformación.

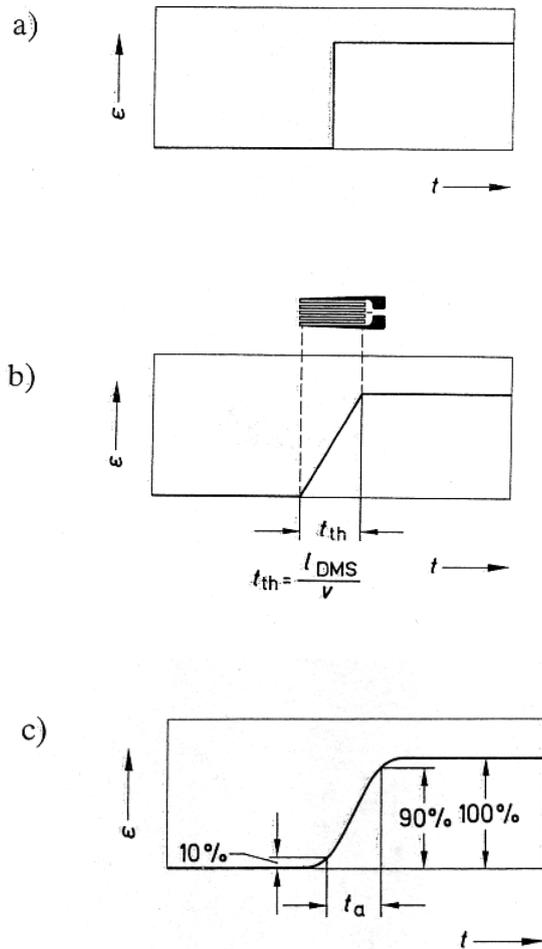


Figura 3.3-23: Registro de un salto de deformación en una banda extensométrica
 a) función escalón (ideal)
 b) señal teórica
 c) señal real

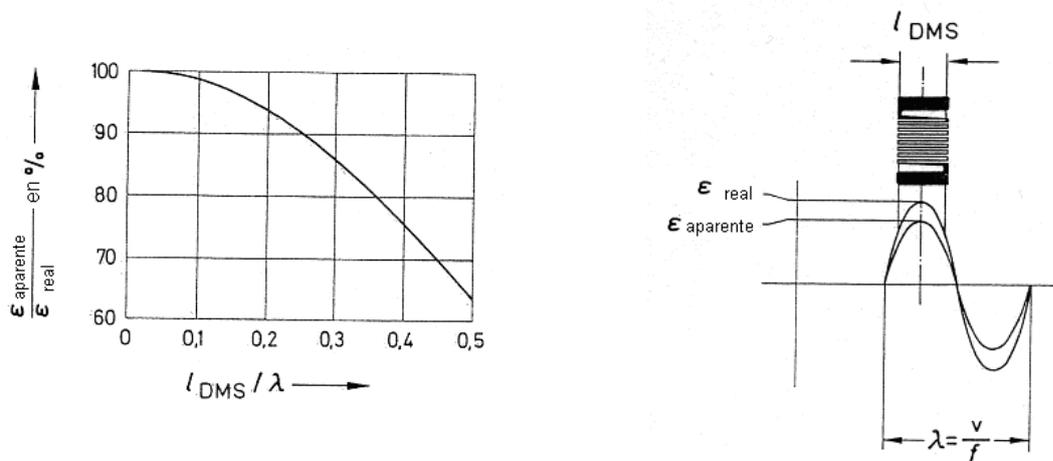


Figura 3.3-24: Reducción de la sensibilidad respecto a la relación $l_{DMS} : \lambda$ para un proceso sinusoidal cuando el centro de la rejilla está situado en el punto de deformación máxima

En [3-49] Bickle demuestra como se puede reducir notablemente la influencia del término $0,8 l/c$ en la ecuación (3.3-11) utilizando una técnica analítica de compensación. La validez del método ha sido probada experimentalmente. Un detonador produce una onda de choque en una barra de aluminio con un tiempo de subida de unos $10 \mu s$. La medición se realiza con varias bandas extensométricas de distintas longitudes. La señal de la banda más corta ($0,38 \text{ mm}$) se considera como „señal real”. La banda más larga hace 48 mm . Se demuestra que la señal desviada puede llegar a coincidir con la “señal real” empleando el cálculo de compensación.

Mientras que las investigaciones mencionadas tratan de encontrar los límites de la respuesta a un proceso dinámico de una banda extensométrica, el ejemplo siguiente tratará de reproducir un proceso más común.

Ejemplo:

Se aplican dos bandas extensométricas una enfrente de la otra opuestas diametralmente a 1565 mm de la superficie frontal de una barra de acero de 3050 mm con un diámetro de 20 mm . La longitud de las rejillas es de 6 mm y $1,5 \text{ mm}$ (figura 3.3-25). Las bandas se conectan cada una a un amplificador de tensión continua KWS 3020 C * mediante circuitos de cuarto de puente (véase apartado 5). El rango de frecuencias en los dos amplificadores se fija en 25 kHz (-1 dB).

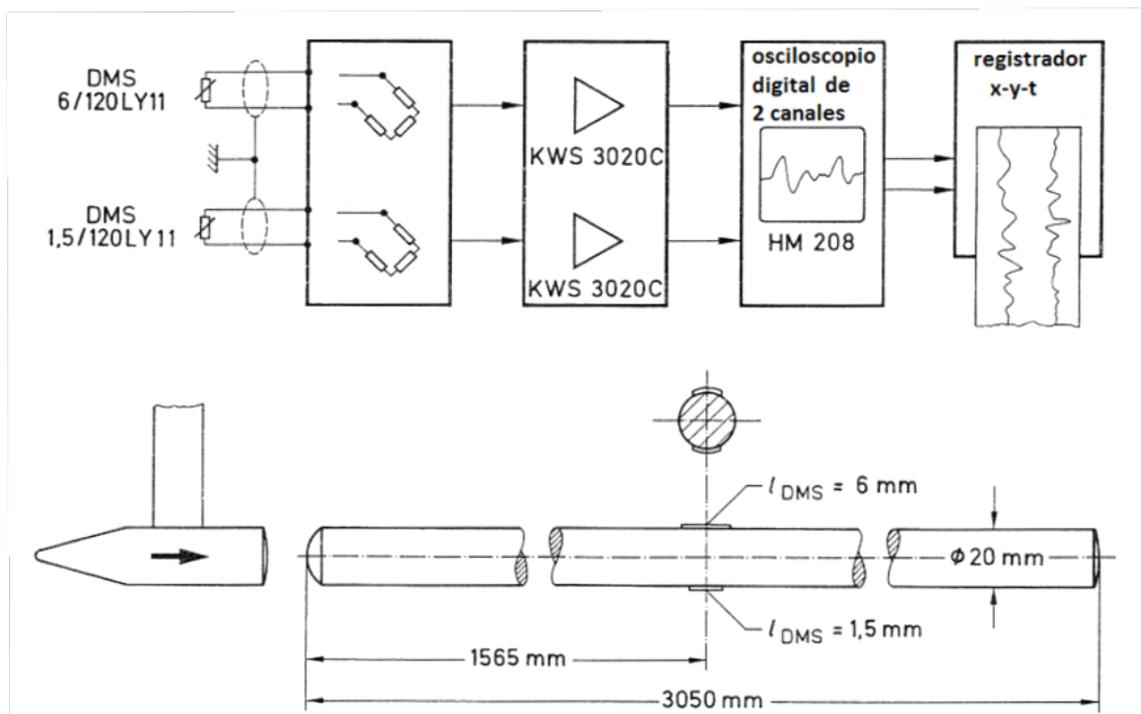


Figura 3.3-25: Configuración del experimento para una prueba de choque

*) Suprimido del programa de HBM

Las señales de salida de los amplificadores se conectan a un osciloscopio de memoria digital de dos canales con predisparo, y así se pueden observar en la pantalla y trazar simultáneamente con un registrador de dos canales. La figura 3.3-26 muestra las señales registradas:

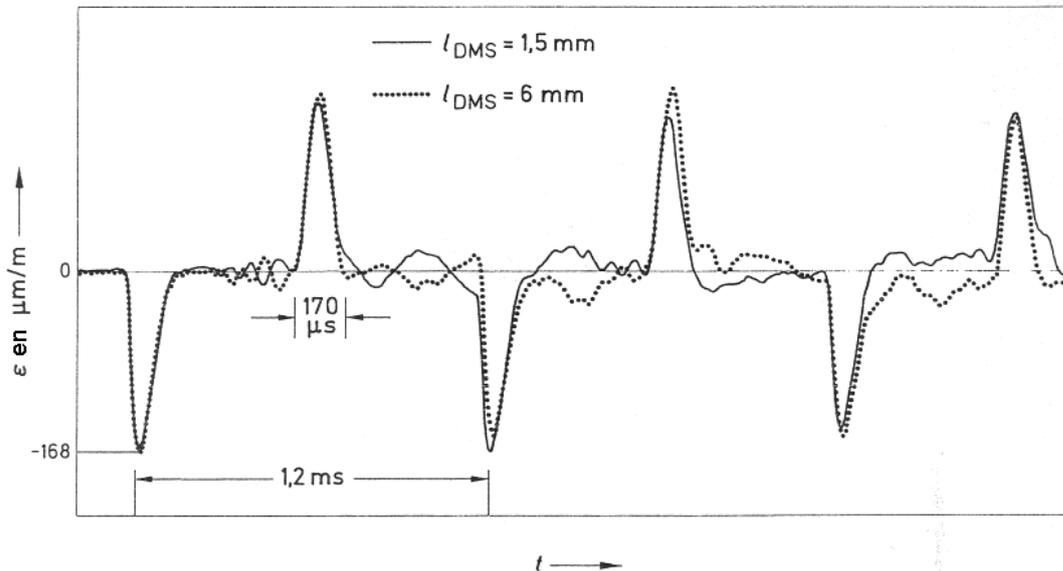


Figura 3.3-26: Registro de una prueba de choque sobre una barra de acero de unos 3m de longitud

Resultado:

La distancia entre los picos negativos de la señal corresponde a un periodo de tiempo de 1,2ms en ambas direcciones de propagación, es decir a un recorrido de $2 \times 3050 = 6100$ mm.

Los picos positivos indican la onda reflejada.

La señal de choque se aplica durante $170 \mu\text{s}$.

Las amplitudes de las señales son de $168 \mu\text{m/m}$.

Hay una vibración que transcurre en dirección opuesta y se superpone en los picos de la señal que puede ser interpretada como una vibración de flexión.

Evaluación:

A partir del periodo de tiempo de 1,2 ms para el recorrido en ambas direcciones de $2 \times 3050 = 6100$ mm se calcula la velocidad de propagación c igual a 5083 m/s; que es igual a la velocidad del sonido en acero.

La velocidad del sonido c en materiales solidos se calcula a partir del módulo de elasticidad E y de la densidad del material ρ según la siguiente relación:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.3-12)$$

$$c_{\text{acero}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{206 \cdot 10^9 \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^3}{\text{s}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}}}{7,8 \cdot 10^3}} = \sqrt{\frac{206 \cdot 10^6 \text{ m}^2}{7,8 \text{ s}^2}} = 5140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La diferencia entre la velocidad del sonido medida y la calculada es solamente un 0,7 %. Este valor se puede calificar como muy pequeño teniendo en cuenta que los valores empleados para E y ρ proceden de tablas y que la grabación tiene imprecisiones.

La longitud de la onda de choque se calcula a partir de la duración de la onda de choque $170 \mu\text{s}$ y de la velocidad del sonido c .

$$l = c \cdot t \quad (3.3-13)$$

$$= 5083 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 170 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 0,864 \text{ m.}$$

La amplitud de la deformación es de $\varepsilon = -168 \mu\text{m/m}$. Con la que se puede calcular la tensión del material

$$\sigma = \varepsilon E = -168 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{m}} \cdot 206000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = -34,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

y luego el impulso de la fuerza

$$F = \sigma A = -34,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 314 \text{ mm}^2 = -10864 \text{ N.}$$

Si la onda de choque registrada en la figura 3.3-26 se interpreta como media onda sinusoidal de longitud $\lambda/2 = 864 \text{ mm}$ y se compara con el error de la relación $l_{\text{DMS}} : \lambda$, tomado de la figura 3.3-24, se observa que no puede darse una diferencia perceptible entre la señal de la banda de 6mm y la de la banda de 1,5mm. Las diferencias presentes que ocurren de forma alterna en cada lado se pueden explicar como una vibración lateral superpuesta de la barra.

Conclusión:

Los procesos de choque que aproximan una forma de onda rectangular solo se pueden generar empleando una instrumentación muy sofisticada. En la práctica habitual los impulsos no son tan bruscos.

Las bandas comúnmente empleadas de 3mm y 6 mm superan los problemas que presentan las mediciones dinámicas sin dificultades. Es posible medir incluso vibraciones en la región ultrasónica con una precisión aceptable. En cualquier caso es importante prestar atención a la respuesta de frecuencia de los distintos aparatos involucrados en la medición.

3.3.8 Potencia eléctrica

Si se toma una banda con una rejilla de 6mm y una resistencia de 120 Ω , p.ej. el tipo 6/120 LY11 y se conecta en un circuito de puente simétrico alimentado por una tensión de 5 V, la corriente que circula por la banda es 20,8 mA. A primera vista no parece mucho, pero si se considera en relación con la sección transversal extremadamente pequeña de los elementos de la rejilla se obtiene un resultado para la densidad de corriente de 46A/mm², un valor muy alto incluso para la ingeniería eléctrica de potencia. Con pequeñas secciones transversales del conductor, solamente es posible disipar la energía calorífica hacia el ambiente si la relación entre el área de la sección transversal y el área de la superficie es favorable. Para que esto suceda es necesario equilibrar la energía transferida a la banda con la energía disipada de manera que el aumento de temperatura en la banda se mantenga dentro de ciertos límites razonables. Para ello se deben cumplir una serie de requisitos. Los parámetros de mayor influencia son:

- el nivel de la tensión de alimentación del puente,
- la resistencia eléctrica de la rejilla de medición,
- el tamaño y la geometría de la rejilla de medición,
- la temperatura del ambiente,
- la conductividad térmica del material del componente,
- la capacidad calorífica y las características de radiación y de enfriamiento del componente.

Si la potencia eléctrica aplicada sobre la rejilla es demasiado grande se producen efectos similares a los que se producen cuando la temperatura del ambiente es demasiado elevada como por ejemplo, el sobrecalentamiento de la rejilla, del soporte o de la capa adhesiva que produce histéresis, fluencia, inestabilidad del punto cero y un empeoramiento de la compensación de temperatura.

HBM indica la tensión máxima de alimentación del circuito en la hoja de datos de todos los tipos de banda extensométrica. Este valor sirve como orientación y es válido para una precisión media, un funcionamiento permanente a temperatura ambiente y para bandas aplicadas sobre objetos con buenas características de conductividad térmica. Ante una temperatura ambiente elevada, una mala conductividad térmica (capas adhesivas excesivamente gruesas) o un componente de capacidad calorífica reducida (objetos pequeños) es necesario reducir la tensión de alimentación del circuito.

Para las mediciones sobre componentes sintéticos [3-34] se debería reducir la tensión de alimentación aproximadamente al 10 % de los valores indicados. La alimentación por pulsos puede ser un método adecuado para evitar los problemas ocasionados por el autocalentamiento excesivo de las bandas extensométricas. Los equipos de conmutación modernos para la multimedida brindan ambas posibilidades, siendo la reducción de la tensión de alimentación la más efectiva porque la tensión de alimentación U y la potencia N tienen una relación cuadrática.

$$N = \frac{U^2}{R} \quad (3.3-14)$$

Durante el escaneado cíclico de puntos de medición o durante la alimentación por pulsos la potencia transferida a la banda depende de la duración del ciclo y de la frecuencia de repetición.

Para mediciones con gran exactitud y para la construcción de transductores se aconseja igualmente reducir la tensión de alimentación a la mitad del valor máximo indicado. Si resulta imposible reducir la tensión de alimentación del puente, p.ej. por limitaciones de la instrumentación puede resultar útil la elección de una banda con una mayor resistencia. Sin embargo la relación entre la potencia y la resistencia es lineal como muestra la ecuación (3.3-14).

En principio es posible reducir la tensión de alimentación mediante resistencias conectadas en serie pero siempre viene acompañado por una pérdida de la intensidad de la señal, véase el apartado 7.2. Además hay que contar con errores adicionales debidos a la dependencia de la temperatura o a la inestabilidad de las resistencias en serie.

3.3.9 La fluencia

Prácticamente todas las publicaciones sobre bandas extensométricas definen la fluencia como una propiedad negativa. Hace 30 años esta impresión era muy acertada, pero hoy en día es necesario corregirla. Para realizar mediciones precisas es esencial que haya cierta fluencia. Los métodos modernos de producción de bandas en láminas son capaces de ajustar la fluencia a la aplicación. Sin esta técnica sería imposible p.ej. cumplir con los requisitos de precisión extrema para las células de carga de calibrado oficial.

¿Qué es lo que se entiende por fluencia?

Si una banda es expuesta a una deformación estática, presenta una variación temporal de su resistencia a pesar de la deformación constante de la pieza. Esta variación en la señal de medición de una banda estirada o comprimida ocurre muy lentamente (se „arrastra“) en dirección a la distensión.

La causa radica en las características reológicas de las capas del adhesivo y del soporte que transfieren la deformación[3-35]. La rejilla estirada se comporta de forma similar a un muelle estirado. La fuerza del muelle provoca tensiones de cizallamiento esencialmente en la sección curva al final de la rejilla, en las superficies de contacto entre la rejilla y el soporte que se suman a las tensiones normales debido a la deformación. Los materiales sintéticos de la banda y del adhesivo se relajan bajo la influencia de estas tensiones, es decir que la fuerza reactiva disminuye y la rejilla se retrae resultando en un error negativo. Este proceso se ilustra en la figura 3.3-27.

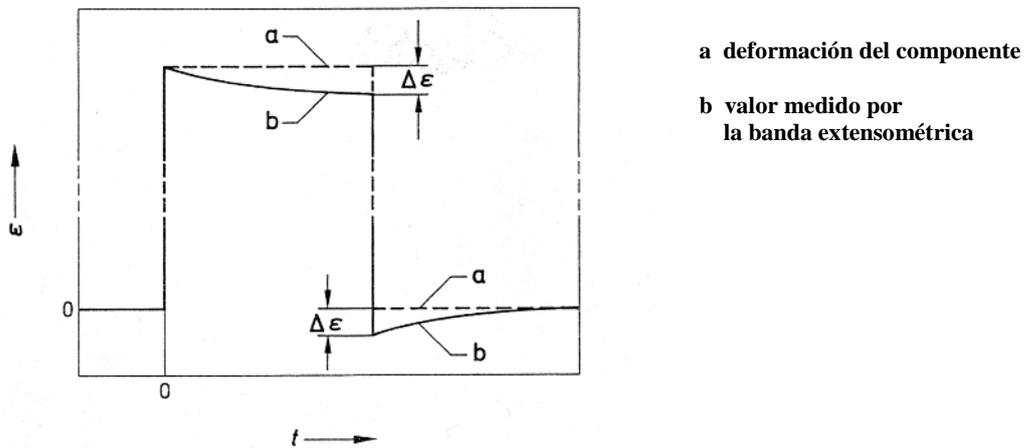


Figura 3.3-27: Evolución en el tiempo del valor de medición de una banda tras un esfuerzo instantáneo y la posterior liberación instantánea de un objeto de prueba

Ya que este proceso sucede en una región limitada de los bordes de la rejilla, tiene mayor influencia sobre rejillas cortas que sobre rejillas largas, véase la figura 3.3-28.

Las bandas en láminas presentan ventajas respecto a las bandas de hilo empleadas anteriormente, ya que las secciones curvadas al final de la rejilla son más gruesas y por tanto distribuyen las fuerzas sobre un área mayor reduciendo las tensiones de cizallamiento.

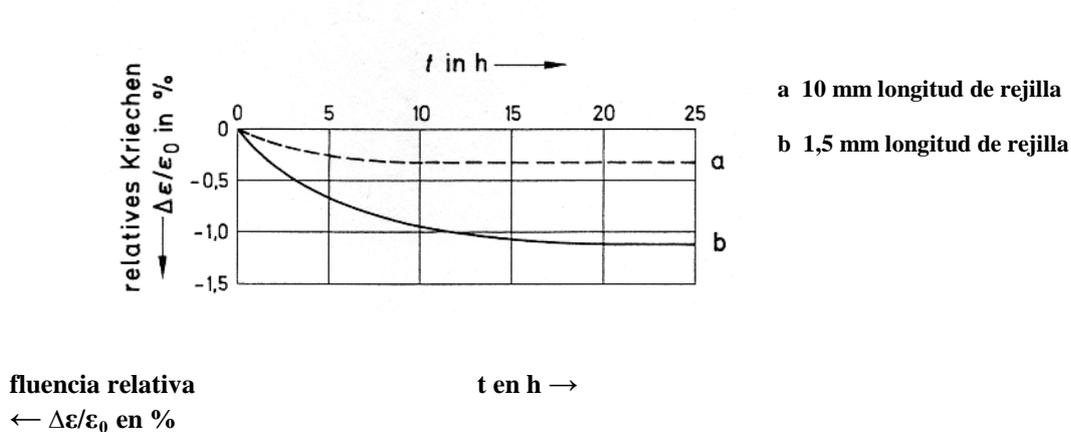
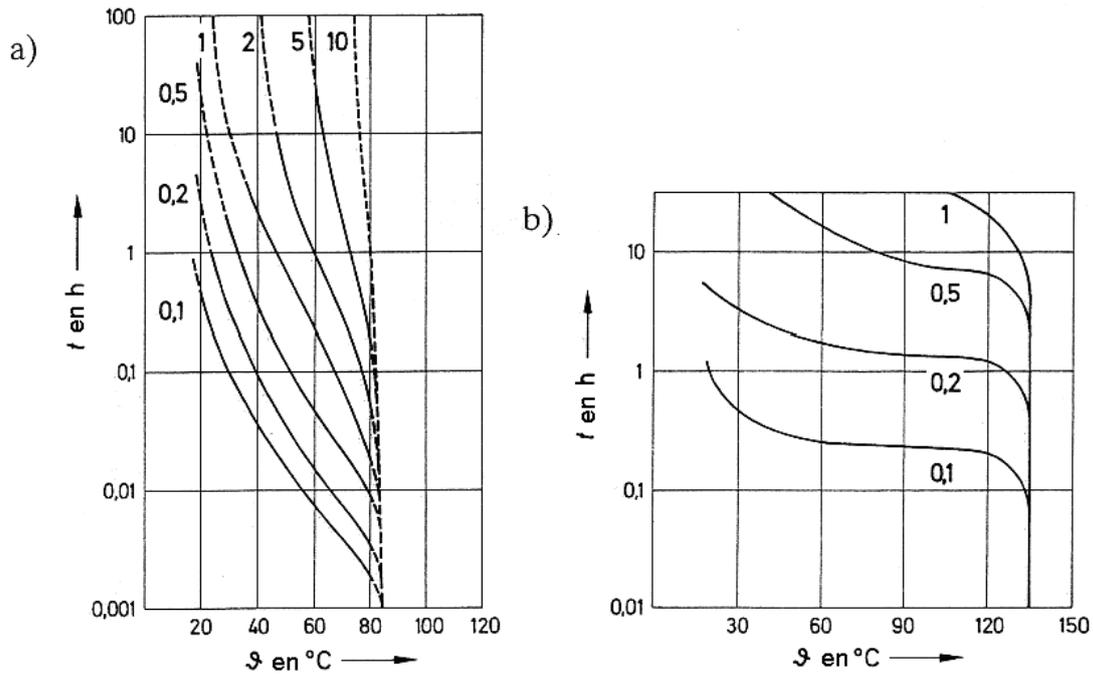


Figura 3.3-28: Curvas de fluencia de dos bandas en lámina de distintas longitudes



Las influencias que determinan las características de la fluencia son numerosas y complicadas. Entre ellas se encuentran el perfil transversal de las pistas conductoras de la rejilla, el número de las mismas, el material del soporte, el tipo y grosor del adhesivo, el tiempo, la humedad, la temperatura etc. El calor fomenta la fluencia, el frío la limita. Por eso las indicaciones de este apartado únicamente pueden señalar ciertas tendencias. Los valores numéricos no son valores absolutos y no pueden utilizarse en otras bandas extensométricas.

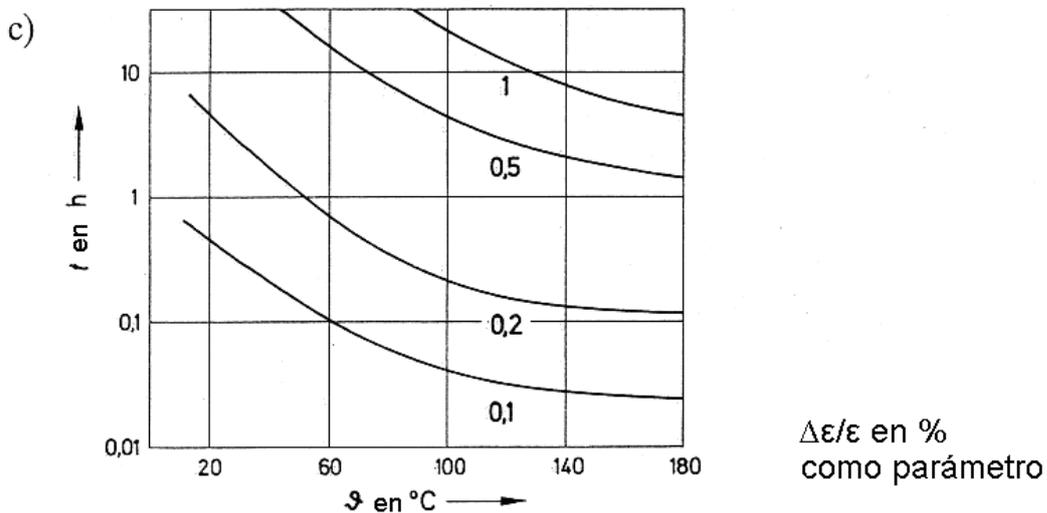


Figura 3.3-29: Gráficos-tiempo-temperatura-fluencia (TTF) según [2-1], fluencia relativa $\Delta\epsilon/\epsilon_0$ en % de $\epsilon_0 = 2000 \mu\text{m/m}$. Banda extensométrica tipo: 6/120 LY 11. Adhesivo: a) rápido X60, curado en frío b) rápido Z70, curado en frío c) EP 250, curado en caliente durante 2h a 180°C+ 2h a 200°C

En [2-1] se realizó un experimento para medir la fluencia con un dispositivo mediante el que se puede generar una deformación constante en el tiempo. La figura 3.3-29 muestra los resultados de una serie de mediciones para determinar la fluencia. En este caso el parámetro es la fluencia relativa $\Delta\varepsilon/\varepsilon_0$ en función del tiempo t y de la temperatura ϑ . La deformación de la banda al comienzo de la medición ε_0 era de + respectivamente -2000 $\mu\text{m/m}$.

Generalmente este tipo de diagramas tiempo-temperatura-fluencia solamente se pueden determinar para la combinación de banda extensométrica y adhesivo, jamás para la banda en solitario. Los diagramas de la figura 3.3-29 fueron generados con bandas del mismo tipo en combinación con 3 adhesivos diferentes. Se puede observar que el adhesivo rápido X 60 es especialmente indicado para mediciones a temperatura ambiente. A 50C° y una duración de carga de hasta una hora todavía se obtienen buenos resultados. El adhesivo rápido Z 70 por su parte muestra una mayor estabilidad y un rango más amplio de temperaturas aceptables. Lo que el diagrama no muestra son las ventajas del X 60 para bajas temperaturas, incluido el punto de congelación.

Cual es la influencia de la fluencia sobre el resultado de una medición?

Anteriormente se dijo que la fabricación de células de carga de alta precisión no sería posible sin cierto nivel de fluencia. Por que?

Las razones se ejemplificarán con una simple barra de tracción. Sirven también para otros tipos de esfuerzos pero únicamente en la región de deformación elástica. En general es esencial para un transductor que la carga aplicada sobre el material sea lo suficientemente pequeña como para que no ocurran deformaciones plásticas irreversibles. La elección de los materiales deberá cumplir con el objetivo previsto.

Si se aplica una fuerza de tracción sobre la barra, esta se deformará instantáneamente según la ley de Hooke. A causa de la relajación del material esta deformación instantánea será sucedida por una deformación asintótica y dependiente del tiempo. Si se deja de aplicar la carga sobre la barra, retrocederá la cantidad correspondiente a la deformación instantánea provocada por la carga. Lo que queda es una deformación residual con la magnitud de la deformación adicional dependiente del tiempo, que a su vez disminuye lentamente hasta que se alcanza el estado original. Esto se denomina recuperación elástica para diferenciarlo de la fluencia irreversible de los materiales. La figura 3.3-30 ilustra la resuperación elástica.

Tanto para el análisis experimental de tensiones como para la medición de otras cantidades físicas que se producen con la aplicación de fuerzas (fuerza, peso, momento de flexión, momento de torsión, presión etc.) la deformación instantánea del material es una medida para la carga.

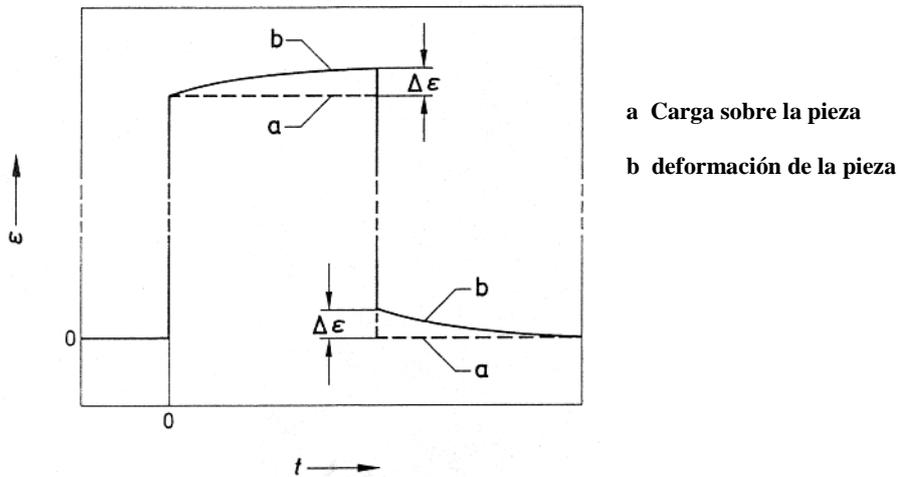


Figura 3.3-30: Variación en el tiempo de la deformación de un componente durante la aplicación de una carga constante y después de retirarla por completo (recuperación elástica)

La recuperación elástica aporta un error (de signo positivo) dependiente del tiempo. La fluencia y la recuperación elástica tienen signos opuestos y se restan entre sí, véase la figura 3.3-31. En el caso más favorable se obtiene una compensación más o menos buena.

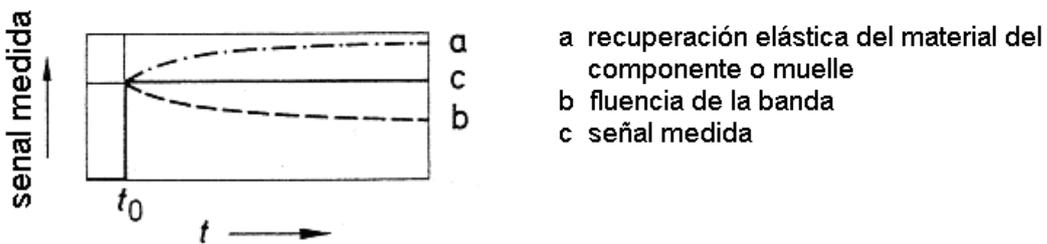


Figura 3.3-31: Esquema de la compensación de fluencia

Mientras que el principio de la compensación de fluencia es relativamente simple su realización, dependiendo de la precisión requerida, es más complicada. En cualquier caso el ajuste óptimo se debe determinar durante un ensayo en condiciones reales. De esta manera hoy en día es posible fabricar transductores cuyo error por fluencia es inferior al 0,005 % del rango de medida para un periodo de 30 minutos. Este periodo es suficiente para realizar mediciones de carga.

La figura 3.3-32 muestra la influencia de la temperatura sobre la fluencia. Se realizaron pruebas de carga sobre la pieza a temperatura ambiente, a 60°C y a 100°C, para cada temperatura se aplicó una carga durante 24h y se continuó la medición una vez retirada la carga durante otras 24 horas. Las medidas se registraron a lo largo de la duración completa de la prueba.

A temperatura ambiente la compensación es mejor que el + 0,05 % del valor especificado. A 60° C el error positivo, que indica un predominio de la recuperación elástica, es aproximadamente + 0,15 % durante el periodo de 24 horas. Después de retirar la carga regresa al punto cero igualmente al cabo de 24 horas.

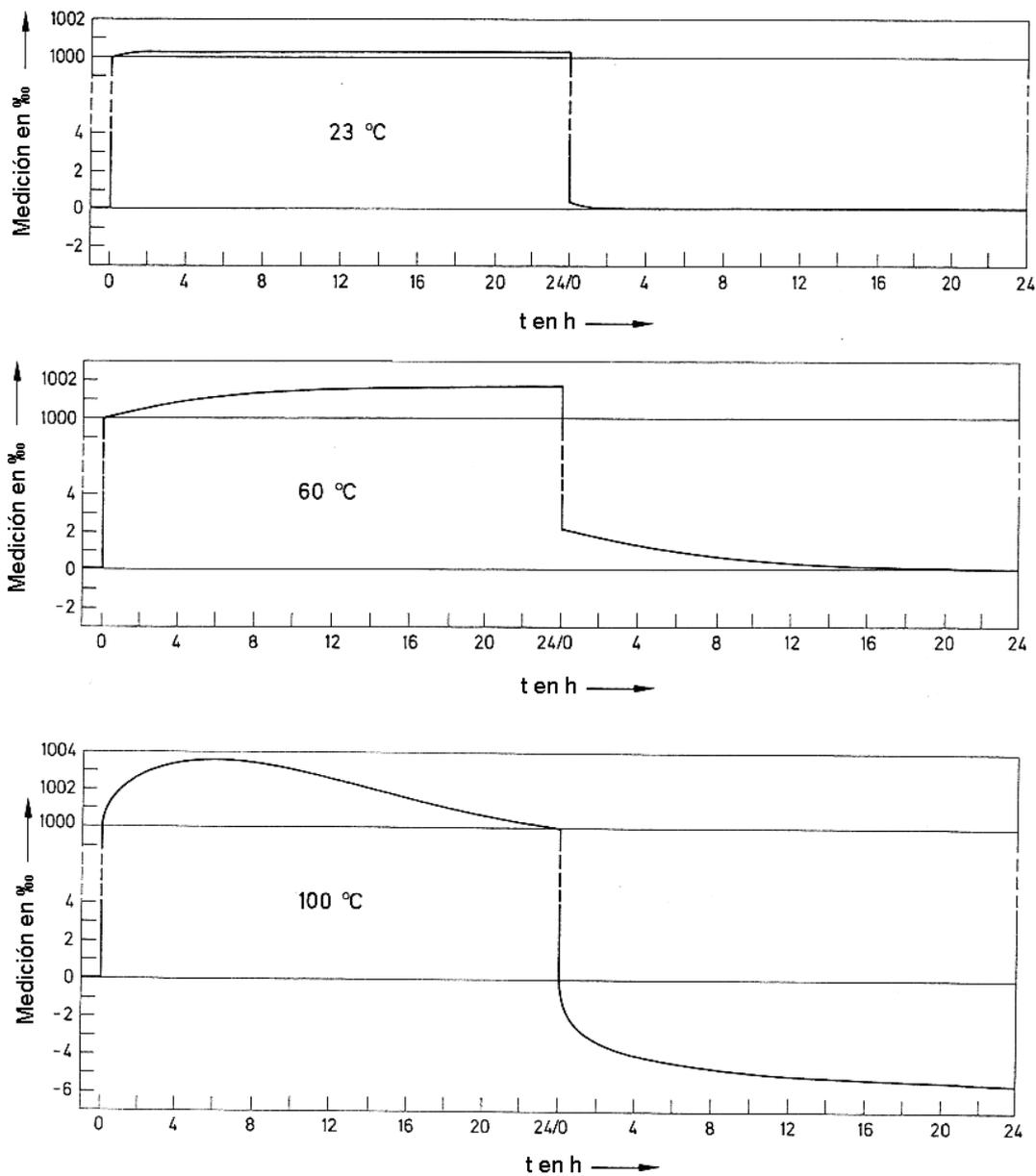


Figura 3.3-32: Fluencia dependiente del tiempo y de la temperatura de un objeto provisto con una banda extensométrica durante 24 horas a distintas temperaturas

A 100°C se produce inicialmente un incremento positivo de la señal, que invierte su dirección al cabo de unas horas. Esta inversión señala una fluencia irreversible de la banda y del adhesivo. El valor numérico de la fluencia irreversible se reconoce en la deformación remanente respecto al punto cero una vez ha finalizado el proceso de fluencia reversible después de descargar la pieza.

El ejemplo muestra que hay efectos similares que pueden ser causados por distintas influencias y que la compensación de la fluencia únicamente es realizable para ciertos rangos de temperatura-tiempo y precisión.

En este contexto hay que mencionar que la fluencia de una banda moderna en lámina es tan pequeña que en ocasiones es necesario aumentarla artificialmente para compensar los efectos de recuperación elástica del material del objeto.

El problema es debe considerar de otra manera para las mediciones dependientes del control de desplazamiento en contraste con las mediciones dependientes del control de la fuerza explicadas anteriormente.

Ejemplo: Se medirá una variación de longitud con un muelle de flexión. La deformación al lado del punto de enganche es la medida para la variación de la longitud. El principio está ilustrado en la figura 3.3-33. La relajación del material del muelle únicamente causa una reducción de la fuerza de retroceso. No tiene influencia sobre la deformación que en este caso sólo depende de la desviación del muelle y no de la fuerza de retroceso. En este caso la fluencia de la banda no tendría un efecto de compensación, sino que únicamente sería una fuente de error, que se podría eliminar empleando bandas libres de fluencia, véase la figura 3.3-34.

En estas bandas se reduce la fluencia proporcionando un equilibrio de fuerzas en los puentes transversales que unen las secciones activas de la rejilla de medición a una distancia l .

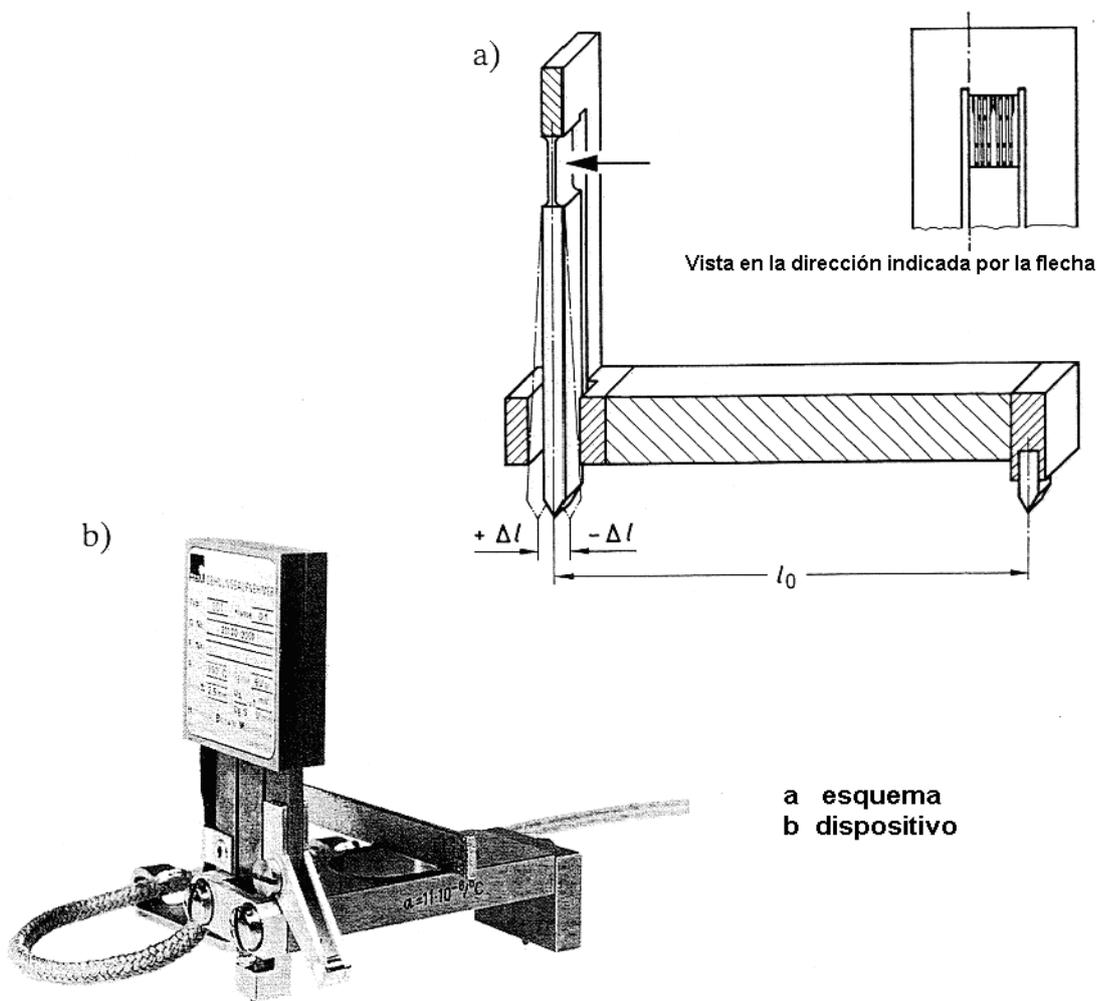
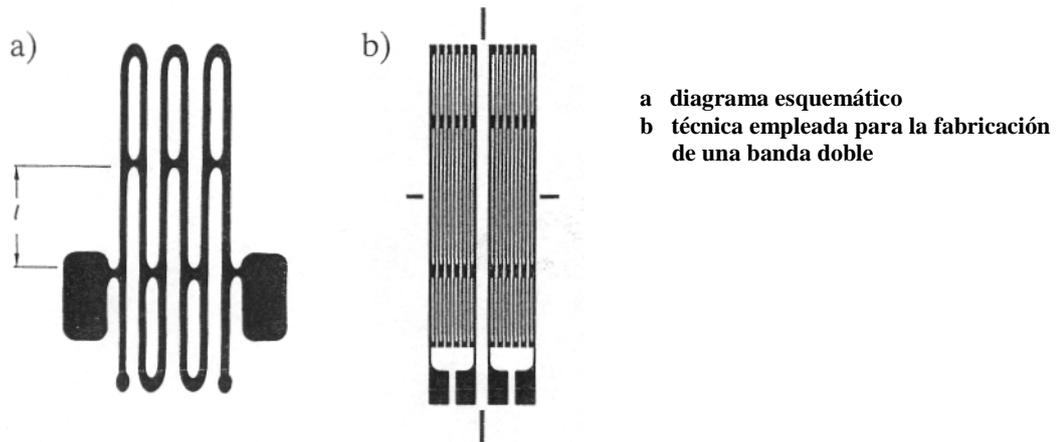


Figura 3.3-33: Dispositivo para la medición de la variación de longitud mediante un elemento de flexión equipado con bandas extensométricas (Transductor de deformación DD1 de HBM)

Para ello sirven las extensiones de la rejilla, que por sí mismas no contribuyen a la medición. Si se diseña correctamente, la fluencia que se crea en los bordes exteriores no influye sobre la rejilla de medición.



l longitud activa de la rejilla de medición

Figura 3.3-34: Ejemplo para una banda libre de fluencia

3.3.10 La Histéresis mecánica

Por la histéresis mecánica de una banda se entiende la diferencia entre el valor medido cuando la deformación crece y el valor medido cuando la deformación decrece para los mismos valores de deformación del objeto de prueba. En [2-1] se da una definición más específica para condiciones de ensayo universales.

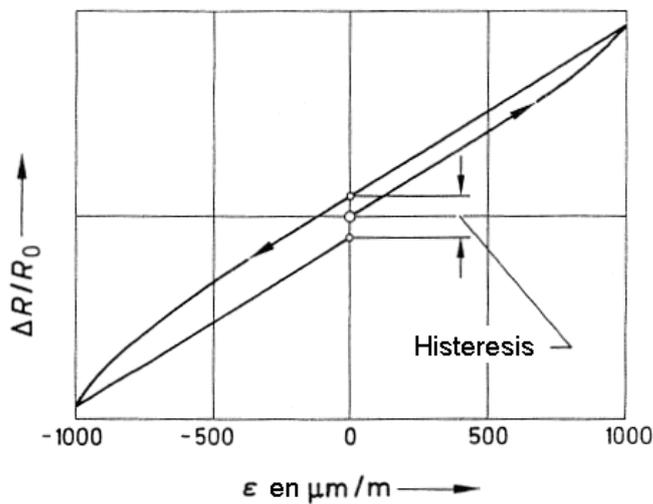


Figura 3.3-35: Definición de la histéresis mecánica según [2-1]

Según esta definición la histéresis mecánica es la diferencia más grande en el punto cero de la abscisa de una curva para la tensión creciente y decreciente que se da durante un ciclo completo entre los límites $\pm 1000 \mu\text{m/m}$ o $+ 1000 \mu\text{m/m}$.

La histéresis mecánica, al igual que otros muchos parámetros, no depende solamente de la banda sino también de los otros componentes que forman el punto de medición. La histéresis disminuye después de varios ciclos de carga. Por eso se requieren detalles sobre el primer y tercer ciclo. También se muestran mediciones suplementarias con los límites de deformación $\pm 2000 \mu\text{m/m}$ y $\pm 3000 \mu\text{m/m}$.

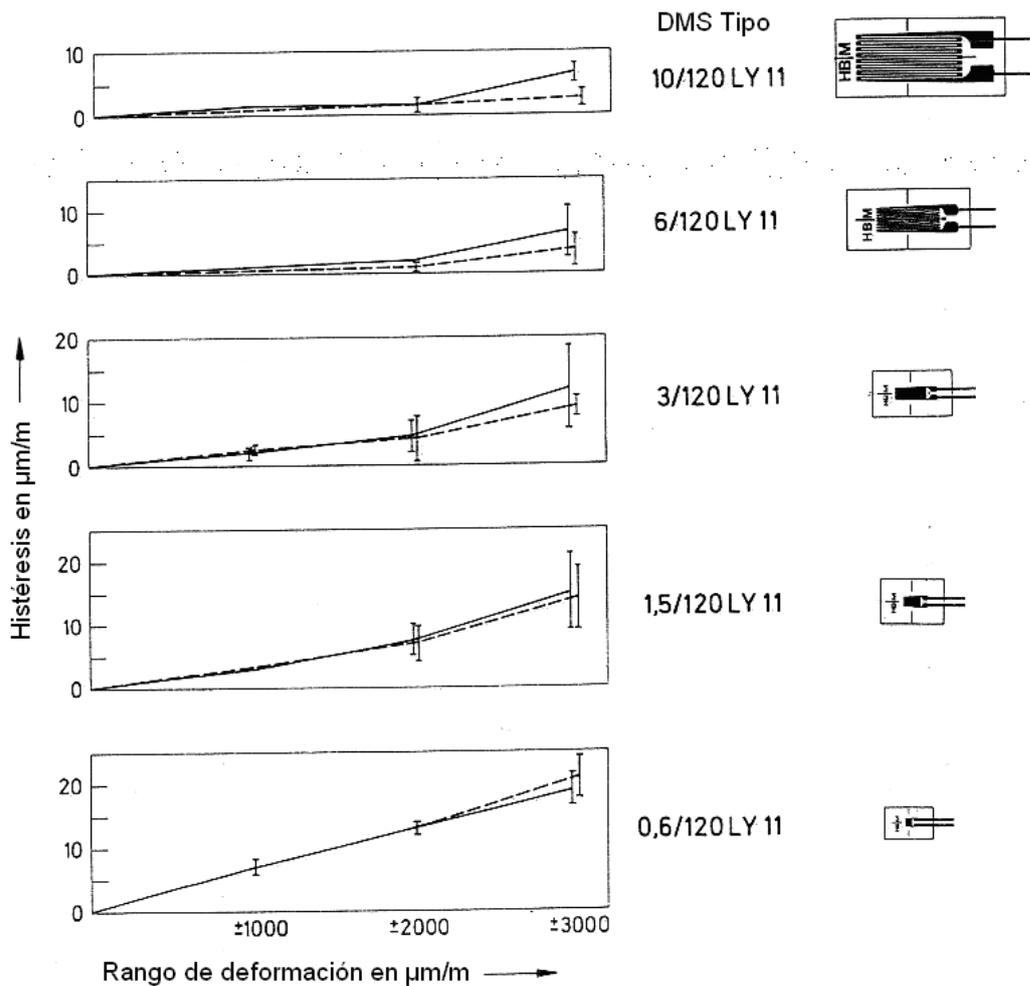


Figura 3.3-36: Histéresis mecánica de 6 tipos distintos de bandas de la serie LY 11, fijados con adhesivo rápido Z 70. En la descripción del tipo el número a la izquierda de la barra indica la longitud de la rejilla de medición

— 1^{er} ciclo
 - - - 3^{er} ciclo
 ┆ Desviación típica s

Los resultados de una investigación tal y como se muestran en los diagramas van más allá de los requerimientos de [2-1] . Deberían mostrar hasta que punto hay una dependencia de tipo dentro de una misma familia de bandas y cuales son los efectos de los distintos adhesivos. Los resultados se muestran de acuerdo con el esquema

- a) 1^{er} y 3^{er} ciclo a $\pm 1000 \mu\text{m/m}$ o $+ 1000 \mu\text{m/m}$,
- b) 1^{er} y 3^{er} ciclo a $\pm 2000 \mu\text{m/m}$ o $+ 2000 \mu\text{m/m}$,
- c) 1^{er} y 3^{er} ciclo a $\pm 3000 \mu\text{m/m}$ o $+ 3000 \mu\text{m/m}$

En la figura 3.3-36 se puede observar que la histéresis depende de la longitud de la rejilla. Esta dependencia es especialmente pronunciada en las bandas cortas.

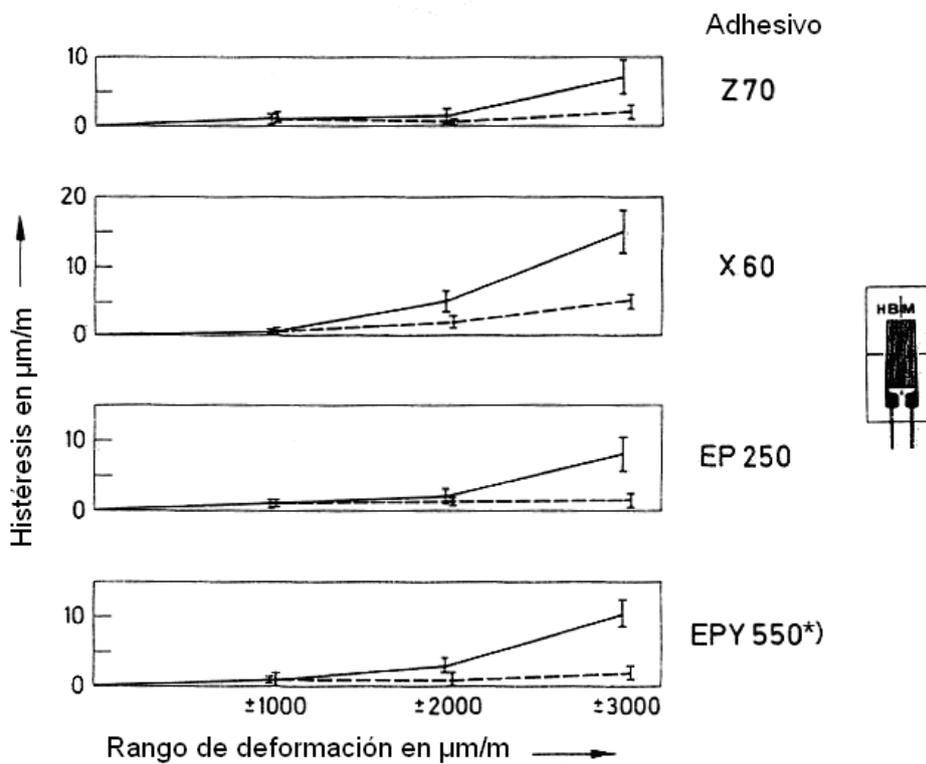


Figura 3.3-37: Histéresis mecánica de la banda de tipo 6/120 LY 11 fijada con 4 adhesivos distintos

— 1^{er} ciclo
 - - - 3^{er} ciclo
 ┆ Desviación típica s

En la figura 3.3-37 los parámetros son los adhesivos distintos empleados con el mismo tipo de banda. El Z70 es un adhesivo de endurecimiento rápido en frío con una base de cianocrilato, el X 60 también es de endurecimiento rápido en frío pero con una base de polimetacrilato, los adhesivos EP 250 y EPY 550*) son de resina epoxi y ambos de endurecimiento en caliente. El ensayo cuyos resultados muestra la figura 3.3-38 sólo se diferencia del ensayo previamente mostrado en la figura 3.3-37 por el tipo de banda empleado.

*) Eliminado del programa HBM

La importante reducción de la histéresis, especialmente en la región entre $\pm 3000\mu\text{m/m}$, indica que el diseño de la banda tiene una gran influencia.

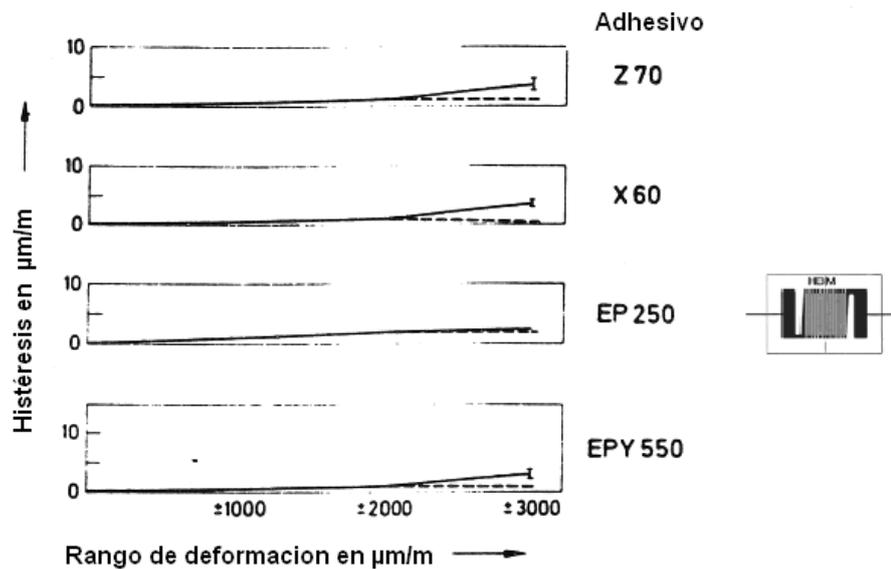


Figura 3.3-38: La histéresis mecánica del tipo de banda 6/120 LY 21, fijada con 4 adhesivos distintos



3.4 Influencias del ambiente

Las influencias del ambiente no solo afectan a la banda sino a todo el punto de medición. Por lo tanto no es suficiente considerar la banda extensométrica aislada. La estabilidad del punto cero de un punto de medición depende de numerosos factores. Comienza por una buena fijación de la banda, incluyendo la preparación cuidadosa del punto de medición y la protección adecuada, véase el apartado 4 y [4.1].

La historia de la banda, así como la historia del componente también pueden influir sobre la medición. La experiencia ha mostrado que someter el objeto a medir a esfuerzos mecánicos o térmicos antes de la medición aporta una mejor estabilidad. (Es necesario insistir en que las inestabilidades y los errores no siempre son a causa de la banda extensométrica o de su fijación, frecuentemente hay otros motivos como p.ej. una conexión incorrecta, una protección ineficaz o la interferencia de la fuente de alimentación u otros.)

Las influencias más fuertes son causadas por efectos externos. Los más frecuentes son la temperatura y la humedad pero también hay otros efectos que pueden influir sobre la señal de medición de la banda negativamente. Entre ellos están la presión, el vacío y la radiación atómica junto a los campos eléctricos y magnéticos. En parte es posible contrarrestar estos efectos escogiendo materiales específicos o bien reducirlos o compensarlos tomando las medidas adecuadas.

3.4.1 La temperatura

Es complicado presentar las diversas influencias de la temperatura sobre las bandas extensométricas de modo general. Por eso, en este punto sólo se señalan los apartados en los que se encuentran informaciones más detalladas.

2.3.4: La expansión térmica

3.2.3: Bandas especiales (bandas para altas temperaturas)

3.2.5: El rango de temperaturas útiles

3.3.4: La respuesta a la temperatura de un punto de medición

3.3.5: La dependencia con la temperatura de la sensibilidad

3.3.8: La potencia eléctrica

3.3.9: La fluencia

7.1: La compensación de la respuesta de temperatura

3.4.2 La humedad

La humedad es, junto a la temperatura, una causa fundamental para la inestabilidad de las mediciones con bandas extensométricas. Los cambios de humedad durante una medición provocan variaciones incontrolables del punto cero, que se muestran como errores en el resultado de la medición especialmente para las mediciones con referencia al punto cero. En ocasiones también afecta a la sensibilidad [3-36]. El grado de influencia depende de la velocidad de la variación así como del nivel de humedad relativa.

Si la humedad penetra en el punto de medición cambia la resistencia de aislamiento entre la banda y el objeto a medir así como entre las pistas conductoras de la rejilla de medición, actuando como una derivación variable a lo largo de la banda. Esto tiene efectos extremos para los adhesivos cerámicos (p.ej. para aplicaciones a altas temperaturas) debido a su gran higroscopicidad. Además, las variaciones de la humedad provocan que el soporte y el adhesivo se hinchen o encojan. Incluso es posible que la fijación quede destruida y que la banda se suelte parcial o completamente del objeto.

Un alto nivel de humedad puede causar daños por corrosión en la banda extensométrica. Un campo de tensión continua entre la rejilla y la pieza puede provocar que ocurra una polarización en las capas aislantes inutilizando completamente el punto de medición. La presencia de otras sustancias reactivas como p.ej. un ambiente marino, atmósferas industriales, etc. refuerzan los efectos de la humedad.

Los problemas causados por la humedad no afectan únicamente a la banda extensométrica. Los defectos en el aislamiento del cableado y de la instrumentación restante también provocan errores y deben tenerse en cuenta en la búsqueda de fuentes de error. Aunque es importante detectar la causa de los problemas, es aun más eficiente prevenirlos de antemano. Para la fabricación de bandas extensométricas, en la medida de lo posible únicamente se emplean materiales que absorben muy poca humedad. Desafortunadamente no existen adhesivos o materiales aislantes adecuados que no absorban nada de humedad. Por eso es imprescindible tomar las medidas de protección necesarias. Estas medidas dependen del medio en cuestión (no solo se debe considerar el agua o la humedad sino también otras sustancias), de la precisión de medición requerida, de la duración de la medición o del tiempo de vida del punto de medición. Para mediciones de corta duración en un ambiente seco se requiere poco esfuerzo, mientras que una medición continuada en el exterior o bajo el agua requiere medidas de protección contra todo riesgo. En el apartado 4.3 y en [4-1] hay más detalles acerca de los métodos de protección de puntos de medición.

3.4.3 La presión hidrostática

Se conoce por la literatura que las bandas extensométricas han sido expuestas a presiones hidrostáticas de más de 10000 bar sin alterar la calidad de su funcionamiento. Los resultados publicados esencialmente muestran cierta variación de la resistencia dependiente de la presión que se superpone como error a la señal de medición. Sin embargo estos resultados no se pueden aplicar universalmente, en parte a causa de las distintas condiciones de los ensayos pero sobre todo debido a los diferentes diseños de las bandas extensométricas. Los distintos métodos de fijación también contribuyen a estas diferencias. Al contrario que la mayoría de trabajos publicados, que únicamente describen resultados empíricos y que difícilmente pueden ser transferidos a otras aplicaciones, en [3-37] se tratan teóricamente los distintos parámetros de influencia y se validan sus efectos con resultados de ensayos.

Respecto a la presión hidrostática, la calidad de la fijación tiene un efecto más pronunciado sobre la validez de la medición que para otras influencias ambientales. Por este motivo a continuación se darán algunos consejos importantes.

La condición fundamental para obtener un buen resultado es una correcta fijación. En ningún caso la calidad de la fijación influye tanto sobre la precisión de los resultados de una medición como lo hace en las mediciones bajo presión hidrostática o en un vacío hidrostático.

Los dos diagramas de la figura 3.4-1, extraída de [3-38] muestran esta influencia claramente. El diagrama 3.4-1a muestra los resultados de una fijación deficiente, mientras que para el diagrama 3.4-1b se tomaron todas las medidas adicionales relevantes para el tipo de medición en cuestión.

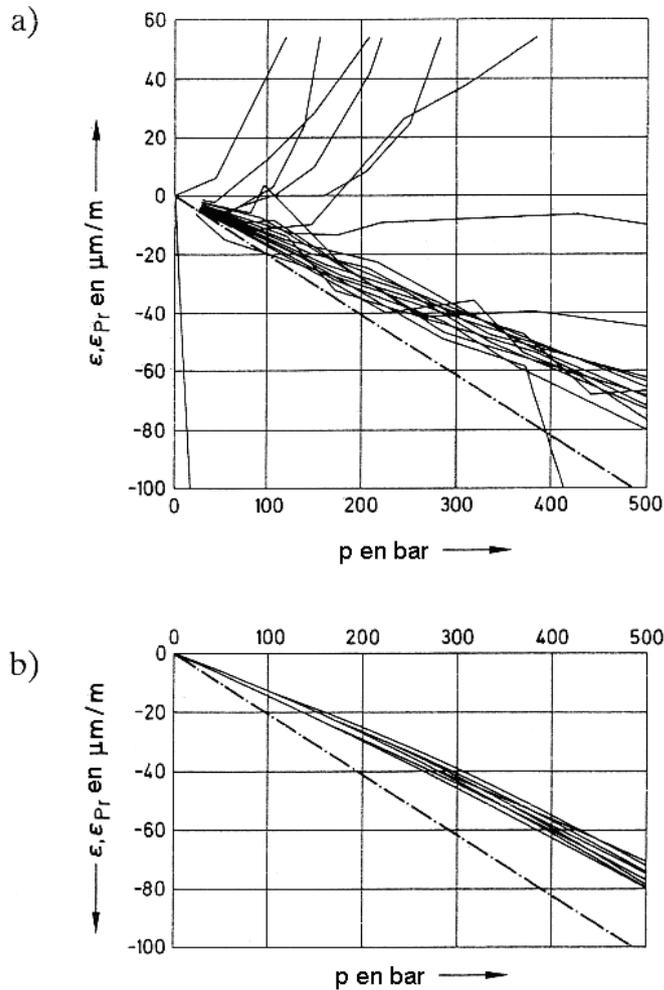


Figura 3.4-1: La influencia de la presión hidrostática sobre la medición de la banda extensométrica

- a) con una fijación deficiente
- b) teniendo en cuenta las medidas adicionales necesarias para mediciones bajo presión

Solo se pueden emplear aquellos adhesivos que no contienen disolventes, que no liberan sustancias gaseosas al endurecerse y que producen una capa adhesiva muy fina pero de grosor uniforme. La capa adhesiva no puede contener ninguna burbuja de aire; incluso la más minúscula burbuja puede llevar a variaciones incontrolables del punto cero, histéresis o hasta fractura de la rejilla. Por eso hay que prestar especial atención en no mezclar aire mientras se mezclan los adhesivos de varios componentes, mezclando al vacío o evacuando la mezcla posteriormente.

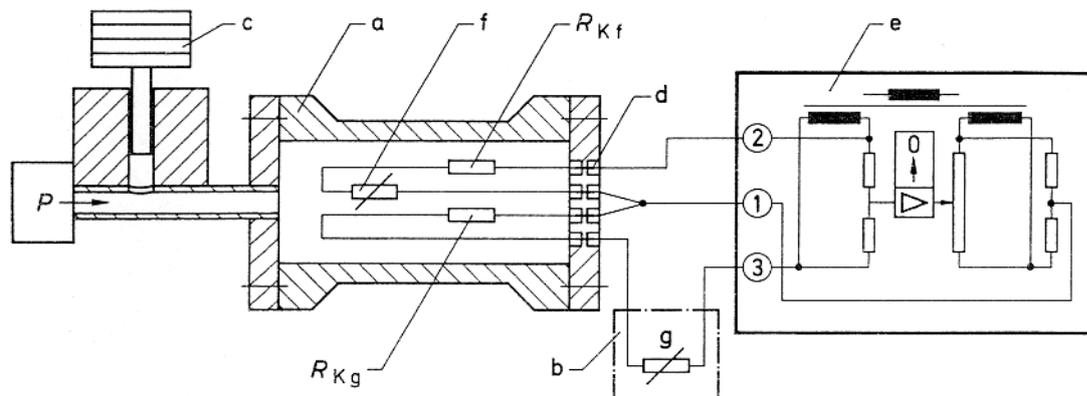
Una capa adhesiva de grosor no uniforme se comprime de forma desigual provocando distorsiones en la rejilla de medición, que se reflejan en las mediciones. Si se aplica una gran fuerza de compresión durante la fase de endurecimiento del adhesivo se obtiene un grosor uniforme de la capa. Para las fijaciones mostradas en el diagrama 3.4-1b se emplearon presiones de 15 bar = 1,5 MPa, para las del diagrama 3.4-1a solamente 1 bar = 0,1 MPa. La diferencia es evidente.

Mientras que es posible evitar fallos en la fijación con una preparación cuidadosa, la presencia de efectos físicos crea dificultades. Estos son:

- el efecto piezo-resistivo (coeficiente de presión) del material de la rejilla,
- la compresibilidad del soporte de la rejilla y del adhesivo, así como uniformidad del espesor de sus respectivas capas,
- la estructura superficial y el contorno del objeto de medición (poroso o liso, plano o curvado),
- el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson del material del componente, el valor $(2\nu - 1) / E$.

Pueden ocurrir los siguientes efectos parásitos:

- el efecto piezoresistivo del cableado instalado en la zona presurizada,
- influencias sobre la respuesta de temperatura a causa del calentamiento adiabático durante el aumento de presión o del enfriamiento durante la caída de presión.



- a Depósito a presión
- b Depósito del aceite (abierto)
- c Balanza manométrica con bomba P
- d Cruces estancos de los cables
- e Potenciómetro de medida
- f Banda extensométrica de medida (activa)
- g Banda extensométrica de compensación
- R_{Kf} Resistencia del serie con la banda extensométrica f
- R_{Kg} Resistencia del cable en serie con la banda extensométrica g

Figura 3.4-2: Montaje experimental y circuito para la investigación de la sensibilidad a la presión de una banda extensométrica

El método habitual para investigar la sensibilidad a la presión de una banda extensométrica está descrito en detalle en [3-38]. La figura 3.4-2 muestra el esquema del dispositivo empleado.

La figura 3.4-3 muestra un objeto de prueba equipado con bandas extensométricas y el cilindro de presión abierto.

A causa de la presión hidrostática p que actúa en todos los lados de la banda y de la compresibilidad de su material (isótropo), se produce una deformación negativa ε_{Pr} en su superficie. La deformación tiene la magnitud

$$\varepsilon_{Pr} = \frac{2\nu-1}{E} \cdot p. \quad (3.4-1)$$

Esta deformación, provocada en la banda por el objeto de prueba aparece en los diagramas de la figura 3.4-1 como línea discontinua de referencia. La diferencia entre la línea de referencia y los valores de medición se debe a la sensibilidad a la presión de la fijación de la banda. Este efecto es positivo y compensa o corrige las influencias negativas según el tipo de efecto.

Las investigaciones en [3-38] fueron llevadas a cabo sobre las bandas y adhesivos de la tabla 3.4-1 en diversas combinaciones.

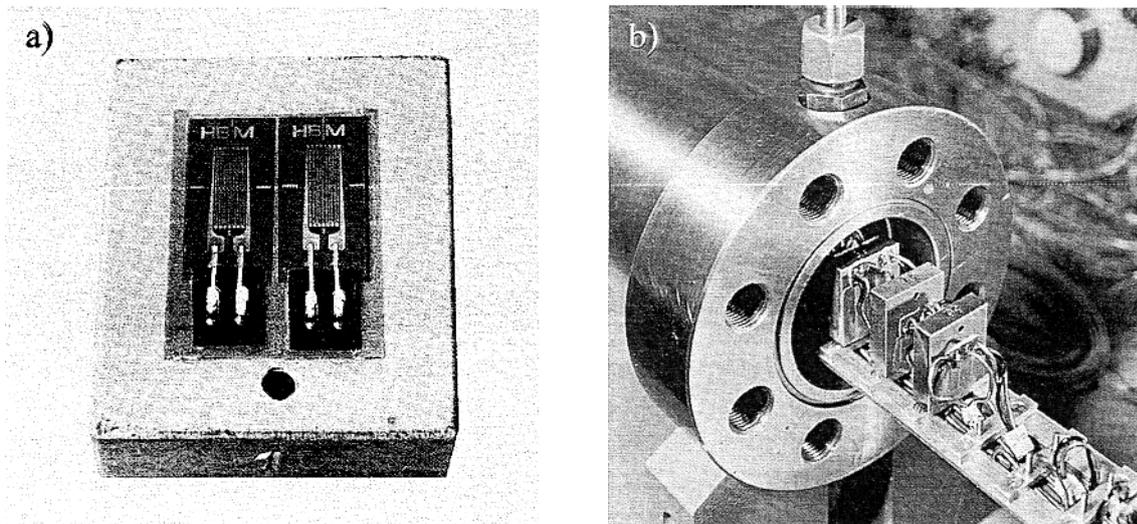


Figura 3.4-3: Objeto de prueba para medir la sensibilidad a la presión de bandas extensométricas
a) una muestra de acero equipada con bandas extensométricas
b) el cilindro de presión abierto con varias muestras de prueba

Se seleccionaron dos familias características de bandas tanto para las bandas con rejilla de hilo como para las bandas con rejilla en lámina. De cada una de estas familias se escogieron los tipos de banda más populares que fueron combinados con 3 adhesivos distintos produciendo 17 combinaciones entre adhesivo y banda. Se realizaron 8 experimentos con cada combinación, es decir un total de 136 mediciones.

| Tipo de banda | Adhesivo | | Adhesivo rápido de cianocrilato Z 70 | Adhesivo de resina epoxi (curado en caliente) EP 250 |
|----------------------------------|--|---------------------------------|---|---|
| | Familia | Adhesivo Polimetacrilato X60 | | |
| Rejilla de constantán en lámina | Resina de poliamida Serie LY 11 | 3/120* 6/120 | 3/120 6/120 | 3/120 6/120 |
| | Resina fenólica con fibra de vidrio Serie LG 11 | – – | 3/120 6/120 | 3/120 6/120 |
| Rejilla de constantán en hilo ** | Resina acrílica con fibra de celulosa Serie LA 11 | 6/120 10/120 | 6/120 10/120 | – – |
| | Resina fenólica con fibra de celulosa Serie LP 11 | 6/120 | 6/120 | 6/120 |
| | todos los tipos de bandas extensométricas están compensados en temperatura para el acero *3/120 significa: 3mm longitud de rejilla 120 Ω resistencia | | | |

** fuera del programa actual de HBM

Tabla 3.4-1: Las combinaciones de banda y adhesivo investigadas para analizar la sensibilidad a la presión

Las muestras de acero retificado se decaparon con un chorro de arena, limpiaron y desengrasaron con esmero justo antes de la fijación de la bandas extensométrica . Los detalles respecto a los adhesivos son los siguientes:

El adhesivo rápido de dos componentes X 60 de curado a temperatura ambiente se oresiona con el dedo hasta alcanzar un grosor de $65 \pm 15 \mu\text{m}$ y posteriormente endurece químicamente durante una hora a temperatura ambiente.

El adhesivo rápido de un solo componente Z 70 se aplica en una capa de $8 \pm 2 \mu\text{m}$ y se endurece tras medio minuto de presión con el dedo y está listo para la medición al cabo de unos 30 minutos.

El adhesivo de dos componentes EP250 endurece según el procedimiento siguiente: 1h a $180 \text{ }^\circ\text{C}$ aplicando una presión mecánica de 15 bar y 1h a $180 \text{ }^\circ\text{C}$ sin presión. El grosor que se consigue es de $20 \pm 5 \mu\text{m}$.

Se emplearon cables trenzados de cobre con una sección transversal de $0,25 \text{ mm}^2$ para conectar la banda extensométrica. Todas las conexiones se soldaron.

El aceite aislante o de transformador utilizado como medio de presión hizo que fuera innecesario el empleo de una protección suplementaria de la banda.

Se emplearon instrumentos manuales del tipo MK, que operaban según el principio de frecuencia portadora, para medir la deformación. La tensión de alimentación era de 1 V/225 Hz, con una resolución de 1 $\mu\text{m/m}$.

Los resultados se resumen en la tabla 3.4-2. Los valores medios son + 7,4 $\mu\text{m/m}$ por 100 bar para las bandas en lámina y + 5,5 $\mu\text{m/m}$ por 100 bar para las bandas de hilo. Las influencias de la longitud de banda y de los adhesivos son relativamente pequeñas. Solamente suponen $\pm 0,8 \mu\text{m/m}$ por 100 bar para las bandas en lámina y aproximadamente $\pm 1,3 \mu\text{m/m}$ por 100 bar para las bandas de hilo de manera que son prácticamente equivalentes a la desviación típica de cada serie de pruebas.

| Bandas extensométrica | | | ϵ_p en $\frac{\mu\text{m/m}}{100 \text{ bar}} \pm s$ cuando se fija con | | |
|-----------------------|---------|---------|--|---------------|---------------|
| Tipo | Familia | Versión | X 60 | Z 70 | EP 250 |
| Rejilla en lámina | LY 11 | 3/120 | 6,6 \pm 1,2 | 7,9 \pm 1,0 | 8,1 \pm 1,0 |
| | | 6/120 | 7,3 \pm 1,0 | 8,1 \pm 1,0 | 8,2 \pm 0,4 |
| | LG 11 | 3/120 | – | 7,0 \pm 1,5 | 5,7 \pm 1,0 |
| | | 6/120 | – | 7,9 \pm 1,0 | 6,8 \pm 0,6 |
| Rejilla de hilo * | LA 11 | 6/120 | 5,7 \pm 0,8 | 6,5 \pm 1,1 | – |
| | | 10/120 | 4,0 \pm 0,8 | 5,1 \pm 1,6 | – |
| | LP 11 | 6/120 | 5,6 \pm 0,7 | 5,3 \pm 1,0 | 5,9 \pm 0,6 |

* fuera del programa actual de HBM

Tabla 3.4-2: La influencia de la presión hidroestática sobre las fijaciones de banda investigadas en $\mu\text{m/m}$ por 100 bar incluyendo la desviación típica s , válida para las presiones investigadas desde 0 hasta 500 bar

En las superficies de fijación curvadas se produce una deformación adicional $\Delta\epsilon_p$ en la rejilla a causa de la compresibilidad más elevada de las capas del adhesivo y del soporte que no ocurre en las superficies planas (el efecto es similar al efecto de la respuesta de temperatura en superficies curvadas descrito en el apartado 3.3-4.)

En el diagrama de la figura 3.4-4 extraído de [3-37] está indicada la deformación adicional $\Delta\epsilon_p$ debido a la presión para los grosores de la capa del adhesivo mas el soporte $d = 0,05$ y $0,1$ mm. El calculo se basa en los siguientes datos:

Módulo de Young para el adhesivo y el soporte $\approx 10000\text{N/mm}^2$;
 coeficiente de Poisson $\nu = 0,32$;
 presión $p = 100$ bar (10 MPa);
 variación del radio del componente $\Delta r = 0$.

El signo es negativo para curvas convexas y positivo para curvas cóncavas.

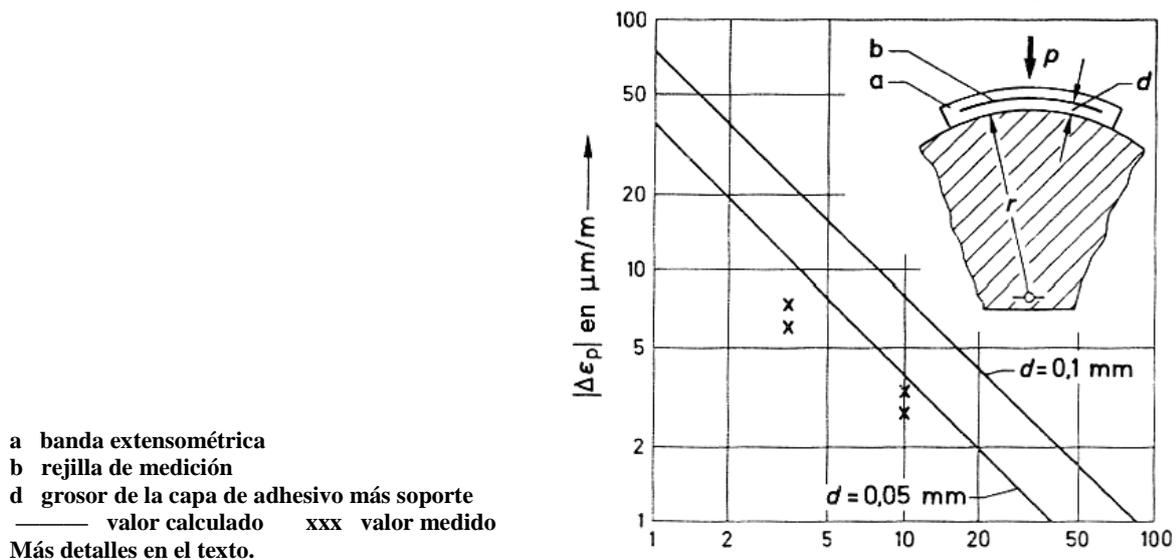


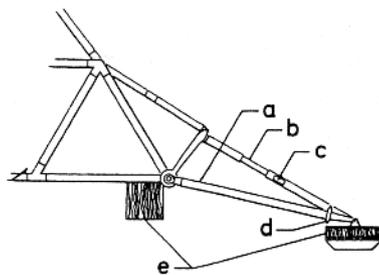
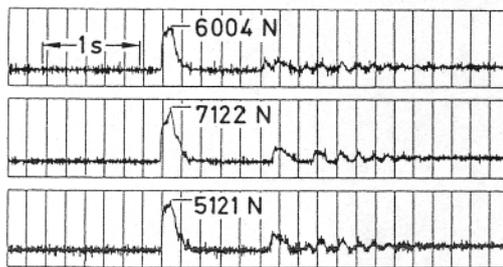
Figura 3.4-4: La variación del punto cero $\Delta\epsilon_p$ causada por la presión hidrostática p para una banda fijada sobre una superficie curva (según [3-37])

Hasta el momento no se ha encontrado ninguna influencia de la presión hidrostática sobre la sensibilidad de banda (el factor k). La dispersión de los valores de medición está dentro de los márgenes de error de la instrumentación empleada $\pm 0,5 \%$.

3.4.4 El Vacío

La capacidad de las bandas extensométricas de operar en el vacío se demostró espectacularmente durante su uso en la sonda lunar americana „Surveyor I“ para medir el impacto del aterrizaje, véase la figura 3.4-5. Las mediciones registradas demuestran que esencialmente es posible la aplicación de bandas extensométricas bajo condiciones de vacío extremas [3-39]. En [3-40, 3-41] se describen otros ejemplos de mediciones en condiciones de vacío extremas.

Dada la capacidad de bombeo ilimitada del espacio, la liberación de sustancias gaseosas (de adhesivos, sustancias de cobertura o aislantes etc.) no representa ningún problema. La situación es distinta en un sistema de vacío cerrado donde el vacío empeora a causa de la liberación de gases. Un vacío de hasta 10^{-7} mbar aun se puede controlar fácilmente. Resulta más complicado en vacíos extremos donde la liberación de gases y desorción no sólo destruye el vacío sino que también puede contaminar partes importantes de la instrumentación afectando su funcionamiento.



- a pata de aterrizaje
- b amortiguador
- c banda extensométrica
- d reactor de control fino
- e tope amortiguador de choques

Figura 3.4-5: Registro del impacto del aterrizaje de la sonda lunar „Surveyor I“ sobre la luna(1966)

Los expertos en vacío conocen estos problemas y saben también que una sola huella dactilar en la instrumentación tiene consecuencias catastróficas.

Durante la fijación de la banda se debe tener en cuenta lo siguiente: las bandas con soportes de poliamida pura o de resina epoxi pura tienen preferencia, incluso las bandas de rejilla libre. Los soportes de resina de fenólica han demostrado su utilidad en las condiciones del espacio exterior. El soporte de la rejilla se debe recortar hasta alcanzar las dimensiones mínimas permisibles.

Los adhesivos de resina pura también presentan ventajas. Siempre que sea posible se deben emplear adhesivos de endurecimiento en caliente. Los adhesivos deben alcanzar la máxima dureza; se aplican los métodos de endurecimiento máximo, seguidos de varias horas a unos 200°C, si es posible.

Es preferible emplear conductores sólidos para conectar la banda. El aislamiento debe limpiarse con esmero. Se utilizan guantes y pinzas para evitar huellas dactilares. Es imprescindible una limpieza a fondo de los puntos de soldadura.

La absorción de humedad, que resulta inevitable durante estos procedimientos se elimina a través del calentamiento o del almacenamiento en agentes de secado (p.ej. gel de sílice) o en un desecador sobre pentóxido de fósforo. De esta manera se reduce la liberación de sustancias gaseosas en el vacío y se estabiliza el punto cero de medición. La tabla 3.4-3, reopilada de fragmentos de [3-41], contiene las velocidades de liberación gaseosa de varios materiales, incluyendo algunos después de un tratamiento previo durante distintos periodos de tiempo.

| Material | Condición | Velocidad de desgasificación en mbar·l/(s·cm ²) después de | | | |
|-------------------------|--|--|--|-------------------------|---|
| | | 1 hora | 10 horas | 100 horas | |
| Aluminio | 450 °C anodizado 200 °C 13,5 h a 200°C 300 °C 15 h a 300°C | 1,7 · 10 ⁻⁷ | 2,7 · 10 ⁻⁸ | 4,0 · 10 ⁻⁹ | |
| ” | | 1,3 · 10 ⁻⁶ | 1 · 10 ⁻⁷ | | |
| Al-6061-T6 | | 2,5 · 10 ⁻⁹ | 4,5 · 10 ⁻⁹ | | |
| ” | | 3,7 · 10 ⁻¹⁰ | 1,4 · 10 ⁻⁸ | | |
| ” | | 1,6 · 10 ⁻¹⁰ | | | |
| ” | | | | | |
| Cobre | 450 °C 450 °C, desengrasado | 2,3 · 10 ⁻⁶ | | | |
| ” | | 1,6 · 10 ⁻⁶ | | | |
| ” | | 1,4 · 10 ⁻⁶ | | | |
| Molibdeno | | 7 · 10 ⁻⁷ | | | |
| Niquel | | 6 · 10 ⁻⁷ | | | |
| Plata | | 6 · 10 ⁻⁷ | | | |
| Acero | granallado 200 °C 400 °C 15 h a 200°C 15 h a 400°C 450 °C 450 °C, desengrasado | 5 · 10 ⁻⁷ | 5 · 10 ⁻⁸ | | |
| ” | | 6 · 10 ⁻⁸ | 6 · 10 ⁻⁸ | | |
| ” | | 8,6 · 10 ⁻⁹ | 8,6 · 10 ⁻⁹ | | |
| ” | | 8,4 · 10 ⁻⁹ | | | |
| ” | | 1,2 · 10 ⁻¹¹ | | 4,3 · 10 ⁻¹¹ | |
| ” | | 4,2 · 10 ⁻⁷ | | | |
| ” | 3,6 · 10 ⁻⁷ | | | | |
| Acero inoxidable | desengrasado pulido, desengrasado al vapor 400°C 400°C, 24 h a 200°C 400°C, 12 h a 400°C | 2 · 10 ⁻⁷ | 2 · 10 ⁻⁸ | 9 · 10 ⁻¹¹ | |
| ” | | 3 · 10 ⁻¹⁰ | 2 · 10 ⁻¹⁰ | | |
| ” | | | 1,4 · 10 ⁻⁹ | | |
| ” | | 7,6 · 10 ⁻¹⁰ tras 3,5 horas | | | 1,1 · 10 ⁻¹⁰ tras 167 horas |
| ” | | | 1,5 · 10 ⁻¹⁰ tras 22 horas | | |
| ” | | | 9,3 · 10 ⁻¹³ | | |
| Acero cromado | pulido, desengrasado al vapor | 1 · 10 ⁻⁸ | 9 · 10 ⁻¹⁰ | | |
| Acero niquelado | pulido, desengrasado al vapor | 5 · 10 ⁻⁷ | 1 · 10 ⁻⁹ | | |
| Tantalo | | 9 · 10 ⁻⁷ | | | |
| Wolframio | | 2 · 10 ⁻⁷ | | | |
| Zircón | | 1,3 · 10 ⁻⁶ | | | |
| Araldite D | | | 1 · 10 ⁻⁶ | 3 · 10 ⁻⁷ | |
| KEL-F (PTFE- graso) | de suministro | 4 · 10 ⁻⁸ | | | |
| Teflon (PTFE) | | 5 · 10 ⁻⁶ | | | |
| ” | | 4,6 · 10 ⁻⁷ | 2,1 · 10 ⁻⁷ | 9 · 10 ⁻⁸ | |
| Mylar | desgasificado | 2 · 10 ⁻⁷ | | | |
| ” | de suministro | 3 · 10 ⁻⁶ | | | |
| Nailon | desgasificado | 1,2 · 10 ⁻⁵ | | | |
| Plexiglás | | 1 · 10 ⁻⁶ | | | |
| Polietileno | de suministro | 2,6 · 10 ⁻⁷ | | | |
| Policloruro de vinílico | | 9 · 10 ⁻⁷ | 8 · 10 ⁻⁷ | 1,3 · 10 ⁻⁷ | |
| Caucho butílico | de suministro | 1,5 · 10 ⁻⁶ | | | |
| Neopreno | | 3 · 10 ⁻⁵ | 1,5 · 10 ⁻⁵ | | |
| ” | | 2 · 10 ⁻⁴ | | | |
| Caucho al silicio | de suministro | 3 · 10 ⁻⁵ | | | |
| Porcelana | vidriada | 6,5 · 10 ⁻⁷ | | | |
| Esteatita | | 9 · 10 ⁻⁸ | | | |

Tabla 3.4-3: Velocidad de liberación gaseosa de distintos materiales en el vacío según [3-41]

3.4.5 Radiación ionizante

El término “radiación ionizante” engloba las radiaciones corpusculares y las radiaciones electromagnéticas. Debido a la energía que contienen son capaces de desprender electrones de la materia que las absorbe. De esta forma los átomos que originalmente eran eléctricamente neutros pasan a ser iones cargados positivamente. El número de parejas de iones que se producen aumenta con la intensidad, es decir la dosis por unidad de tiempo, de la radiación.

La estructura atómica, el espesor y la densidad del medio absorbente son los factores fundamentales que determinan la absorción de la radiación ionizante.

La radiación ionizante incluye las radiaciones α -, β -, γ - , los rayos X (de Roentgen) así como la radiación de protones y neutrones.

La energía irradiada se indica normalmente en millones de electronvoltios (MeV). Se entiende por un electronvoltio (eV) la energía cinética que adquiere un electrón libre al aplicarle a una diferencia de potencial en el vacío de un Voltio.

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Nm} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Ws} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J.}$$

La radiación α es una radiación corpuscular, que está formada por núcleos de helio que se mueven a gran velocidad y que ocurre durante la desintegración nuclear natural. La penetración de las partículas α a través de materiales sólidos es del orden de unos pocos μm . A esa distancia se frena y emite una radiación γ secundaria. La partícula α frenada captura dos electrones de su entorno transformándose en un átomo de helio estable.

La radiación β es también una radiación corpuscular, pero está formada por electrones veloces. Penetra a más profundidad en materiales sólidos alcanzando unos pocos milímetros y emite radiación γ secundaria al frenarse.

Las radiaciones γ y rayos X tienen características de ondas electromagnéticas. Se diferencian por su longitud de onda (rayos $\gamma \rightarrow$ onda corta, rayos X \rightarrow onda larga). La radiación γ ocurre tanto durante la fisión nuclear en el reactor como durante la desintegración nuclear de sustancias radioactivas. Puede penetrar profundamente en la materia. Debido al alcance reducido de las partículas α - y β - , la radiación γ será fundamentalmente la radiación observada fuera del reactor. Al igual que las radiaciones α y β , esta radiación no causa una radioactividad artificial en los materiales irradiados.

La radiación de neutrones es una radiación corpuscular sin carga eléctrica. Se produce durante la fisión nuclear en el reactor y causa radioactividad artificial en la materia irradiada. Los neutrones a gran velocidad y térmicos pueden ser capturados por cualquier núcleo atómico debido a su falta de carga eléctrica. De esta manera aumenta su masa atómica y se produce un isótopo del material originalmente estable que puede ser inestable y se puede desintegrar emitiendo radiación α , β o γ .

Los protones son núcleos de hidrógeno que poseen una carga positiva. Los protones y las partículas α poseen una densidad ionizante mucho mayor que la de los electrones debido a su masa 10^3 veces mayor. Por eso su alcance para la misma energía cinética es menor.

De entre los distintos tipos de radiaciones atómicas solamente la radiación de neutrones y la radiación γ pueden penetrar más allá de unos pocos centímetros en cuerpos sólidos. Por eso son estas radiaciones las que esencialmente forman el campo de radiación alrededor de un reactor nuclear. Sin embargo estos dos tipos de radiación son los que producen todos los otros tipos de radiación en los materiales irradiados. Esta radiación secundaria, de corto alcance es principalmente la que causa los daños.

El mecanismo de estos daños por radiación se puede explicar de la siguiente manera: Al penetrar en un material la radiación corpuscular transfiere una energía a los electrones y a los núcleos de cada átomo lo suficientemente grande como para romper los enlaces interatómicos de la estructura molecular. Las secciones rotas reaccionan químicamente entre sí creando enlaces distintos a los originales. La concentración de estos enlaces impuros aumenta con la energía y la dosis de radiación produciendo cambios de intensidad variable en las características del material.

Las partículas que colisionan con núcleos atómicos causan daños permanentes. Si la colisión involucra electrones, los efectos son:

- a) la generación de calor en metales sin daños graves. Se observa un endurecimiento del material, que se traduce en una ductilidad reducida.
- b) cambios químicos irreversibles en materiales sintéticos que producen daños permanentes.

Durante la irradiación de puntos de medición con bandas extensométricas también se ha observado una corrosión causada por óxido de nitrógeno, ozono o vapor de agua. Los efectos de otros gases producidos por la irradiación del aire también se deberían considerar. Si se purga con helio seco el recipiente que contiene las muestras, se puede evitar la corrosión de las conexiones eléctricas causada por el óxido de nitrógeno.

Las diferencias que se observaron en la resistencia de aislamiento de la fijación de la banda y de las conexiones con o sin purga de helio fueron muy significativas. La resistencia inicial se redujo desde 2000 M Ω hasta 3 k Ω a lo largo de 30 días. Al volver a aplicar la purga con helio, la resistencia de aislamiento aumentó de nuevo hasta llegar a los 1000 M Ω después de 12 horas [3-27].

3.4.5.1 Los efectos de la radiación ionizante sobre los puntos de medición de las bandas extensométricas

Es complicado dar indicaciones concretas sobre este tema. Las fuentes disponibles para el autor suelen dar información sobre observaciones individuales que se pueden aplicar a los respectivos casos específicos pero cuyos resultados no pueden transferirse fácilmente a otras situaciones. Las informaciones siguientes deben considerarse teniendo en cuenta esta restricción.

Las influencias de la radiación ionizante se pueden clasificar en cuatro grupos:

1. la influencia sobre el material de la rejilla,
2. la influencia sobre el soporte de la rejilla,
3. la influencia sobre la sustancia de fijación (adhesivo),
4. la influencia sobre las conexiones (puntos de soldadura, cables etc.).

A) Los parámetros siguientes determinan el grado de influencia de la radiación:

- a) por parte de la radiación: la dosis, la densidad de flujo, la energía(y el espectro de la energía) y el tipo de radiación.
- b) por parte del material: la estructura molecular, la geometría, el peso molecular, las dimensiones, el volumen, el espesor y la densidad.

B) La resistencia a la radiación se puede clasificar de mejor a peor de la manera siguiente: metales, cerámicos, semiconductores, sintéticos.

Los efectos de la radiación nuclear sobre los materiales que forman parte del punto de medición con bandas extensométricas causan daños, que en este caso se entienden como las variaciones tanto de las características físicas del material como de su composición química.

- a) Los metales presentan una variación de su resistencia eléctrica como consecuencia de la irradiación. Entre los metales empleados para la fabricación de bandas las aleaciones de Cu/Ni 45/55 („Constantán“) y Pt/W 90/10 han demostrado ser relativamente estables mientras que la aleación Cr/Ni 80/20 („Nicromo V“) presenta una variación de su resistencia en un pequeño porcentaje.
- b) Entre los materiales semiconductores, el silicio, empleado mayoritariamente para la fabricación de bandas extensométricas semiconductoras, muestra una variación de su resistencia relativamente grande.

Ejemplo:

Variación de la resistencia tras recibir una dosis de radiación de

$3,5 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2$ ($E \geq 4,8 \cdot 10^{13} \text{ J} = 3 \text{ MeV}$): + 25 %,

$4 \cdot 10^{16} \text{ n/cm}^2$ ($E \geq 4,8 \cdot 10^{13} \text{ J} = 3 \text{ MeV}$): + 86 %.

- c) Los soportes de la banda y los adhesivos están formados por materiales orgánicos. Su degeneración al sufrir una irradiación es de distintos niveles.

Los materiales sintéticos se clasifican según la resistencia a la radiación en el orden siguiente:

Poliamida, resina fenólica, resina de poliéster, resina de silicio reforzada con fibra de vidrio, resina epoxi, polietileno, celulosa, silicio, teflon.

En ocasiones se observa una recuperación parcial del material función del tiempo transcurrido después de la irradiación. Los daños ocurren por la ionización de los materiales aislantes, que acompaña la radiación. De este modo se pierde la capacidad aislante de estos materiales en mayor o menor medida afectando a la medición. La ionización desaparece cuando finaliza la radiación y la recombinación molecular ha concluido.

Los adhesivos de gran pureza p.ej. Al_2O_3 que se aplican con una técnica de proyección térmica exhiben una buena resistencia a la radiación; también se puede emplear masilla cerámica. Por eso las bandas de rejilla libre, es decir sin soporte, que se fijan con cerámica son más adecuadas para el uso en campos de radiación que las bandas normales.

Ejemplo:

Una banda de rejilla de constantan fijada con masilla cerámica presenta una deriva media de $2 \mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ durante un periodo de 150 horas en una radiación neutrónica de $10^{13} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$.

C) Consecuencias de la irradiación de un punto de medida

- a) La fijación entre la banda extensométrica y la pieza es dañada o destruida. La resistencia a la radiación de las sustancias de fijación se clasifica de mayor a menor de la manera siguiente: sustancias de fijación con cerámica, adhesivos orgánicos de endurecimiento en caliente, adhesivos de endurecimiento en frío.
- b) La resistencia de aislamiento de la rejilla de medición, del adhesivo y de la funda de los cables se reduce. Las variaciones de la resistencia de la banda pueden compensarse en parte por los circuitos de medio puente o de puente completo. Las bandas soldables en un circuito de puente completo con una fijación de cerámica entre la rejilla y el soporte soldable han mostrado un comportamiento satisfactorio.
- c) Cerca de los puntos de soldadura se produce una ionización particularmente fuerte. Cabe esperar otros efectos a causa de los restos de fundente. Se deberían emplear exclusivamente conexiones soldadas.
- d) A raíz de la ionización fluyen corrientes parásitas en el circuito.
- e) Se produce una variación de la resistencia y del factor k de banda.

Resumen

Para las mediciones bajo los efectos de radiación se recomienda lo siguiente:

- a) bandas de rejilla libre con rejillas de constantán o de la aleación Pt-W-1200 (p.ej. la serie LF 30*);

*) fuera del programa de HBM

- b) la fijación con cerámica Rokide aplicada mediante proyección térmica o con masilla de cerámica (p.ej. CR 760*), o el empleo de bandas soldables;
- c) conexiones soldadas por puntos;
- d) aislamiento de los cables de cerámica;
- e) si es posible se debe emplear un circuito de medio puente o puente completo.
Véase [3-42]

D) Algunas informaciones sobre los efectos de la radiación ionizante.

a) La resistencia a la radiación de materiales sintéticos.

La dosis crítica para materiales sintéticos es de aproximadamente $10^4 \dots 10^5$ J/kg.

La resistencia a la radiación de los materiales sintéticos se puede aumentar con materiales de relleno tales como óxidos metálicos o minerales.

| Materiales sintéticos | Dosis crítica [J/kg] |
|---|-----------------------------|
| PVC | $10^5 \dots 10^6$ |
| Vinilo | $10^4 \dots 10^5$ |
| Adhesivo de resina fenólica (Adhesivo BC 6035) | 10^3 |
| Teflón | 10^2 |
| Adhesivo de celulosa (Duco) | 10 |
| Resina de silicona con asbestos | $1 \dots 2 \cdot 10^6$ |
| Resina epoxi con óxidos metálicos | $10^5 \dots 10^6$ |

Tabla 3.4-4: Dosis crítica de radiación para algunos materiales sintéticos

Nota:

Hay una gran variedad de términos para denotar la dosis de energía de una radiación. Los términos siguientes son aproximadamente equivalentes respecto a sus efectos.

| | |
|----------------------|---------------------------------------|
| 1 J/kg | (Joule por kilogramo) (unidad SI) |
| $1 \cdot 10^2$ rad | (dosis absorbida de radiación) (Gray) |
| $1 \cdot 10^4$ erg/g | (Ergio por gramo) |
| $1,2 \cdot 10^2$ r | (Röntgen) |
| $1 \cdot 10^{12}$ | neutrones térmicos/cm ² |
| $2,8 \cdot 10^{10}$ | neutrones rápidos/cm ² |
| $1,4 \cdot 10^{11}$ | Fotones gamma/cm ² |
| $5,2 \cdot 10^9$ | electrones/cm ² |

b) Para los efectos de una radiación gamma sobre las distintas partes que componen un punto de medición, véase la tabla 3.4-5.

*) fuera del programa HBM

| | Denominación | Dosis de radiación γ [J/kg] | |
|-----|--|--|--|
| 1. | Banda extensométrica | | |
| 1.1 | rejilla descubierta de constantán | $1 \cdot 10^6$ | se considera un límite operativo sin riesgo |
| | | $4 \cdot 10^6$ | posible fallo de la banda extensométrica |
| 1.2 | rejilla encapsulada de constantán | 2 a $4 \cdot 10^6$ | rango operativo seguro |
| | | $6 \cdot 10^6$ | posible fallo de la banda extensométrica |
| 2. | Materiales de soporte de la rejilla | | |
| 2.1 | Resina epoxi, rejilla descubierta | $4 \cdot 10^6$ | límite máximo para un funcionamiento seguro |
| 2.2 | Poliamida | $1 \cdot 10^9$ | sin reducción del aislamiento o daño físico |
| 2.3 | Resina epoxi reforzada con fibra de vidrio, | $5 \cdot 10^4$ | rango operativo seguro |
| | Rejilla encapsulada | 3 a $4 \cdot 10^5$ | dosis máxima |
| 2.4 | Resina fenólica reforzada con fibra de vidrio, | $6 \cdot 10^6$ | dosis máxima |
| | Rejilla encapsulada | | |
| 3. | Aleaciones de la rejilla | | |
| 3.1 | Constantán, rejilla descubierta | $1 \cdot 10^6$ | se considera un límite operativo sin riesgo |
| | | $4 \cdot 10^6$ | posible fallo de la banda extensométrica |
| 3.2 | Constantán, encapsulada | 2 a $4 \cdot 10^6$ | rango operativo seguro |
| | | $6 \cdot 10^6$ | posible fallo de la banda extensométrica |
| 3.3 | Karma, encapsulada | $5 \cdot 10^4$ | rango operativo seguro |
| | | $4 \cdot 10^6$ | posible fallo de la banda extensométrica |
| 4. | Adhesivo | | |
| 4.1 | Resina epoxi | $6 \cdot 10^6$ | dosis máxima |
| 5. | Material de cobertura | | |
| 5.1 | Caucho de silicona | $4 \cdot 10^6$ | inicio de endurecimiento |
| | | $6 \cdot 10^6$ | completamente duro, se puede desprender del objeto |
| 6. | Aislamiento | | |
| 6.1 | Teflón PTFE | $1 \cdot 10^4$ | rango seguro |
| | | $1 \cdot 10^5$ | límite superior |
| | | $2 \cdot 10^4$ | formación de grietas |
| 6.2 | Policloruro de vinilo (PVC) | $8 \cdot 10^5$ | rango seguro |
| | | $1 \cdot 10^6$ | PVC blanco oscurece |
| | | $6 \cdot 10^6$ | dosis máxima |
| 6.3 | Malla de fibra de vidrio | $5 \cdot 10^4$ | rango operativo seguro |
| | | $4 \cdot 10^5$ | límite superior |
| 7. | Soldadura | | |
| 7.1 | Estaño-Plomo | $2 \cdot 10^5$ | límite superior |
| 7.2 | Pasta de plata | $5 \cdot 10^4$ | rango normal |
| | | 3 a $4 \cdot 10^5$ | límite superior |
| 7.3 | Soldadura por puntos o a gas | $6 \cdot 10^6$ | límite superior aproximado |

Tabla 3.4-5: La resistencia a la radiación gamma de las partes que componen un punto de medición

3.4.6 Campos magnéticos

Durante la medición con bandas extensométricas en campos magnéticos ocurren 4 efectos:

- la magnetostricción del objeto de medición sobre el cual está fijada la banda
- la magnetostricción del material de la rejilla de la banda
- el efecto magnetoresistivo del material de la rejilla

- las tensiones eléctricas inducidas en la banda(o en su conexión) por campos magnéticos pulsantes o variables.

La magnetostricción ocasiona variaciones de las dimensiones en los materiales ferromagnéticos expuestos a un campo magnético que se reflejan en la señal indicada por la banda extensométrica.

Si la misma banda se ve afectada por la magnetostricción indica resultados erróneos. Este efecto únicamente ocurre en con rejillas de materiales ferromagnéticos.

El efecto magnetoresistivo es la variación de resistencia en un conductor eléctrico causada por la influencia de un campo magnético. Este efecto se observa prácticamente en todos los materiales conductores ferromagnéticos y ha sido el objeto de diversas investigaciones sobre bandas extensométricas. Sobre todo la aleación ferromagnética „Isoelastic“, empleada aun en América, muestra efectos intensos.

La aleación de cobre y níquel „constantán“, empleada predominantemente para la fabricación de bandas en Alemania ha sido calificada por varios autores como insensible o sólo ligeramente sensible. Las diferencias en esta evaluación pueden deberse a diferencias entre las aleaciones distribuidas por distintos fabricantes y a la intensidad del campo magnético a la que fueron expuestas las bandas durante las pruebas. En [3-43] se describen las investigaciones en el campo magnético del acelerador de protones „Bevatron“ de Berkeley con densidades de flujo de hasta 2 Tesla (= 20000 Gauss)

No se observaron efectos a causa del campo magnético en las bandas con rejillas de constantan o de la aleación Pt/W 90/10.

Es difícil llegar a conclusiones claras a partir de las informaciones disponibles ya que los resultados no muestran una imagen única. Esto podría deberse a las diferentes condiciones de los ensayos, a la falta de información adecuada acerca de la instrumentación de medición o también a la incapacidad de separar los efectos descritos al principio de esta sección.

En [3-44] se describen las investigaciones sobre bandas realizadas en el campo magnético del sincrotrón Saturn. El campo magnético con una densidad de flujo de 1,5 T (15000 Gauss) se crea en 0,8 s y desaparece en el mismo tiempo. El ciclo se repite cada 3,2 segundos. Las bandas investigadas provenían de dos fuentes que no se mencionan. Para eliminar la magnetostricción de la pieza las bandas se fijaron sobre materiales no magnéticos (cobre, plexiglás, etc.). Las rejillas de medición de las bandas se orientaron algunas paralelas y otras perpendiculares a la dirección del flujo magnético. Algunas bandas se conectaron en configuración de cuarto de puente y otras en configuración de medio puente; esta última configuración se utilizó para determinar el grado de compensación. Se empleó una fuente de tensión continua ; se cambió la polaridad durante la investigación para separar la señal del campo magnético de los otros efectos. El nivel de interferencia no superó los 7 $\mu\text{m/m}$. La tabla 3.4-6 contiene los resultados de las mediciones.

| Proveedor de las bandas extensométricas (DMS) | Disposición de las bandas extensométricas y alineación de la rejilla con la dirección del flujo magnético | densidad del flujo magnético en Tesla | | | | | |
|---|---|--|-----|----|-----|-----|-----|
| | | 0,26 | 0,6 | 1 | 1,4 | 1,6 | 2 |
| | | deriva del punto cero en $\mu\text{m/m}$ | | | | | |
| 1 | 1 DMS \perp | 8 | 70 | 95 | 110 | 130 | 185 |
| | 1 DMS II | 4 | 12 | 18 | 22 | 28 | 35 |
| | 2 DMS \perp | compensación | | | | | 5 |
| | 2 DMS II | compensación | | | | | 5 |
| 2 | 1 DMS \perp | 2 | 8 | 10 | 12 | 16 | 20 |
| | 1 DMS II | 5 | 8 | 10 | 12 | 15 | 20 |
| | 2 DMS \perp | compensación | | | | | 3 |
| | 2 DMS II | compensación | | | | | 3 |

Tabla 3.4-6: Deriva del de punto cero de una banda en un campo magnético estático (según[3-44])

Las publicaciones [3-45 hasta 3-48] contienen más detalles relevantes. Para las bandas semiconductoras la magnitud del efecto magnetoresistivo depende de la movilidad de los portadores de carga. Se describe a través de la ecuación siguiente

$$R = R_0 (1 + \beta^2 B^2). \quad (3.4-2)$$

R resistencia eléctrica,
 R_0 resistencia sin influencia magnética,
 β movilidad de los portadores de carga,
 B densidad del flujo magnético

Los campos magnéticos pulsantes o variables inducen tensiones eléctricas en los conductores eléctricos que se transfieren a la señal de medición en forma de error. Para prevenir este efecto en algunas ocasiones se emplean bandas no inductivas con las dos mitades de la rejilla enrolladas en direcciones opuestas o se blindan magnéticamente mediante laminas de metal μ (de alta permeabilidad magnética μ) o con una protección. Para conectar la banda se emplean cables libres de inducción trenzados o blindados magnéticamente. En estos casos los amplificadores de frecuencia portadora presentan ventajas importantes. Al contrario que los amplificadores de tensión continua eliminan todas las tensiones eléctricas cuyas frecuencias se encuentran fuera de su banda de frecuencia, véase el apartado 5.3.

En raras situaciones un ingeniero de mediciones se enfrenta a campos magnéticos tan grandes. La tabla 3.4-7 permite estimar la intensidad aproximada de un campo magnético (según [3-48]).

La intensidad del campo magnético H en la cercanía de un conductor eléctrico se calcula según la siguiente ecuación:

$$H = \frac{I}{2\pi r}. \quad (3.4-3)$$

I = corriente eléctrica
 r = radio

| Densidad de flujo B en militesla [mT] | Fuentes de emisión |
|---------------------------------------|---|
| bajo (≤ 2) | A un 1 m de distancia de transformadores, tubos fluorescentes y cables de alta intensidad; motores y soldadores eléctricos entre 2 y 4 m de distancia. |
| medio (2 ... 50) | Todos los aparatos mencionados en el apartado anterior a menos de 1 m; soldadores eléctricos entre 15 cm y 2 m de distancia; seccionadores de barras, cables, conexiones, etc. con una corriente ≥ 5000 A entre 3 y 15 m de distancia, y con una corriente de 1000 A hasta 2 m de distancia. |
| alto (50 ... 3200) | A 3 m de distancia de mesas de vibración; junto a motores eléctricos y generadores. |

Tabla 3.4-7: La intensidad de flujo de un campo magnético (según [3-48])

La densidad de flujo magnético B es igual a

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H. \quad (3.4-4)$$

μ = permeabilidad del material de la pieza de prueba
 μ_0 = permeabilidad del vacío
 H = intensidad del campo magnético

Para un conductor recto el flujo magnético transcurre en dirección circunferencial.

3.4.7 Almacenamiento

Bajo condiciones normales las bandas extensométricas se pueden almacenar indefinidamente. Para protegerlas de daños mecánicos las bandas se deben guardar dentro de su embalaje original. Las variaciones de la temperatura a causa de los acontecimientos meteorológicos no afectan a las bandas. Las bandas extensométricas se deben proteger de la humedad ; se fabrican en condiciones estándar de 23°C y con un 50 % de humedad relativa, de acuerdo con la norma DIN 50014. Si la humedad relativa es distinta al 50 % se pueden producir variaciones de poca importancia en la resistencia eléctrica. Una humedad muy elevada es más crítica, ya que a la larga puede provocar daños por corrosión. Similarmente los efectos directos del agua, ácidos, bases, gases reactivos, materiales contaminantes o de la radiación nuclear son potencialmente dañinos.

Las siguientes restricciones para algunas bandas específicas son excepciones a las indicaciones anteriores:

Las bandas de rejilla libre tienen un soporte auxiliar autoadhesivo, cuya capa adhesiva se seca con el tiempo perdiendo sus propiedades adhesivas. Por eso el tiempo de almacenamiento es de

- a) un máximo de 6 meses para fijaciones de deposición por proyección térmica (Rokide),
- b) al mes o un año para fijaciones con masilla (CR 760).

La banda en sí no se ve afectada por el envejecimiento.

Las bandas encapsuladas con una encapsulación metálica o de caucho se pueden almacenar indefinidamente. Las bandas soldables se almacenan de la misma manera que las bandas normales.

4 Materiales empleados para la instalación de bandas extensométricas

En los materiales para la instalación de bandas extensométricas se incluyen todos los materiales empleados para fijar la banda al objeto a medir, los materiales para conectarla y los materiales empleados para proteger el punto de medición. La instalación en sí es una tarea que exige un gran esmero. Únicamente una banda instalada correctamente puede medir con precisión.

Por eso es imprescindible seguir las instrucciones para la instalación de la banda y las instrucciones de uso de los materiales para la instalación. Hay que ser consciente de que los resultados de una medición pueden afectar las vidas y la salud de muchas personas.

Se recomienda la formación de los instaladores asistiendo a cursos especiales organizados por HBM y las escuelas de formación para ingenieros y técnicos.

En este texto no se tratan los detalles de las técnicas instalación, se remite a la publicación [4-1] que da instrucciones minuciosas para la instalación de las bandas. Aquí se citan ciertos pasajes de dicha publicación.

4.1 Materiales para la fijación de bandas extensométricas

Los materiales de fijación tienen la función de unir la banda firmemente con la superficie del objeto a medir transfiriendo la deformación del mismo a la banda sin pérdidas. Las distintas condiciones del entorno y parámetros de influencia, así como los distintos ámbitos de aplicación requieren distintos materiales de fijación y métodos de aplicación.

Mayoritariamente se emplean adhesivos para la fijación, pero también se utilizan otros métodos: la soldadura por puntos y la fijación con materiales cerámicos.

Las ventajas particulares de la fijación de bandas extensométricas con adhesivos son:

- La posibilidad de unir distintos tipos de materiales. Según el tipo de adhesivo la unión ocurre a temperatura ambiente o a una temperatura más elevada.
- No se influye sobre los materiales a fijar (con algunas restricciones para materiales sintéticos).

- Los adhesivos de endurecimiento químico (los únicos de interés para las técnicas de bandas extensométricas) destacan por su reducida absorción de humedad.
- Se puede controlar la velocidad de endurecimiento con la selección de distintos tipos de adhesivos o condiciones de endurecimiento (en frío o en caliente)
- una resistividad elevada contribuye a una resistencia de aislamiento más grande entre la banda y el componente.

Que los adhesivos sean especialmente adecuados para la fijación de bandas extensométricas es también una ventaja, es decir, son capaces de transferir correctamente la deformación del objeto a la banda. En la figura 3.2-2 del apartado 3.2.1.1 se ilustra esquemáticamente el proceso de transferencia. La fuerza necesaria para deformar la banda proviene del objeto a medir y se transfiere a la banda por la capa de adhesivo. Durante este proceso se producen tensiones de cizallamiento en la capa adhesiva, cuya magnitud depende de la fuerza y del área de transferencia. Debido a la elasticidad de los adhesivos se produce una distorsión de la capa que es máxima en los bordes (en la dirección de la deformación) y que disminuye hacia el centro. Esta distorsión es la que determina la longitud de las capas de transferencia de la figura 3.2-2. Para adhesivos blandos y capas gruesas esto provoca que la deformación en el lado de la banda sea menor que la deformación en el lado del objeto a medir. Esto se intenta ilustrar en la figura 4.1-1. En la mitad izquierda de la figura las líneas verticales en la capa adhesiva señalan la dirección de las secciones transversales en el estado libre de carga. La mitad derecha muestra el mismo objeto bajo deformación. Aquí las secciones transversales están cada vez más inclinadas hacia el borde. Esto significa que el adhesivo no transmite toda la deformación del objeto a la banda.

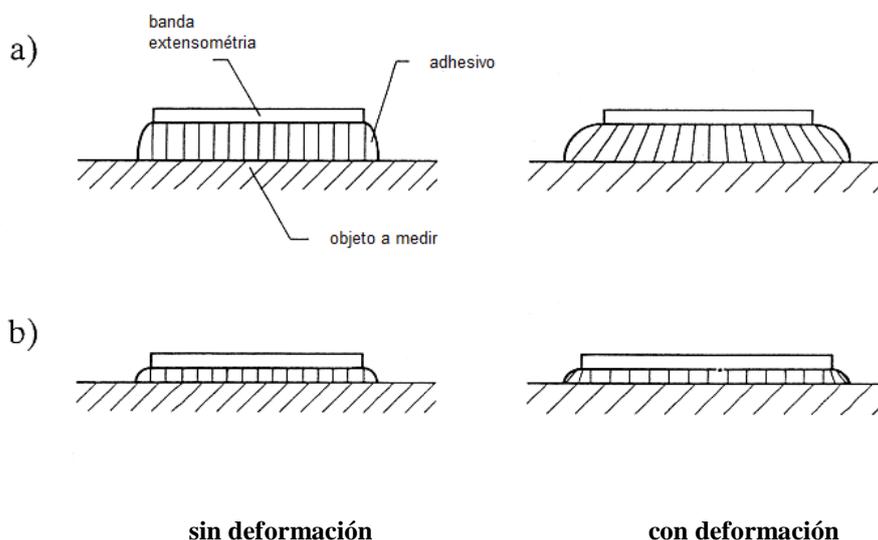


Figura 4.1-1: Transferencia de la deformación del objeto a medir a la banda a través del adhesivo
a) adhesivo inadecuado (demasiado blando) y capa demasiado gruesa
b) adhesivo adecuado y capa fina

Si se emplea un adhesivo duro (con un módulo de Young elevado) y se aplica una capa fina, la distorsión dentro de la capa adhesiva es mucho más pequeña y se limita principalmente a las secciones exteriores. La figura 4.1-1b muestra esta situación. En este caso las distancias de transición son pequeñas y la transferencia de la deformación es correcta.

La fijación entre piezas unidas con adhesivo se basa en la adhesión entre el adhesivo y las superficies que moja. La adhesión ocurre principalmente por fuerzas de atracción entre las moléculas adyacentes. La aportación a través de la aferración del adhesivo a los poros de las superficies rugosas de unión o de la acción capilar es muy pequeña. El aumento de la fuerza adhesiva observable tras un moleteado moderado de las superficies de unión se debe a la ampliación de la superficie efectiva de contacto y no a la “adhesión mecánica”.

Las causas de la adhesión son complejas y sólo se entienden parcialmente [4-2,4-3]. La adsorción (también conocida como formación parcial de valencia) supone una aportación esencial a la fuerza adhesiva, junto con el enlace químico débil (enlace primario de valencia) y otras fuentes de energía.

Bajo el término fuerzas “*de Van-der-Waals*” se reúnen distintos mecanismos de enlace de la región de la adsorción entre los cuales se distinguen tres tipos de efectos fundamentales:

- El momento dipolar (las fuerzas de Keesom). Si las cargas positivas y negativas en una molécula están distribuidas de forma asimétrica, entonces, aunque las moléculas en su totalidad sean neutras, poseen un momento dipolar eléctrico y son polares. Las moléculas adyacentes intentan alinear su momento dipolar de manera que el lado cargado positivamente esté dirigido hacia el lado negativo de la molécula adyacente y viceversa. El alcance medio de las fuerzas de Keesom es de aproximadamente 0,4 a 0,5 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).
- El efecto de inducción (las fuerzas de Debye). Si el centro de carga del campo eléctrico de una molécula se desplaza por el efecto inductivo de un campo externo, p.ej. de otra molécula, también se producen efectos interactivos similares. A diferencia de las fuerzas de Keesom, en el caso de las fuerzas de Debye una de las partículas posee un dipolo permanente y la otra un momento dipolar inducido. El alcance medio de las fuerzas de Debye es de 0,35 a 0,45 nm.
- El efecto de dispersión (las fuerzas de London). Este efecto se interpreta a partir de la teoría de ondas mecánicas, según la cual, debido a la superficie de probabilidad constantemente cambiante de los centros de carga eléctrica, surge un sistema de dos partículas oscilando en fase, que continua- y mutuamente inducen un dipolo.

El alcance medio de las fuerzas London es de 0,35 a 0,45 nm.

- El enlace de hidrógeno ocupa un lugar especial entre las fuerzas de Van der Waals. También está basado en los efectos interactivos de los dipolos, pero tiene la particularidad que el polo positivo de al menos uno de los dipolos está formado por un átomo de hidrógeno. El alcance del enlace de hidrógeno es de 0.26 a 0.3 nm. La parte correspondiente a las fuerzas de enlace químico (enlace primario de valencia) todavía está poco aclarada, sin embargo parece, según lo que se sabe, que su contribución a las fuerzas adhesivas es pequeña.

Tanto las condiciones operativas en el punto de instalación como los distintos requisitos sobre el comportamiento del agente de fijación, especialmente respecto a la temperatura de servicio, son la razón para la amplia variedad de materiales de fijación disponibles. Lo mismo es válido para las bandas extensométricas. De esta manera se dan combinaciones entre ciertas bandas extensométricas y ciertos tipos de adhesivos que reúnen las características óptimas para un ámbito de aplicación concreto. Para otras combinaciones con distintas capacidades de comportamiento los límites operativos los determina el componente con el rango más ajustado. Por supuesto hay adhesivos que no se pueden combinar con ciertas bandas por motivos técnicos. Por eso es aconsejable seguir siempre las recomendaciones de los catálogos y de las hojas de características técnicas.

Es imprescindible hacer una advertencia contra el empleo de adhesivos distintos a los recomendados. Los materiales adhesivos para bandas extensométricas tienen que cumplir requisitos más exigentes que los adhesivos normales de fijación. Por eso suelen ser el resultado de desarrollos específicos o como mínimo modificaciones de los adhesivos disponibles normalmente. El hecho de que una banda esté firmemente pegada no es suficiente para decidir si el adhesivo es adecuado para propósitos de medición.

Se utilizan las siguientes técnicas de fijación:

- adhesivos de endurecimiento en frío
 - adhesivos de endurecimiento en caliente
 - masillas de cerámica
 - cerámica fijada por proyección térmica
 - fijaciones por puntos de soldadura.
- Los adhesivos de endurecimiento en frío se pueden emplear fácilmente y con poco esfuerzo. Se diferencia entre los adhesivos de un solo componente, que comienzan a reaccionar p.ej. a través de la eliminación de aire (anaeróbicos) y los adhesivos de dos componentes que tienen que mezclarse antes de su aplicación. Los adhesivos rápidos son aquellos que tienen un tiempo de reacción corto. Se emplean preferentemente para el análisis experimental de tensiones y los ámbitos relacionados.
- Los adhesivos de endurecimiento en caliente solo se emplean en los casos en los que el objeto a medir puede ser expuesto a las temperaturas requeridas para el endurecimiento. Normalmente esto es posible durante fabricación de transductores y en muchos casos también cuando se pueden aplicar las bandas extensométricas sobre piezas de máquinas etc. antes de su montaje o bien sobre piezas que se pueden desmontar para la aplicación de la banda.

Comparados con los adhesivos de endurecimiento en frío los adhesivos de endurecimiento en caliente tienen un mayor rango de aplicación a temperaturas más altas y resultan adecuados, cuando se combinan con bandas de precisión, para satisfacer los altos requerimientos de exactitud habituales en la fabricación de transductores. Se emplean adhesivos de endurecimiento en caliente tanto de uno como de dos componentes.

- Las masillas de cerámica sólo se pueden emplear en combinación con bandas especiales (bandas de rejilla libre). Preferentemente se utilizan para mediciones a altas temperaturas o para el rango criogénico de temperaturas. Las masillas de cerámica precisan temperaturas de cocción relativamente elevadas, lo que limita su ámbito de aplicación. La higroscopicidad elevada genera problemas de estabilidad del cero en el rango entre la temperatura de congelación y la temperatura de evaporación del agua, y requiere medidas de protección efectivas.
- La cerámica fijada por proyección térmica requiere las mismas bandas especiales que las masillas de cerámica, y además un equipo especial. El ámbito de aplicación es similar al de las masillas de cerámica. Una particular ventaja de este método es que el objeto a medir se calienta poco durante la aplicación. Las propiedades higroscópicas se asemejan a las de las masillas de cerámica. Este tipo de fijación tiene propiedades favorables contra la radiación nuclear.
- Las soldadura por puntos es uno de los métodos de fijación más simples. Requiere un equipamiento mínimo, es decir una pequeña unidad de soldadura, poca preparación y no mucha práctica. Sin embargo se emplea poco por los siguientes motivos:

Se necesitan bandas especiales de las cuales sólo se fabrica un número limitado de tipos.

Las bandas soldables no se pueden utilizar sobre superficies curvadas. Tampoco se pueden fabricar en tamaños muy reducidos lo que limita más su ámbito de aplicación.

El objeto a medir debe ser de un material soldable. En algunos casos se rechaza este tipo de fijación aunque el objeto a medir sea soldable debido al riesgo de microcorrosión, p.ej. para piezas expuestas a tensiones altas como algunas partes de un cilindro de vapor, con los aceros austeníticos, etc. El objeto debe ser suficientemente rígido, es decir grueso, como para no modificar la distribución de la tensión a causa de la fuerza de retención de la banda. No debería notarse ninguna restricción de la deformación.

4.2 Materiales auxiliares para la instalación

4.2.1 Materiales de limpieza

Se requieren varios procesos para la preparación del punto de instalación.

Para la primera limpieza de piezas muy sucias se emplean métodos de limpieza mecánicos y productos comunes de limpieza doméstica.

Para la limpieza a fondo se emplean preferentemente disolventes orgánicos.

La tabla 4.2-1 recoge algunos productos habituales junto con los valores MAK que indican la concentración máxima permitida en el lugar de trabajo. Las notas „fácilmente inflamable” y „nocivo para la salud” se han tomado del “reglamento de materiales peligrosos en el puesto de trabajo”, Ley federal I, página 2493 del 8 de septiembre de 1975, y hacen referencia a las medidas de seguridad que se deben tomar.

| Denominación general o nombre comercial | otra denominación química | Fórmula química | MAK-Concentración | | Observaciones |
|---|---------------------------|---|-------------------|-------------------|---|
| | | | ppm | mg/m ³ | |
| Metiletilcetona | Butanona | CH ₃ ·CH ₂ ·CO·CH ₃ [C ₄ H ₈ O ₂] | 200 | 590 | fácilmente inflamable |
| Acetona | Acetona | CH ₃ ·CO·CH ₃ [C ₃ H ₆ O] | 1000 | 2400 | fácilmente inflamable |
| Alcohol isopropílico | Isopropanol | CH ₃ ·CH(OH)·CH ₃ [C ₃ H ₈ O] | 400 | 980 | fácilmente inflamable |
| Alcohol etílico | Etanol | CH ₃ ·CH ₂ ·OH [C ₂ H ₆ O] | 1000 | 1900 | fácilmente inflamable |
| Acetato de etilo | Éster etilacético | CH ₃ ·CO ₂ C ₂ H ₅ [C ₄ H ₈ O ₂] | 400 | 1400 | fácilmente inflamable |
| Tolueno | Metilbenceno | C ₆ H ₅ ·CH ₃ [C ₇ H ₈] | 200 | 750 | fácilmente inflamable, nocivo para la salud |
| Gasolina pura | - | - | * | * | fácilmente inflamable, no se dispone de valores oficiales |

Tabla 4.2-1: Disolventes empleados para la limpieza y el desengrasado de puntos de medida con bandas extensométricas

Algunos de estos disolventes se pueden adquirir “técnicamente puros” o “químicamente puros”. Técnicamente puros significa que están libres de impurezas sólidas. Químicamente puros, frecuentemente indicado con las frases para análisis o p.a. o de alta pureza se refiere a que están libres de impurezas solubles siempre dentro de las posibilidades de las técnicas disponibles. A pesar de su coste elevado, los disolventes químicamente puros son los únicos que se deben emplear para la limpieza de puntos de fijación. Durante la aplicación se debe tener un esmero extremo para asegurar que no se contaminan por falta de cuidado, haciéndolos inservibles.

4.2.2 Materiales de soldadura

4.2.2.1 Dispositivos para soldar

El mejor método de conexión eléctrica entre la banda y el cable de medición y también el más utilizado es la soldadura. Los resultados que se obtienen con las técnicas de engastado (conexión a presión) también son excelentes. Las conexiones de enganche con terminal de tornillo de fijación pueden provocar variaciones de punto cero a causa de la resistencia de contacto variable. Las conexiones con enchufes todavía son más críticas; en este caso solamente se han podido alcanzar resultados aceptables para las de más alta calidad con elementos de contacto bañados en oro y sólo cuando su correcto funcionamiento no se ve perturbado por contaminación. En principio una conexión normal de baja tensión resulta inadecuada debido a la pequeña tensión y corriente de la señal medida.

Los requisitos de la industria electrónica han provocado la fabricación de excelentes soldadores que puede aprovechar el usuario de bandas extensométricas. Se aconsejan los soldadores de baja tensión, controlados por temperatura, alimentados de la red a través de una unidad de control. Son preferibles los modelos con un preciso regulador electrónico continuo y una gran potencia de calentamiento de unos 50W, ya que el calor extraído de la punta del soldador se compensa inmediatamente durante la soldadura. La región de temperatura regulable de un soldador habitual está entre los 120°C y 400°C, que es suficiente para los metales de aportación para soldadura blanda empleados con las bandas extensométricas.

La elección de la punta del soldador adecuada para el ámbito de aplicación es decisiva para producir un punto de soldadura fiable. La punta no debería ser puntiaguda ya que que resultaría inadecuada porque el flujo de calor del soldador a la unión es insuficiente y porque el metal de aportación para soldadura se retrae hacia arriba alejándose de la unión, provocando que ésta se quede con poca soldadura. Lo correcto es una superficie pequeña adecuada al tamaño del objeto a soldar. La idoneidad de un soldador recto o uno doblado depende únicamente de la accesibilidad de la unión.

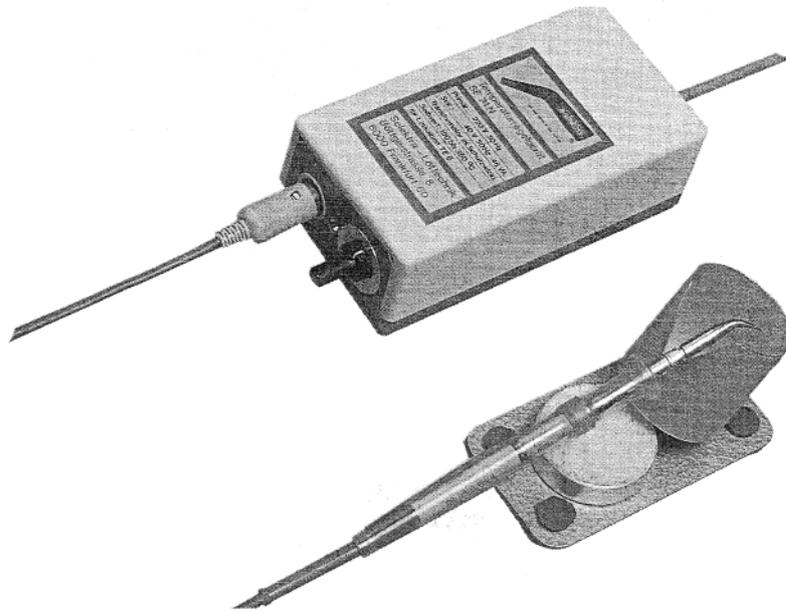


Figura 4.2-1: Estación de soldadura regulable

Las puntas de soldar templadas/aceptan solamente aceptan la soldadura en ciertos puntos haciendo que ésta quede concentrada en el lugar utilizado para soldar. El tratamiento también previene la oxidación de la punta.

4.2.2.2 Metales de aportación y fundentes

Existen numerosas soldaduras blandas disponibles. Según los componentes de la aleación y de su composición cumplen ciertos requisitos de forma óptima. Para la medición con bandas extensométricas se necesitan buenas propiedades humectantes y de fluidez, así como una temperatura de fusión apropiada para las condiciones de la aplicación. La temperatura de servicio no debería superar los 30 K por debajo de la temperatura de fusión de la soldadura teniendo en cuenta la resistencia mecánica de un punto de soldadura con una aleación de composición eutéctica.

Pequeñas concentraciones de cobre impiden la degradación excesiva de la punta de soldadura (soldadura con protección de cobre). Las soldaduras con una gran resistencia a la fatiga presentan ventajas para cargas dinámicas continuadas. La tabla 4.2-2 muestra algunas soldaduras blandas habitualmente empleadas. Hay información complementaria en la norma DIN 1707 y en las listas de los productores de soldadura. Para altas temperaturas se aconsejan uniones soldadas a altas temperaturas. Las soldaduras duras se deben emplear con precaución debido a su naturaleza reactiva.

Los agentes fundentes tienen la función de liberar los puntos de soldadura de óxido y de impedir la reoxidación durante el proceso de soldeo. De esta manera proporcionan las condiciones necesarias para una unión perfecta entre la soldadura y las piezas a soldar.

| Denominación del metal de aportación | Composición de la aleación % | | | | | Rango de fusión °C | Temperatura de soldeo recomendada °C | Observaciones |
|--|------------------------------|------|----|-----|----|--------------------|--------------------------------------|--|
| | Sn | Pb | Cu | Ag | In | | | |
| Soldadura con núcleo de fundente DIN 8516 L-Sn 60Pb Cu2/F-SW32 (C3) 3,5; Ø 1mm | 60 | 38 | 2 | | | 183 ... 190 | 230 | Pedir Nr.1-LOT Núcleo de resina de colofonia, antioxidante |
| Doduco-Ceramin Soldadura blanda CN306 Ø 0,8mm, macizo | 1 | 97,5 | | 1,5 | | 304 ... 310 | 360 | AMI GmbH Doduco Altgefäll 12 75181 Pforzheim; soldadura estable a altas temperaturas |
| Soldadura al plomo-indio 50/50 Ø 0,5mm, macizo | | 50 | | | 50 | 190 ... 210 | 250 | Buena resistencia a la fatiga, con cargas dinámicas permanentes se recomienda utilizar las de bandas extensométricas LY41, LY 43; Contenido en el lote de soldadura WL 521; Pedir-Nr.: 214.04-2009 |

Tabla 4.2-2: Ejemplos de soldadura blanda

La elección del agente fundente se debe hacer dependiendo del tipo de soldadura (P.ej. soldadura blanda), del tipo de materiales a soldar (p.ej. metales pesados) y del tipo de objeto a soldar (p.ej. circuitos eléctricos).

Los fundentes altamente corrosivos son cómodos porque posibilitan la soldadura de superficies poco limpias pero su desventaja es que los residuos causan una corrosión inevitable y reducen las propiedades aislantes de las secciones de aislamiento. Por eso son inadecuados para la soldadura de circuitos eléctricos. En ningún caso se debe emplear pasta de soldadura.

Los fundentes no corrosivos se fabrican a base de resinas naturales o modificadas. La más famosa entre ellas es la colofonia. Se emplea como núcleo de fundente en los hilos tubulares de soldadura o como líquido disuelta en alcohol. Estos fundentes suaves requieren una limpieza y pulido esmerados de la zona a soldar inmediatamente antes. Son muy convenientes para la aplicación de bandas extensométricas.

Nota:

El núcleo de fundente en los hilos tubulares de soldadura puede consistir tanto de un agente fundente corrosivo como de uno no corrosivo. Antes de la aplicación hay que determinar con certeza el tipo de agente fundente. La norma DIN 8511: fundentes para la soldadura de materiales metálicos” informa sobre los distintos agentes fundentes.

La segunda pagina trata los fundentes para la soldadura blanda de metales pesados. Los fundentes con la denominación de tipo F-SW 31 y F-SW 32 no dejan residuos corrosivos. La denominación „fundente libre de ácido“ es poco clara y provoca confusiones. Por eso este término no se debe utilizar, según DIN 8511.

4.2.3 Métodos de conexión

4.2.3.1 Bornes para soldar

Los bornes para soldar tienen la función de proporcionar un punto firme de fijación entre la banda extensométrica y el cable. Se fabrican en distintas versiones, diseños y tamaños. La figura 4.2-2 muestra algunos ejemplos comunes.

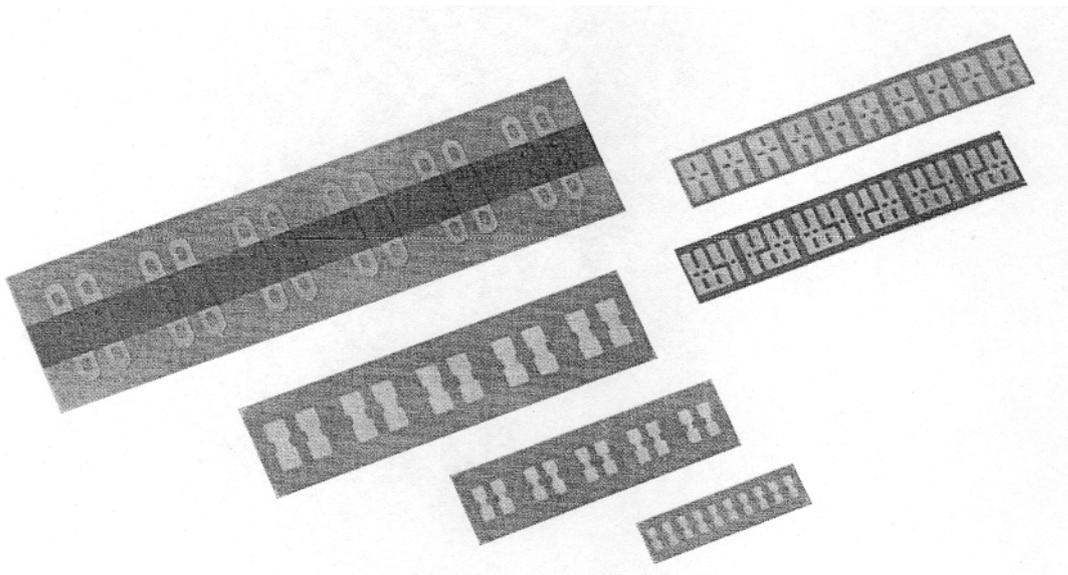


Figura 4.2-2: Formas de bornes para soldar (Foto HBM)

Los bornes para soldar se fijan inmediatamente contiguos a la banda, normalmente empleando adhesivo (simultáneamente a la fijación de la banda) o para las versiones para altas temperaturas mediante puntos de soldadura. Los detalles acerca de las formas, los datos técnicos y los ámbitos de aplicación se pueden obtener de las publicaciones de los fabricantes y [4-1].

4.2.3.2 El material de cableado

El éxito de la medición también depende de la elección de las conexiones correctas, es decir del cableado de conexión adecuado para cada caso específico. Las conexiones no solamente deben transferir la señal de medición entre los distintos componentes de la cadena de medición p.ej.: transductor-amplificador-registrador, sino que también deben reducir el ruido y las señales de interferencia a un mínimo, y resistir las cargas durante el servicio así como las condiciones del entorno.

Las conexiones cortas, p.ej. el cableado interno de un transductor, se puede realizar con puentes de hilo macizo o cable trenzado con una sección transversal relativamente fina. El aislamiento del conductor debe ser adecuado para soportar las temperaturas que se producirán. Además se requiere una buena soldabilidad del hilo. Para situaciones extremas de carga dinámica del objeto a medir los cables resistentes a la vibración pueden resultar ventajosos. Este tipo de cable consiste de un conductor formado por muchos hilos finos trenzados enfundados en un aislamiento flexible.

Las conexiones y cables de más longitud deben cumplir otros requisitos adicionales. El objetivo en este caso es mantener la resistencia eléctrica dentro de unos márgenes aceptables a base de la correcta elección de la sección transversal del conductor. Se recomiendan cables de baja capacitancia para el funcionamiento con frecuencia portadora o para el funcionamiento con tensión eléctrica continua si se tienen que transferir señales de alta frecuencia. Una malla de cobre trenzado envolviendo el conductor ayuda a mantener las capacidades de los conductores simétricas entre si, y proporciona protección creando una pantalla contra los efectos de interferencia de campos eléctricos. Para el apantallamiento contra campos magnéticos se colocan los cables en tubos de acero blindado o similares (véanse apartados 7.2 y 7.4).

Las influencias electrostáticas surgen cuando el campo eléctrico de una fuente de tensión eléctrica tiene efectos capacitivos sobre el circuito de medición. La mejor protección contra este fenómeno es cubrir el cable con una pantalla cerrada. Un trenzado de hilos de cobre suele proporcionar apantallamiento suficiente. Los cables especiales para medición tienen este tipo de pantalla. La conexión a tierra de la pantalla es importante, ya que una pantalla con un potencial libre no tiene ningún efecto.

Las influencias electromagnéticas surgen cuando los cables del circuito de medición transcurren cerca de cables portadores de corriente o equipamiento eléctrico p.ej: generadores, estaciones de soldadura, transformadores, motores, etc.

Debido al principio del transformador se inducen tensiones eléctricas en el cableado de medición. Se logra una protección eficiente trenzado los hilos, de hecho los cables se fabrican con los hilos trenzados. Cuando esto no es suficiente, se pueden obtener mejoras mediante apantallamientos adicionales con tubos de acero blindado o tubos de gas/agua.

El método de frecuencias portadoras (véase apartado 5.3) es mucho menos sensible a las interferencias aisladas que el método de tensión continua ya que se eliminan todas las frecuencias de interferencia que están fuera de la banda de transmisión.

| | PVC Cloruro di polivinile | PE Polietilene (densità inferiore) | PTFE Politetrafluoretilene (Teflon) | PUR Poliuretano | SIR Gomma silicica | PA Poliamide | PI Polimide | Rivestimento a spirale in fibra di vetro | Tubo in fibra di vetro | Perle di stearite |
|---|---------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------------|--|------------------------|-------------------|
| Resistenza alla temperatura costante °C | -50 ... 80 | -80 ... 80 | -100 ... 260 | -60 ... 90 | -80 ... 180 | -55 ... 105 | -269 ... 275 | -269 ... 280 | -269 ... 400 | > 600 |
| Resistenza a 20°C Ocm | 90 | 100 | 260 | 100 | 250 | 125 | 400 | 480 | 600 | |
| Speciale resistenza di massa a 20°C Ocm | 10^{14} ... 10^{15} | 10^{16} | $>10^{18}$ | 10^{11} ... 10^{14} | 10^{14} ... 10^{15} | 10^{12} ... 10^{13} | 10^{14} ... 10^{16} | - | - | |
| Resistenza all'abrasione | media | media | mediocre | molto buona | mediocre | molto buona | molto buona | mediocre | mediocre | molto buona |
| Combustibilità (1) | sv | ef | nef | sv | sv | sef | sv | nef | nef | nef |
| Resistenza agli acidi e lisciviazione | buona | molto buona | 2) molto buona | poco | 3) buona | A.: inconstante L.: buona | A.: molto buona L.: mediocre | buona | buona | molto buona |
| olio | mediocre | buona | molto buona | buona | inconstante | buona | buona | molto buona | molto buona | molto buona |
| solventi | Generalmente instabile | Generalmente instabile | molto buona | inconstante | condizionale | buona | perlopiù | molto buona | molto buona | molto buona |
| Assorbimento d'acqua | 1 ... 2 | 0 | 0 | 1,4 | 0,1 ... 0,4 | 2 ... 10 | 1 ... 3 | - | - | - |

- 1) sv = autoextinguibile
 ef = inflamabile
 sef = difficilmente inflamabile
 nef = no inflamabile
- 2) no resistente a alcalinos y flúor fundidos.
- 3) no resistente en vapor por encima de 130 °C

Tabla 4.2-3: Los materiales aislantes de conductores y cables más importantes y algunos datos técnicos

Es importante que el aislamiento del hilo conductor tenga un valor elevado, que no cambie significativamente debido a la temperatura, la humedad etc. Al conectar un circuito en medio puente o puente completo mucho depende de mantener la simetría entre las ramas adyacentes del puente, tanto respecto a la resistencia eléctrica como a la capacitancia entre los hilos (véanse apartados 7.2 hasta 7.4). La cobertura del cable debe proteger contra las influencias del exterior y ser resistente contra la humedad, el agua, aceite, productos químicos, altas y bajas temperaturas, así como cargas mecánicas. Los cables de medición disponibles habitualmente cumplen la mayoría de requisitos pero desafortunadamente no existe ninguno que los cumpla todos.

En la tabla 4.2-3 se muestran los materiales aislantes más importantes junto con algunas informaciones y características.

4.2.4 Métodos de control

Cada punto de medición con bandas extensométricas se debe comprobar que su instalación es correcta antes de la medición. Se deben realizar controles visuales y eléctricos.

4.2.4.1 Inspección visual

Como instrumento de control basta una lupa de unos 6 aumentos. Con ella se pueden encontrar fallos en el adhesivo, tales como:

- burbujas de aire bajo la banda,
- bordes mal pegados,
- conexiones soldadas no fiables,
- restos de fundente y
- errores en la orientación

Esta inspección se puede completar con la prueba de la „goma de borrar“ [4-1].

4.2.4.2 Continuidad eléctrica: resistencia

En este caso basta con un buen ohmímetro, capaz de medir la resistencia de la banda con un error $< 0,25\%$. La prueba tiene la función de mostrar si se ha alterado la resistencia de la banda a causa de una instalación inadecuada. Los ohmímetros con una resolución de $0,1\ \Omega$ son útiles también para seleccionar antes de instalarlas las bandas según la coincidencia de sus resistencias. Este método se aconseja en la construcción de transductores para obtener una buena simetría del circuito puente.

En los sistemas de medición convencionales con una alimentación de tensión eléctrica constante, la resistencia eléctrica de los cables de conexión de la banda provoca una reducción aparente de su sensibilidad. Por eso esta resistencia se debe medir y su valor se debe utilizar para corregir el valor de la medición, véase apartado 7.2. La resistencia eléctrica de los cables se compensa automáticamente en los instrumentos que operan según el principio del “circuito Kreuzer” para circuitos de medio puente o de puente completo o según el principio del “circuito Kreuzer extendido” para circuitos de un cuarto de puente, de medio puente o de puente completo. Con estos instrumentos la corrección no es necesaria, véase apartado 7.3.

4.2.4.3 La resistencia de aislamiento

Para la medición de la resistencia de aislamiento entre la banda y el objeto a medir así como entre los hilos de un cable y el apantallamiento, resultan adecuados los instrumentos medidores resistencia de aislamiento (mega-ohmímetros) con una tensión de prueba inferior a 50 voltios y con un rango de medición de hasta 20000 M Ω o superior. Los generadores de manivela resultan inadecuados.



Figura 4.2-3: Ohmímetro de bolsillo TO 3 para la medición de la resistencia de continuidad eléctrica y de la resistencia de aislamiento de las bandas extensométricas instaladas

Bajo ciertas circunstancias se observa una dependencia de la resistencia de aislamiento con el tipo de tensión de prueba, esto es si es continua o alterna, y de su frecuencia si es alterna. El nivel de tensión aplicada y la temperatura del aislador a medir también muestran una influencia. Por lo tanto, especialmente a temperaturas elevadas en agentes de fijación de cerámica, ocurren migraciones de iones que provocan errores en la medición [4-4].

Sin embargo, también hay otros materiales aislantes afectados por este fenómeno. Existe un método simple para determinar la resistencia de aislamiento de la banda bajo las condiciones de la medición. Para ello se emplea el amplificador. De algún modo este método es la inversión de la calibración por derivación descrita en el apartado 6.3. Se conecta la resistencia de aislamiento a determinar en paralelo a un puente completo o medio puente y se observa la indicación de deformación; es una medida de la resistencia de aislamiento.

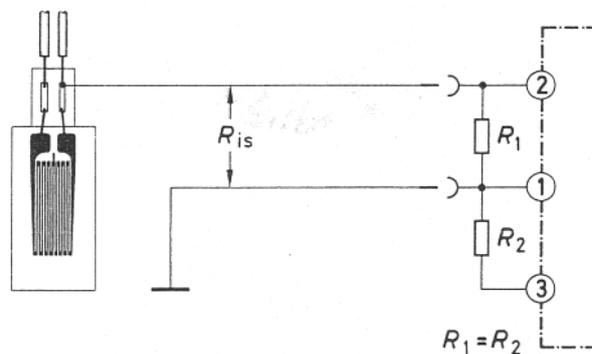


Figura 4.2-4: Circuito para la medición de la resistencia de aislamiento de una banda con un amplificador de medida. El circuito auxiliar R_1, R_2 también se puede formar como puente completo

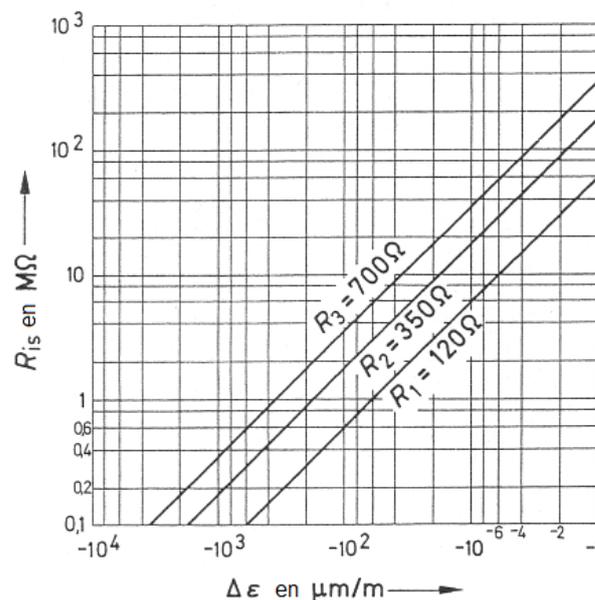


Figura 4.2-5: Diagrama para determinar la resistencia de aislamiento de una aplicación de banda extensométrica

La Figura 4.2-4 muestra el circuito a utilizar. El circuito auxiliar desequilibrado por la resistencia de aislamiento R_{ins} (representado aquí como un circuito de medio puente R_1, R_2) puede estar formado por bandas extensométricas o resistencias eléctricas estables.

El diagrama 4.2-5 se utiliza para la determinación simple de la resistencia de aislamiento R_{is} . En él se muestran las resistencias eléctricas de algunas bandas habitualmente disponibles como parámetro. Se basa en la ecuación (6.3-9a) con un factor de banda $k = 2$. El valor de la deformación se encuentra sobre la escala $\Delta\varepsilon$, se debe identificar el punto donde la línea vertical corta el parámetro relevante y entonces se puede leer el valor de la resistencia de aislamiento R_{is} en $M\Omega$ en la escala correspondiente.

4.3 La protección del punto de medición

Los puntos de medición con bandas extensométricas se deben proteger contra daños mecánicos o químicos. Incluso en condiciones óptimas, p.ej. en el laboratorio, las características del punto de medición se ven influenciadas con el paso del tiempo si no se toman las medidas adecuadas. Dichas medidas de protección son tan diversas como lo son las influencias que afectan al punto de medición. En el laboratorio, donde el aire es uniformemente seco una pequeña protección contra el contacto, p.ej. la humedad de la mano, es suficiente mientras que en un duro tren de laminación habría que ampliar la protección contra vapor, agua, aceite, calor e influencias mecánicas. En el primer caso bastaría una simple capa de laca o barniz, en el segundo caso hay que crear una barrera de varias capas de distintos materiales de protección.

Sin embargo debe quedar claro que una protección absoluta durante un periodo de tiempo ilimitado solamente se puede lograr con un blindaje metálico hermético. Por eso, éste es el método empleado para los transductores comercialmente disponibles, siempre que su función lo permita. El resto de métodos de cobertura, incluidos los mejores, proporcionan una protección temporal. La duración del periodo de protección depende tanto del tipo de material de cobertura y del grosor de la capa, como del tipo de medio contra el que se requiere la protección. Dependiendo de las circunstancias la duración de la protección puede ser de unas horas o de hasta varios años. La duración del periodo de protección requerida depende no solo de la vida útil del punto de medición, sino también de la duración de las mediciones, de si existe la posibilidad de realizar controles esporádicos del punto cero y de la resistencia de aislamiento y finalmente de la precisión exigida.

Una pequeña alteración del punto de medición, p.ej. por la infiltración de humedad por difusión, se muestra en primer lugar porque hay una variación del punto cero. Si estas alteraciones son controlables, p.ej. reduciendo la carga sobre el objeto de medición y se mantienen dentro de los márgenes aceptables (p.ej. $100 \dots 200 \mu\text{m/m}$), se puede continuar midiendo con la precisión suficiente para el análisis experimental de tensiones. La resistencia de aislamiento es otro indicador para el estado de un punto de medición. Una reducción de la resistencia de aislamiento de $1000 M\Omega$ a $1 M\Omega$ implica una variación de punto cero de $-60 \mu\text{m/m}$ para una banda de 120Ω , de $-175 \mu\text{m/m}$ para una banda de 350Ω y de $-350 \mu\text{m/m}$ para una banda de 700Ω .

Esto significa que el límite inferior de la resistencia de aislamiento también depende de la resistencia de la rejilla de la banda empleada.

Una degradación más significativa del punto de medición puede ocurrir a causa de la difusión de sustancias corrosivas o conductoras. La corrosión se favorece con el uso de tensión continua para la alimentación la banda. Se ha observado que se pueden formar celdas galvánicas cuya tensión se superpone a la señal de medición, ocasionando importantes errores. Finalmente no se puede pasar por alto que los requisitos para la protección del punto de medición son igualmente válidos para las conexiones y los cables.

Las medidas de protección deben ser efectivas, pero sin cambiar las características del objeto a medir. Los objetos finos no se pueden hacer tan rígidos que se restrinja su capacidad de deformación, los sintéticos no se deben tratar con sustancias que contienen disolventes.

No es posible dar instrucciones para cada caso concreto. No obstante las observaciones siguientes deberían ser suficiente para poder tomar las medidas oportunas ante la mayoría de problemas habituales.

Durante **la selección** de los materiales de protección se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- las condiciones del entorno,
- la duración de la medición y la vida útil que requiere el punto de medición,
- la precisión de medición exigida,
- la rigidización inadmisibles del objeto de medición
- la sustancia en contacto con el punto de medición y el cableado debe tener una resistencia de aislamiento muy elevada y no debe provocar reacciones químicas o corrosión.

Durante **la aplicación** hay que tener en cuenta lo siguiente:

- El punto de medición debe estar en perfectas condiciones antes de ser cubierto. La humedad encerrada, la transpiración, los residuos de fundente etc. son bombas de relojería que más pronto o más tarde llevan a errores de medida o incluso a la pérdida total del punto de medición. Hay que tener en cuenta que un agente de cobertura efectivo no solo previene de la humedad exterior sino también retiene la interior.
- El punto de medición se debe cubrir inmediatamente después de la aplicación
- Si la aplicación de una banda en condiciones de humedad es inevitable, p.ej por falta de tiempo, malas condiciones atmosféricas o porque la habitación es húmeda, se debe calentar el objeto a medir en un horno a unos 110°C ... 120°C si es posible. Si no lo es, se debe secar el punto de medición con aire caliente p.ej.con un secador.
- El agente de cobertura debe tener buen contacto con el área alrededor del punto de medición. Las imperfecciones y los capilares formados por rayas y hendiduras proporcionan puntos de entrada para sustancias agresivas o corrosivas.

La fijación entre la cobertura y el contorno debe permanecer inalterada durante toda la vida útil del punto de medición. Por este motivo el contorno debe estar igual de limpio que la zona de fijación de la banda y debe sobrepasar los bordes del adhesivo entre 1 y 2 cm. La transpiración de las huellas dactilares puede provocar oxido en la parte interior de la cobertura y a pesar de una buena fijación inicial la cobertura resultaría ineficaz.

- Las entradas de los cables se deben sellar herméticamente con un esmero extremo. Los agentes de cobertura tienen que rodear el cable por todos los lados, es decir también por debajo, para que no se formen canales o capilares a través de los cuales se pueda colar la humedad hacia el interior de la cubierta. Si los cables constan de varios hilos hay que incrustar cada hilo por separado en la masa de cobertura junto con una parte de la funda del cable.

La figura 4.3-1 muestra un ejemplo.

- Las instrucciones de uso de los agentes comercialmente disponibles de cobertura para puntos de medición con bandas extensométricas ss deben seguir a rajatabla.

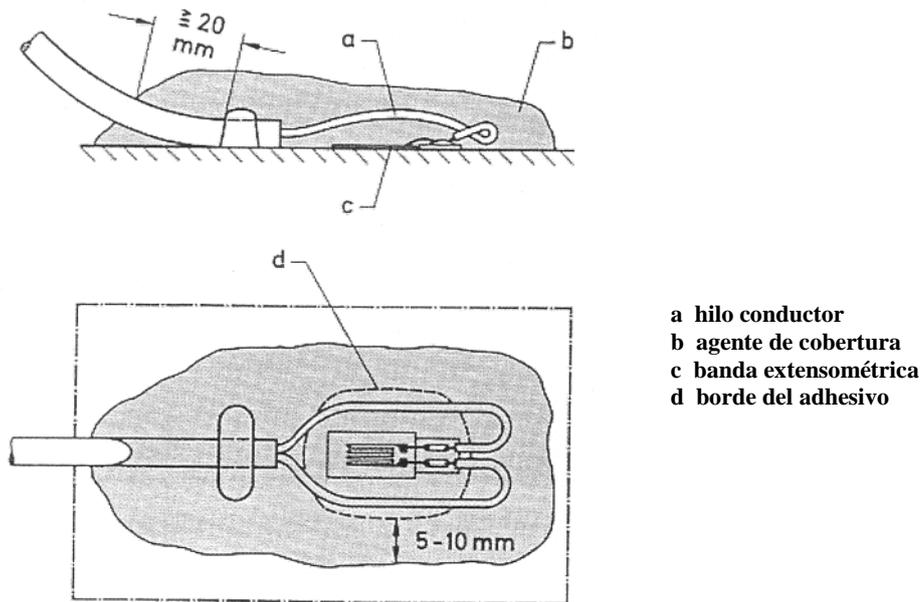


Figura 4.3-1: Ejemplo para la protección de un punto de medición de bandas extensométricas

Agentes de cobertura comunes:

- Barniz de poliuretano PU 100
 Barniz de secado al aire. Adecuado para una protección ligera de puntos de medida, contra contacto (transpiración), y polvo, en unos niveles de humedad atmosférica normales con ligeras variaciones (p.ej.condiciones de laboratorio).

Adecuado también como capa aislante por debajo de otras sustancias de cobertura. Resistente al aceite. Buena resistencia a la abrasión. Rango de temperaturas soportado - 30 ... + 100 °C, en periodos cortos 120 °C.

- Barniz de caucho nitrílico NG 150

Barniz de secado al aire , contiene metiletilcetona como disolvente. Ámbito de aplicación y características similares a PU 120. Resistente al aceite y la gasolina, empleado preferentemente para contacto con gases licuados (pero no oxígeno). Rango de temperaturas soportadas: - 269 ... + 150 °C.

- Barniz de silicona SL 450

Barniz de secado en caliente. Preferentemente para la protección de masillas de cerámica contra la absorción de humedad y suciedad en aplicaciones de alta temperatura.

Rango de temperaturas soportadas -50 ... + 450 °C.

- AK 22, masilla permanentemente plástica

Ventajas:

Aplicación simple por amasado. Excelente adhesión debido a la fuerte autoadherencia. Muy buena protección contra humedad y agua, también bajo el agua, protección en agua a aprox 20°C hasta 1 año, en agua a 75°C hasta 3 semanas, en agua presurizada hasta 400 bar durante unos días, valores límite desconocidos. Muy buena resistencia a las condiciones meteorológicas. La protección a largo plazo se puede mejorar considerablemente amasando una hoja de aluminio como bloqueo para la difusión. Se puede proporcionar protección mecánica contra golpes de manera simple apretando una plancha metálica sobre la masilla autoadherente. Rango de temperaturas soportadas en aire - 50 ... + 170 °C. Capacidad almacenamiento ilimitado.

Desventajas:

No es resistente al aceite y disolventes. No se puede emplear en la superficie de objetos expuestos a grandes fuerzas centrífugas.

- ABM 75, masilla permanentemente plástica con hoja de aluminio

Ámbito de aplicaciones y propiedades similar al AK 22 con las excepciones siguientes : El material en forma de placa viene ya forrado con una capa de papel de aluminio de 50 µm que actúa como barrera contra la difusión. El rango de temperaturas es de - 200 ... + 75 °C, donde el límite superior se determina por el inicio de la fluencia del material.

- SG 250, caucho de silicona transparente sin de disolvente

Adecuado para la protección contra la humedad y los efectos meteorológicos, y contra el agua a temperatura ambiente. Parcialmente resistente al aceite. La capa de caucho proporciona una buena protección mecánica. Rango de temperaturas soportadas: - 70 ... + 180 °C, durante poco tiempo hasta 250 °C; el material se mantiene elástico en este rango.

- Vaselina, poco refinada (sin blanquear)

Ventajas:

Económica, fácil de aplicar, muy buena protección contra la humedad y el agua, también aplicable bajo el agua.

Desventajas:

No utilizable en aguas turbulentas, ni lluvia o salpicaduras de agua. En zonas abiertas se puede eliminar fácilmente sin querer con un trapo, se derrite a unos 50°C.

- Grasa de policlorotrifluoretileno (nombre comercial: Halocarbon[®])

Ventajas:

Utilizable a temperaturas de hasta 200°C, por lo demás tiene las mismas ventajas y desventajas que la vaselina

- Grasa de silicona

El uso de grasa de silicona no es aconsejable a pesar de sus buenas propiedades ya que se transfiere fácilmente a las herramientas y desde ahí a otros objetos. Debido a su excelente capacidad de adhesión es muy difícil eliminar sus restos por completo. Es un buen agente de separación, de manera que el más mínimo rastro impide el pegado correcto de la banda extensométrica.

- Cera microcristalina, cera de abeja

Buena protección contra la humedad e influencias atmosféricas. Se debe aplicar en estado fundido sobre el objeto caliente para conseguir una buena adhesión. Poca protección mecánica. Rango de temperaturas soportadas aprox: - 70 ... + 100 °C.

- Caucho de polisulfuro

Material de dos componentes que produce una masa gomosa con excelente resistencia a los disolventes y al envejecimiento. Además destaca por su resistencia a las influencias medioambientales. Rango de temperaturas soportadas - 50 ... + 120 °C.

- Resina epoxi (nombre comercial: Araldid[®], UHU-plus[®] entre otros)

Para cubrir las de bandas extensométricas son adecuadas las mezclas poco duras.

El material disponible bajo el nombre comercial UHU-plus, una resina de dos componentes es adecuado para la protección contra el aceite, el carburante para motores, ácidos diluidos, álcalis diluidos, varios disolventes y además proporciona una buena protección mecánica. Los límites de temperatura dependen de las condiciones de endurecimiento (en frío o en caliente).

- Tiras adhesivas de aluminio

Las tiras adhesivas cubiertas con una capa de papel de aluminio forman una buena barrera contra el vapor de agua (barrera contra la difusión). Son adecuadas como protección adicional del punto de medición, para mejorar las características de otros materiales de cobertura, sobre todo las características de envejecimiento. El papel de aluminio es también muy adecuado como protección adicional de los cables de medición, que en muchos casos son el elemento más débil dentro del punto de medición.

- Líquidos para la protección de la banda extensométrica instalada

Algunos de los problemas que presenta la protección del punto de medición se pueden resolver empleando líquidos aislantes.

Un ejemplo sería la aplicación interna en un pequeño recipiente, al que se quiere someter a una prueba de presión. Si se puede emplear otro medio de presión, en lugar del medio común, el agua, se solucionan muchos problemas de forma muy simple. Un requisito es que el medio de presión seleccionado posea buenas características de aislamiento y que este libre de aditivos que puedan atacar la banda extensométrica.

Los siguientes líquidos son adecuados:

aceite libre de agua y ácido,
queroseno,
gasolina pura.

Este método de proteger el punto de medición con líquidos se ha empleado también con éxito para la protección de puntos de medición permanentes donde se llenó una cápsula envolvente con el medio de protección. En este contexto existe otro medio de protección excelente:

el poliisobutileno, en versiones de baja masa molecular que fluyen como el aceite o que son más viscosas como la miel (nombre comercial: Oppanol[®] B3, B10 y B15).

- Medios combinados

No siempre basta con un solo material de cobertura para proporcionar una protección suficiente del punto de medición. Los agentes de cobertura AK 22 y ABM 75 (compuestos plásticos con papel de aluminio) son algunos ejemplos del empleo de varios materiales combinados. Si se quiere dar protección adicional a la lámina metálica se puede aplicar p.ej. una capa de caucho de silicona SG 250.

A menudo hay varios medios que actúan sobre el punto de medición, p.ej. aceite y agua. En estos casos, por ejemplo se debería aplicar el material soluble en aceite ABM 75 directamente sobre la banda, la segunda capa siendo el papel de aluminio como barrera contra la difusión. Adicionalmente se debería aplicar una capa de resina epoxi resistente al aceite.

Con medios indefinidos tales como el agua del mar es necesaria una protección de varias capas. Como capas superiores, que no entran en contacto con la banda también se pueden emplear otras sustancias distintas a las descritas anteriormente como p.ej. asfalto. No deben corroer ni alterar químicamente las capas inferiores, pero tampoco tienen que cumplir ningún requisito específico respecto a su resistencia de aislamiento.

El problema de la protección de un punto de medición es tan amplio que únicamente se puede dar una visión general. En casos críticos se recomienda una investigación preliminar con ensayos bajo condiciones de servicio.

5 El circuito de puente de Wheatstone

Sir Charles Wheatstone (1802 - 1875), un científico Inglés, describió en el año 1843 (1-2) un circuito mediante el cual era posible la medición precisa de una resistencia eléctrica. Este circuito se conoce ahora con el nombre de “circuito de puente de Wheatstone”.

El puente de Wheatstone se puede emplear de distintas maneras para la medición de resistencias eléctricas.

- Para determinar el valor absoluto de una resistencia a través de la comparación con una resistencia conocida.
- Para determinar las variaciones relativas de la resistencia.

Para las técnicas de medición con bandas extensométricas se emplea el segundo método que permite medir con gran precisión las variaciones relativas de la resistencia de la banda que suelen tener magnitudes entre 10^{-4} y $10^{-2} \Omega/\Omega$. El extraordinariamente versátil circuito de Wheatstone será descrito a continuación exclusivamente en relación con su uso para la medición con bandas extensométricas.

5.1 El esquema de conexiones del puente de Wheatstone

La figura 5.1-1 muestra dos esquemas distintos del puente de Wheatstone que sin embargo son eléctricamente equivalentes:

La figura 5.1-1a muestra la representación típica en forma de rombo empleada por Wheatstone;

La figura 5.1-1b es una representación del mismo circuito más clara para una persona inexperta en electrónica.

Los cuatro brazos o ramas del circuito están formados por las resistencias R_1 a R_4 . Los bornes 2 y 3 del puente señalan las conexiones para la tensión de alimentación del puente U_B ; la tensión de salida U_A , es decir la señal de medición se conecta en los bornes 1 y 4.

La alimentación del puente normalmente es una tensión estabilizada continua o alterna (U_B). En algunas ocasiones se emplea una fuente de corriente, p.ej. el método de doble corriente.

Las ventajas del circuito alimentado con una fuente de tensión respecto a su corrección automática de las desviaciones de linealidad de las características de la banda (véase el apartado 3.3-6) están demostradas en [5-1 hasta 5-4] y probadas con un experimento en [3-29].

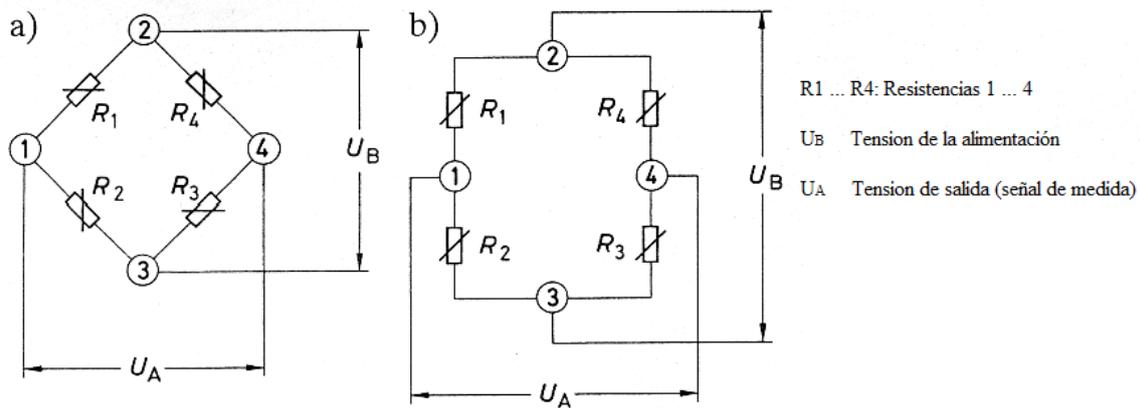


Figura 5.1-1: Distintas representaciones del circuito de puente de Wheatstone

Otra ventaja es la insensibilidad respecto a las tolerancias de la resistencia de la banda. Por estos motivos las explicaciones a continuación se refieren al circuito alimentado por una fuente de tensión.

Nota:

No existe una regla mayoritariamente aceptada para la designación de los componentes del puente y de sus conexiones. Esto lleva a que en la literatura se encuentren todo tipo de designaciones y esto se refleja en las ecuaciones del puente: Por eso es imprescindible entender las designaciones e índices en las ecuaciones en relación con la situación de los componentes del puente en el circuito para evitar interpretaciones erróneas. En esta publicación se emplearán exclusivamente las designaciones de la figura 5.1-1.

5.2 El principio del circuito de puente de Wheatstone

Si se aplica una tensión de alimentación U_B a los puntos de alimentación del puente 2 y 3, ésta se dividirá entre las dos mitades del puente, R_1, R_2 y R_4, R_3 según la relación entre las resistencias del puente, es decir que cada mitad del puente forma un divisor de tensión, véase la figura 5.2-1.

En el análisis siguiente del circuito se supone que la resistencia R_6 de la fuente de alimentación es insignificamente pequeña y que la resistencia del instrumento para la medición de la tensión de salida del puente es muy grande y no ocasiona ninguna carga en el circuito. Esta suposición es razonable ya que en general los instrumentos empleados en la práctica para la medición con bandas extensométricas cumplen normalmente estos requisitos.

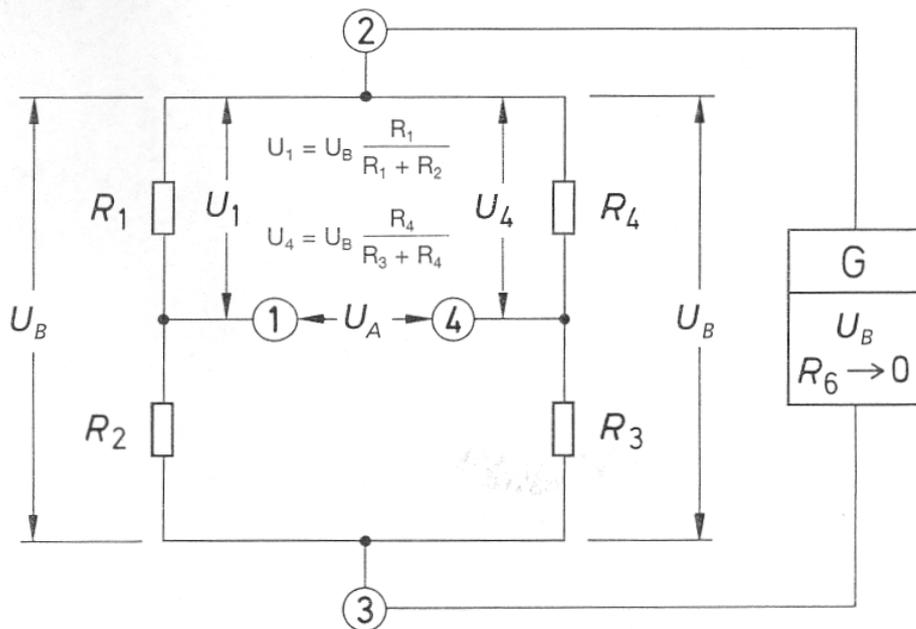


Figura 5.2-1: Funzionamento del ponte di Wheatstone alimentat in tensione (Spiegazioni nel testo.)

La tensione parziale u_1 del punto 1 si calcola in:

$$u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_B, \quad (5.2-1)$$

E la corrente parziale u_4 del punto 4 diventa:

$$u_4 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot U_B. \quad (5.2-2)$$

La differenza fra le due tensione parziali e la corrente di uscita del ponte U_A

$$U_A = U_B \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = (u_1 - u_4). \quad (5.2-3)$$

Se si definisce come “sbilanciamento del ponte” la tensione di uscita relativa U_A/U allora l’equazione (5.2-3) appare nella forma

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (5.2-3a)$$

oppure

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}. \quad (5.2-3b)$$

Ci sono due condizioni per le quali $U_A = 0$:

a) Quando tutte le resistenze del ponte sono grandi uguali.

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R,$$

b) Quando tutti i rapporti di resistenza delle due metà del ponte sono uguali.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}.$$

Per questi casi vale

$$\frac{U_A}{U_B} = 0,$$

il collegamento a ponte è “bilanciato”.

Se le resistenze del ponte da R_1 a R_4 variano di ΔR , allora il ponte non è “bilanciato” e fra i punti 1 e 4, si crea una tensione di uscita U_A . L’equazione (5.2-3^a) diventa:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4}. \quad (5.2-4)$$

Con l’equazione (5.2-4) si possono calcolare tutte le condizioni del ponte indifferentemente da quale resistenza di base R possedano i singoli rami. Nella pratica però tutti i rami del ponte devono possedere la stessa resistenza, perlomeno le due metà ponte R_1, R_2 e R_3, R_4 devono avere resistenze uguali. Deviazioni nell’ambito delle tolleranze della resistenza negli estensimetri non hanno conseguenze sulla precisione di misurazione. Anche con differenze del 5 % fra R_1 e R_2 l’errore rimane sotto lo 0,1%.

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (5.2-5)$$

Nella tecnica estensimetrica i valori delle variazioni di resistenza degli estensimetri metallici sono generalmente molto piccoli, nell’ordine di grandezze di ca. il 10%. È perciò consueto usare al posto dell’equazione (5.2-4) l’equazione approssimata che, con questa premessa, fornisce risultati sufficientemente precisi per le esigenze pratiche.

La formula approssimata mostra inoltre che è la variazione di resistenza relativa di ogni braccio del Ponte ad essere determinante per il bilanciamento del ponte stesso e non la variazione di resistenza assoluta. Invertendo l'equazione (3.3-1) si ottiene

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (5.2-6)$$

Per cui l'equazione (5.2-5) può essere espressa nella forma.

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (5.2-7)$$

(Gli indici corrispondono alla numerazione dei lati del ponte.)

En las ecuaciones. (5.2-3) y (5.2-14) se supone a continuación que todas las resistencias del puente varían. Esto ocurre p.ej. con los transductores o con los componentes que realizan funciones similares de medición. En el análisis experimental de tensiones casi nunca se da el caso. Normalmente solo una de las ramas del puente está formada por bandas activas, el resto son resistencias complementarias. Para su diferenciación habitualmente se emplean designaciones como cuarto de puente, medio puente, puente de dos cuartos y puente diagonal o puente completo. La figura 5.2-2 muestra las distintas formas.

Las resistencias complementarias deben cumplir exigentes requisitos respecto a su estabilidad con el tiempo y a su independencia de la temperatura. Las resistencias de laminas metálicas muy estables han demostrado ser adecuadas. Algunos amplificadores de medición contienen este tipo de circuitos complementarios. En lugar de estas resistencias pasivas se pueden emplear bandas de compensación como resistencias complementarias para el puente. Las condiciones que debe cumplir una banda de compensación están descritas en el apartado 7.1-3.

El capítulo 8 explica como se utilizan los distintos tipos de puente.

A partir de las ecuaciones (5.2-12 y 5.2-14) se puede ver como las variaciones de la resistencia y las deformaciones que las ocasionan contribuyen al desequilibrio del puente, y con ello a la señal de medición, con signos distintos.

Al conectar un instrumento diseñado para mediciones de deformación con bandas ocurre lo siguiente:

Indicación positiva, si $\epsilon_1 > \epsilon_2$ y/o $\epsilon_3 > \epsilon_4$

Indicación negativa, si $\epsilon_1 < \epsilon_2$ y/o $\epsilon_3 < \epsilon_4$

Nota:

Los símbolos „mayor que“ ($>$) y „menor que“ ($<$) son en sentido algebraico, no se refieren a las magnitudes!

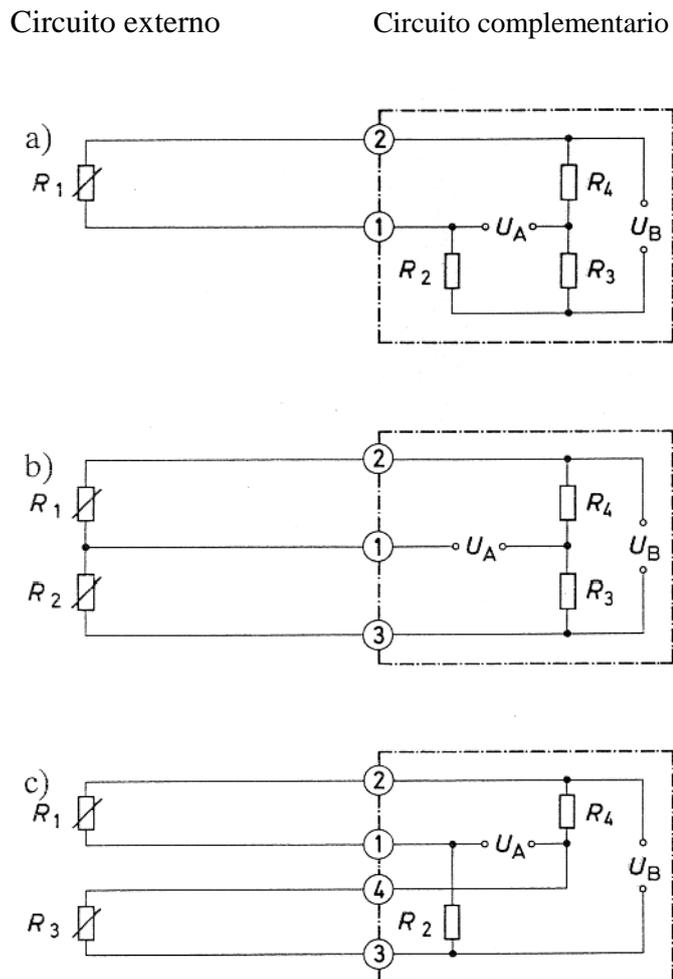
Hay que tener en cuenta que:

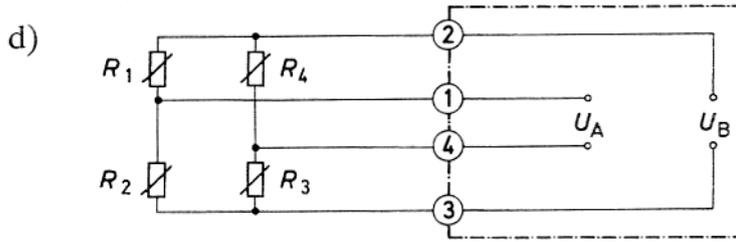
Las magnitudes de los cambios en bandas adyacentes se restan si tienen el mismo signo (ejemplo de aplicación: compensación de temperatura, apartado 7.1).

Se suman si tienen signos opuestos (ejemplo de aplicación: amplificación de señal, p.ej. en transductores etc., apartado 8.4).

Figura 5.2-2: Distintas aplicaciones del puente de Wheatstone para la medición con bandas extensimétricas

- a) cuarto de puente b) medio de puente
c) puente de 2/4 o puente diagonal





d) puente completo

Dependiendo de si las variaciones de resistencia ocurren en una o más ramas del puente y según su valor y signo puede ocurrir una desviación de la linealidad del desequilibrio del puente más o menos grande.

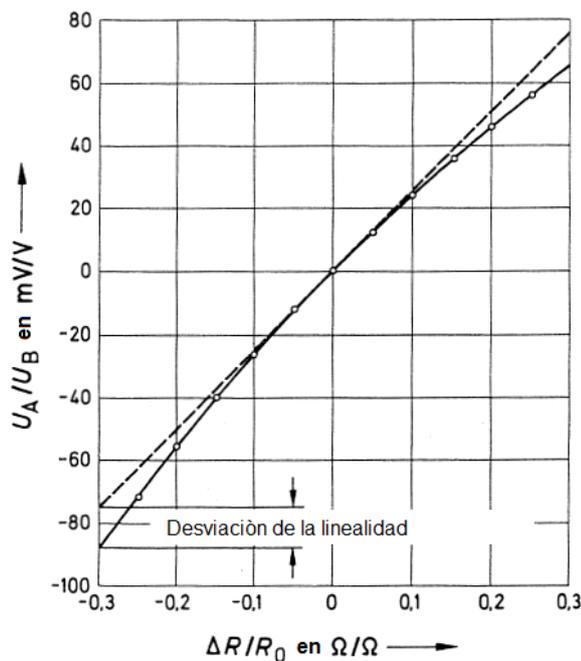


Figura 5.2-3: Curva característica del circuito de puente de Wheatstone en la configuración „cuarto de puente „, según la ecuación (5.2-8) y comparación con la curva característica obtenida con la ecuación aproximada (5.2-9)

La curva característica es altamente lineal si la suma de las variaciones de resistencia en ambas mitades del puente $\Delta R_1 + \Delta R_2$ y $\Delta R_4 + \Delta R_3$ es igual a cero. Se produce una desviación máxima de la linealidad en el circuito de cuarto de puente y de la misma forma en el puente de dos cuartos o diagonal. La figura 5.2-3 muestra la dependencia del desequilibrio del puente U_A/U_B con la variación relativa de la resistencia $\Delta R/R$ en el brazo 1, calculada con la ecuación.

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{\Delta R}{2(2R_0 + \Delta R)}. \quad (5.2-8)$$

Suponiendo que $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R = R_0$. Para la comparación se muestra la curva como línea discontinua la característica lineal calculada a partir de la fórmula aproximada.

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{\Delta R}{4R_0} \quad (5.2-9)$$

La desviación de la linealidad del circuito de cuarto de puente se describe en la literatura como la mayor desventaja del circuito de puente de Wheatstone alimentado por una tensión constante respecto al alimentado por una corriente constante. Sin embargo no se considera que para grandes deformaciones la misma banda exhibe una desviación de la linealidad casi de igual magnitud pero de signo opuesto. Véase el apartado 3.3.6. La comparación con la figura 3.3-18 muestra que ambas desviaciones se compensan casi por completo [3-29] mientras que la alimentación por corriente no es capaz de esta autocompensación.[5-1, 5-4].

5.3 La alimentación del puente y la amplificación de la tensión de salida

El circuito de puente de Wheatstone puede alimentarse tanto con tensión continua como con tensión alterna. El tipo de alimentación tiene que considerarse en conjunto con el sistema de amplificación empleado para amplificar la tensión de salida. Los amplificadores comercialmente disponibles contienen una fuente de tensión constante para alimentar el circuito puente. Normalmente se puede variar la tensión de alimentación entre valores fijos de 1 a 10V, de manera que se puede adaptar a la carga eléctrica permisible de la banda, véase apartado 3.3.8.

Además los amplificadores tienen opciones de ajuste para la compensación de punto cero y para regular la amplificación a los valores deseados. En un amplificador de medida de tensión alterna o de frecuencias portadora, si se requiere también hay medios para compensar la fase.

La función principal del amplificador es elevar la señal de salida desde la región de los milivoltios hasta los voltios.

La tensión amplificada de la señal debe ser una reproducción, a ser posible libre de errores, de la variable medida. Interferencias, tales como tensiones térmicas o interferencias de la red no deben influir sobre ella.

Los distintos tipos y variaciones de amplificadores son tan numerosos que exceden los márgenes de este libro. Las informaciones detalladas se pueden encontrar en los catálogos o en la literatura relevante. A continuación se mencionaran brevemente las diferencias entre ambos sistemas.

El amplificador de medida de tensión directa contiene un generador que proporciona una tensión directa estabilizada para alimentar el circuito puente. El amplificador de tensión directa al que se le pasa la tensión de salida del circuito puente amplifica tanto señales estáticas como dinámicas de altas frecuencias. Para la medición de cantidades mecánicas, en la mayoría de casos basta un límite superior de 10 kHz ya que un objeto mecánico tiene una masa finita y este límite solo se supera en casos extremos para los cuales se puede ajustar el amplificador de tensión directa si es necesario. Un ejemplo de un proceso mecánico de altas frecuencias está descrito en el apartado 3.3.7.2.

Normalmente las altas frecuencias son causadas por impulsos de interferencia que se deberían mantener alejados de la señal de medición. La desventaja del método de tensión directa es que se amplifican las interferencias causadas por campos eléctricos o magnéticos, así como las tensiones térmicas y galvánicas y aparecen como error en los resultados de la medición. Para evitar estas interferencias son necesarios apantallamientos eléctricos o magnéticos. Los errores causados por tensiones térmicas se pueden reconocer cambiando el signo de la tensión de alimentación y se tienen que eliminar matemáticamente.

En el método de frecuencias portadoras un generador proporciona una tensión alterna estabilizada tanto en tensión como en frecuencia para alimentar el circuito puente. Si el circuito se desequilibra p.ej. a causa de una deformación de la banda se produce una tensión de salida igual que en el método de tensión directa pero en este caso es una tensión alterna cuya amplitud es proporcional al desequilibrio del puente(amplitud modulada). El amplificador está diseñado de manera que solo amplifica la frecuencia de la tensión de alimentación y unas bandas laterales relativamente estrechas y no admite frecuencias por encima o por debajo de ellas. De este modo todas las porciones de tensión directa que interfieren como p.ej. las tensiones térmicas que se forman en el circuito de medición quedan completamente eliminadas. Se escoge la frecuencia portadora de manera que las tensiones alternas que interfieren, tales como las ocasionadas por la frecuencia de red y sus ondas armónicas así como las interferencias por pulsos de alta frecuencia tampoco influyan en la señal de medición. Las frecuencias portadoras comunes son 225 Hz y 5 kHz. Los amplificadores de 225 HzFP son adecuados para la medición de procesos estáticos o casiestáticos de asta 9HZ, los amplificadores de 5 kHz-FP pueden tratar procesos estáticos y dinámicos de hasta 1 kHz (con 1 dB de atenuación de la amplitud).

En [5-5] hay un estudio comparativo entre estos dos métodos más extenso y detallado desde el punto de vista de su aplicación que la breve descripción anterior.

6 El calibrado del equipo de medición

La tarea de la medición es obtener el valor de una cantidad física y representarlo como valor numérico o en forma cifrada. Para obtener el valor de medición se emplea instrumentación que admite la cantidad medida a su entrada (transductor) y que a su salida proporciona la señal de medición. Los componentes del equipo de medición se acoplan el uno al otro como los miembros de una cadena, de ahí la expresión “cadena de medición”.

El usuario del equipo de medición lógicamente espera que haya una correspondencia entre el valor de medición obtenido y el valor de la cantidad medida. Esta correspondencia se alcanza a través del “calibrado” de la equipo de medición. En Alemania los términos y designaciones que deben emplearse están descritos en [6-1] (véase la figura 6.0-1).

El principio del calibrado sera explicado a partir de un simple ejemplo, el calibrado de una báscula de muelle, véase la figura 6.0-2.

Se marca la posición de la aguja sin carga sobre la escala identificándola con un „0“. A continuación se suspenden varias cargas Q de peso conocido del muelle marcando los valores correspondientes sobre la escala. Finalmente se puede determinar el peso de otros objetos, mientras la aguja se encuentre en la zona calibrada de la escala. Los valores entre las distintas marcas se pueden determinar por estimación con más o menos exactitud.

La precisión del calibrado depende de la precisión de los pesos de calibrado empleados

La correspondencia entre el valor indicado sobre la escala y la cantidad de medición no tiene porque consistir en los mismos valores numéricos ya que es suficiente si hay una relación con un factor de proporcionalidad conocido. Este factor de proporcionalidad también se determina a través del calibrado y debe considerarse al realizar la medición.

$$\text{Valor de medición} = \text{valor sobre la escala} \times \text{factor.}$$

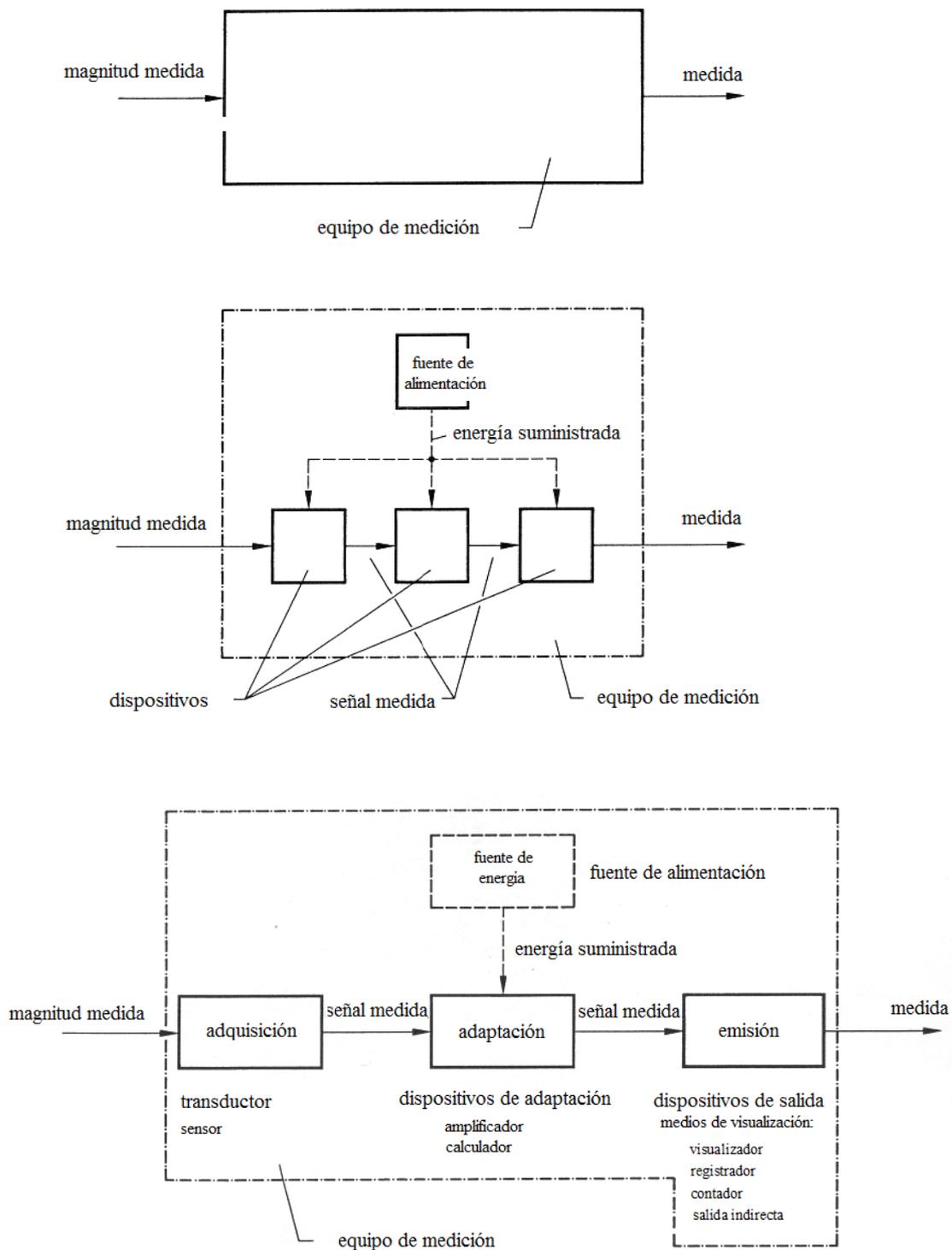


Figura 6.0-1: La definición de la expresión „equipo de medición“ y la designación de sus componentes según [6-1]

Tal y como muestra este simple ejemplo el calibrado requiere que la cantidad medida se transfiera a la bascula de muelle con un valor conocido y numéricamente preciso. Durante el proceso se tiene que tener en cuenta tanto el correcto posicionamiento de la bascula como la libre actuación de la variable de medición, en este caso los pesos.

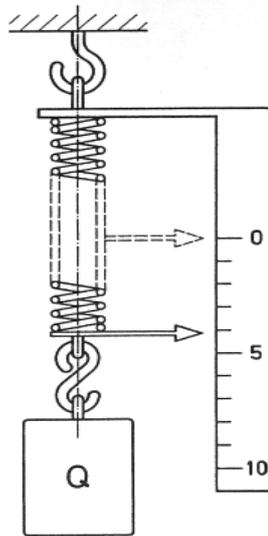


Figura 6.0-2: Esquema para el calibrado de una balanza de muelle

Estas condiciones se deben tener en cuenta para todo proceso de calibrado.

En los equipos de medición mecánicos al calibrar generalmente se transfiere la cantidad de medición de forma directa p.ej. suspendiendo pesos o midiendo una distancia. Para los métodos de medición eléctricos se emplea el mismo procedimiento siempre que es posible. Surgen problemas cuando no se dispone de un estándar para calibrar p.ej. un peso calibrado o un metro calibrado etc. o cuando hay otro tipo de dificultades técnicas. Este método directo de calibrado no se puede emplear para la medición de la tensión con bandas extensométricas. El motivo es que no se puede generar un valor de deformación calibrada sin que esto conlleve un gran esfuerzo. En su lugar se emplean otros métodos:

- el calibrado a partir de una señal proporcionada por un amplificador de medida, véase el apartado 6.2,
- el calibrado directo por derivación, véase el apartado 6.3,
- el calibrado con un instrumento de calibrado, véase el apartado 6.4.

6.1 El principio operativo de los instrumentos de compensación y calibrado en un amplificador de medida

Los equipos disponibles bajo el nombre de „amplificador de medida“ , véase el apartado 5.3 si están diseñados para la medición con bandas extensométricas contienen, además del

amplificador en si, numerosos instrumentos tales como p.ej. circuitos complementarios para el puente, la unidad de alimentación, controles para seleccionar el rango de medición, instrumentos de calibrado y varios instrumentos de compensación y de ajuste, que son indispensables para el trabajo con bandas.

Por consiguiente, la expresión „amplificador de medida“ incluye mucho más aparte del amplificador. Los componentes del amplificador en si tienen una característica estrictamente lineal debido a su diseño, véase la figura 6.1-1a. Esto es válido tanto para los amplificadores de la frecuencia portadora como para los amplificadores de tensión directa. La tensión de salida U_y es más grande que la tensión de entrada U_x por el factor de amplificación V . Si se conecta un circuito puente con una o más bandas al amplificador se observa que, debido a pequeñas diferencias inevitables entre las resistencias de las ramas del puente, el circuito ya se encuentra en desequilibrio. Por tanto al amplificador ya le llega una tensión de salida del circuito puente aunque la variable de medición (la deformación, el peso, el par de giro etc.) aun no este actuando. A esta señal la denominaremos „señal de tara“ de acuerdo con la terminología de las tecnologías de pesado (también es común el término señal cero ya que la variable de medición tiene el valor cero).

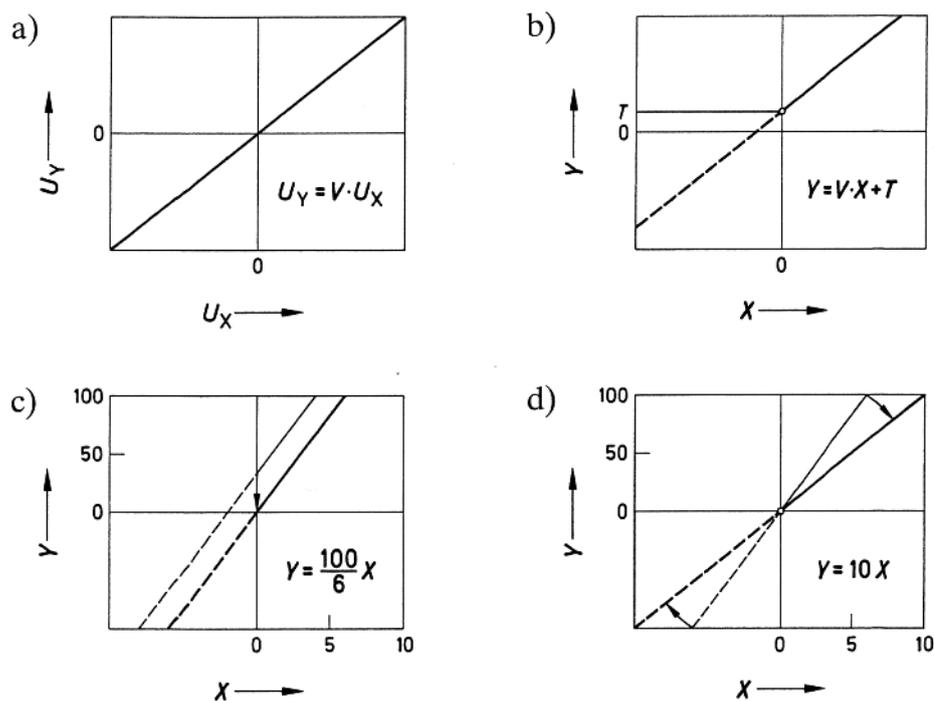
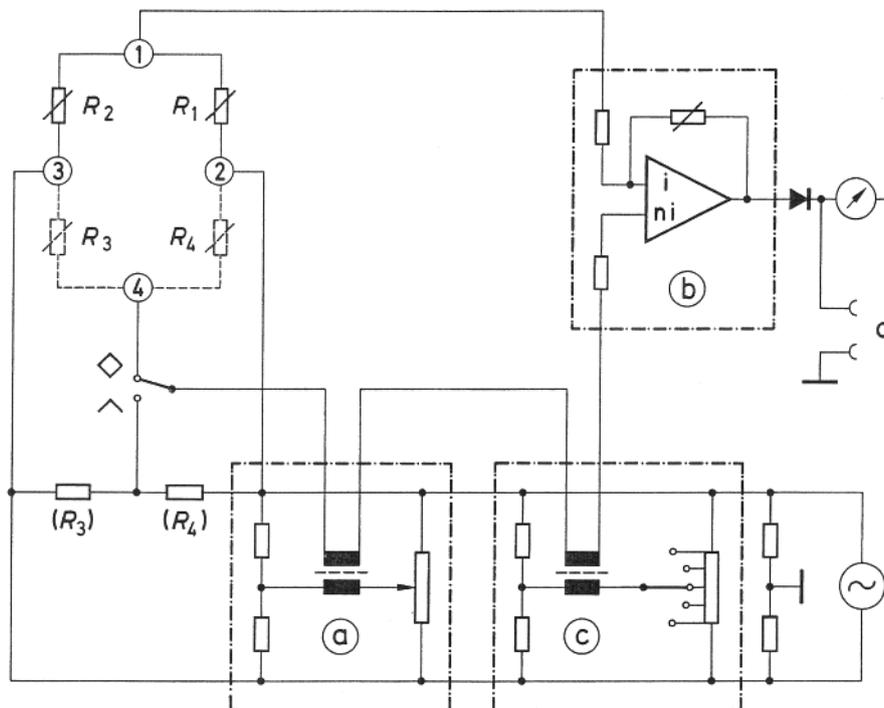


Figura 6.1-1: El principio de los elementos de compensación de un amplificador

- a) La característica del amplificador
- b) Los efectos de la señal de tara T sobre la relación entre la variable de medición X y el valor representado Y (desviación del punto cero)
- c) Cancelación de la señal de tara con ayuda de la compensación de punto cero
- d) Ajuste para una relación en números enteros entre la cantidad de medición y el valor indicado en la pantalla con ayuda del dispositivo de ajuste del grado de amplificación

La característica del amplificador está desplazada por el valor de la señal de tara T , véase la figura 6.1-1b; el desplazamiento puede ser positivo o negativo.

Con la ayuda de un dispositivo de compensación, conocido como compensación de punto cero, compensación de magnitud o compensación R , se puede corregir la indicación de la señal de tara, de manera que la señal indicada Y tenga un valor proporcional a la señal de medida X , véase la figura 6.1-1c. No obstante la relación numérica entre la cantidad de medida y el valor indicado, el factor de amplificación V sigue siendo arbitrario. A través de un ajuste del grado de amplificación se puede alcanzar una relación en números enteros entre la cantidad de medida y el valor indicado en la pantalla, siempre dentro de ciertos límites. En el esquema de la figura 6.1-1d aparece la variación de la amplificación como giro de la curva característica entorno al punto cero.



- a** señal acoplada aditivamente para la compensación del punto cero
- b** regulación de la amplificación para el ajuste de la sensibilidad
- c** generación de una señal de magnitud definida para el calibrado independiente del amplificador de medida.
- d** salida de la señal para su procesamiento externo

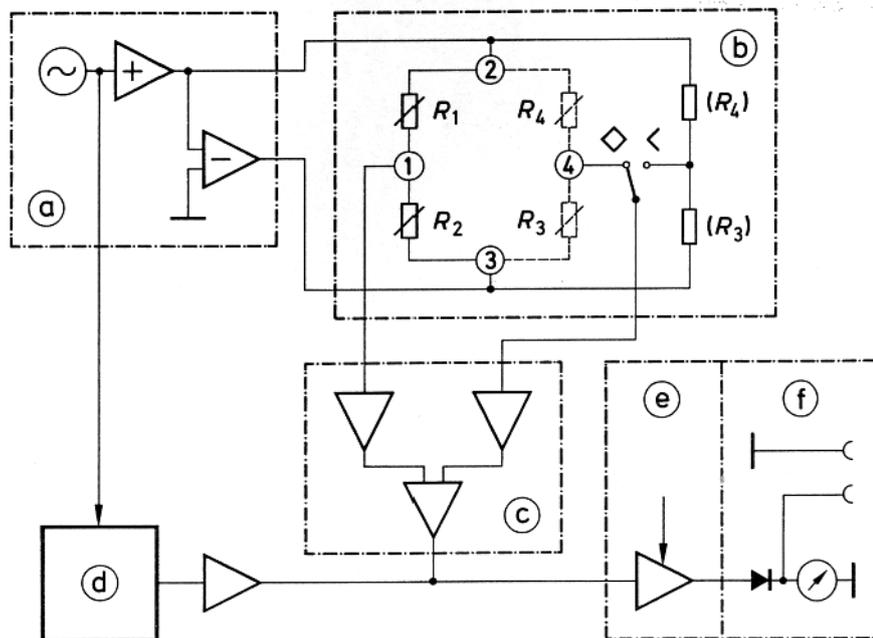
Figura 6.1-2: Circuito de los dispositivos de compensación y de ajuste de un amplificador de frecuencias portadoras (versión antigua)

La figura 6.1-2 muestra un ejemplo del principio operativo de un dispositivo de compensación y ajuste. Aunque este circuito está anticuado y ha sido sustituido por otros más modernos sirve para explicar el principio.

Una tensión auxiliar regulable mediante un potenciómetro (a) se acopla aditivamente al circuito y sirve para la compensación de las tensiones de la señal del circuito de entrada, el circuito de puente de wheatstone, que surgen debido a una asimetría o una carga de tara. La señal de compensación, que puede ser positiva o negativa según se requiera, compensa la diferencia entre el punto cero de la variable de medida y el punto cero de la señal y por tanto no es necesario realizar correcciones. En la práctica la compensación del punto cero generalmente se realiza con un control discreto a escalones para los rangos alto y medio y con un control continuo para el ajuste fino.

La regulación de la amplificación (b) se realiza con un control de progresión continua por razones prácticas. A menudo el rango de la medición se puede escoger en escalones calibrados y se puede seleccionar el factor de banda k de la banda empleada. Debido a su efecto el selector de rango de medición así como el selector del factor de banda también son reguladores de la amplificación.

Junto con la señal de calibrado (c) también se pueden acoplar aditivamente otras señales con una magnitud definida al circuito. De esta forma la cadena de medición se puede calibrar desde principio a fin independientemente del transductor conectado. Este tipo de calibrado es útil si el calibrado directo del equipo de medición es imposible.



- a** fuente de alimentación, simétrica a tierra
- b** circuito del transductor y circuito complementario para circuitos de medio puente
- c** pre-amplificación
- d** dispositivo para la generación de la tensión de compensación y de calibrado.
- e** fase final del amplificador con el control de amplificación y ajuste del factor de banda k
- f** pantalla de visualización y señal de salida para el procesado externo

Figura 6.1-3: Circuito esquemático de un amplificador más moderno

La figura 6.1-3 muestra el esquema básico del circuito de un amplificador moderno. Las funciones son las mismas que en versiones anteriores, de manera que el usuario puede trabajar con el aparato como de costumbre; únicamente cambia la estructura interna aportando ventajas. La resistencia extremadamente pequeña del generador garantiza las condiciones de alimentación uniformes aunque la diferencia respecto a la resistencia interna del circuito de puente o del transductor a conectar sea grande. La preamplificación eleva la señal a un nivel superior. Una gran supresión de interferencias en modo común garantiza una buena exactitud de medición así como una mayor precisión de las tensiones de compensación y de calibrado generadas. Su acoplamiento al circuito se realiza con amplificadores operacionales, lo que supone ciertas ventajas respecto al acoplamiento con transformadores, empleado antiguamente, especialmente al conectar transductores inductivos, cuyo uso con amplificadores de frecuencia portadora es posible a partir de una frecuencia portadora de 5kHz y representa una alternativa a las aplicaciones con transductores resistivos y bandas extensométricas.

El control de amplificación incluyendo la selección del rango de medición así como el acoplamiento al factor de banda k sigue ocurriendo en la fase final del amplificador.

6.2 El calibrado utilizando la señal de calibrado del amplificador de medida

Los amplificadores diseñados para la medición con bandas extensométricas contienen un interruptor o on botón con el cual se puede introducir una señal definida en el circuito de medición. La magnitud de la señal de calibrado se puede indicar en la dimensión de la deformación, es decir $\mu\text{m}/\text{m}$ o en la del desequilibrio del puente, es decir mV/V .

Nota importante!

El calibrado con la señal de calibrado proporcionada por el amplificador no tiene en cuenta la resistencia de un largo cable entre la banda y el amplificador que provoca una reducción de la sensibilidad. De todas modos, para cables cortos aporta la suficiente precisión, véase el apartado 7.2.

Si el valor se indica en $\mu\text{m}/\text{m}$, entonces el valor solo es válido si el factor de banda k es igual a 2,0. Para factores de banda k distintos se debe seguir el procedimiento explicado en el apartado 6.5 .

Si la señal se indica en mV/V , lo siguiente es válido:

$$1\text{mV}/\text{V} \hat{=} 2000\mu\text{m}/\text{m} \text{ en } k = 2,0.$$

La derivación de esta ecuación es simple. En el apartado 6.3 se explica el desequilibrio del puente U_A/U_B a partir de la deformación de la banda.

Si en la ecuación (6.3-9) se realizan las siguientes sustituciones para $k = 2$ y para $\varepsilon = 2000 \cdot 10^{-6}$ se obtiene:

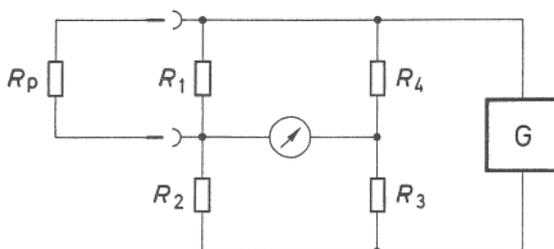
$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} k \cdot \varepsilon = \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot 2000 \cdot 10^{-6} = 1000 \cdot 10^{-6} \frac{\text{V}}{\text{V}} = 1 \frac{\text{mV}}{\text{V}}.$$

También aquí hay que seguir el procedimiento descrito en 6.5 en caso de que k difiera.

6.3 El calibrado por derivación o „shunt“

En cualquier situación en la que el equipo de medición no se puede calibrar con precisión a través del efecto directo de la variable de medición sobre el transductor, en este caso la banda, se emplea un método de sustitución. Para este método se necesita un dispositivo auxiliar con el cual se puede ejercer un efecto definido comparable al efecto producido por el mismo transductor sobre el equipo de medición.

De esta forma es posible desequilibrar el puente con una resistencia “shunt”. La figura 6.3-1 muestra el principio del calibrado por derivación o “shunt”. El circuito corresponde casi exactamente al circuito real con la banda.



$R_1...R_4$: resistencias de la rama del puente (bandas extensométricas)

R_p resistencia en paralelo „shunt“

G generador de la tensión de alimentación

Figura 6.3-1: El principio del calibrado por derivación o shunt

Para calcular el desequilibrio del puente basta con aplicar la fórmula aproximada

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (6.3-1 = 5.2-5)$$

Para el circuito de cuarto de puente $\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = 0$

y se obtiene

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (6.3-2)$$

Y también

$$R_p \parallel R \rightarrow R_r \quad (6.3-3)$$

$$R_r = \frac{R \cdot R_p}{R + R_p} \quad (6.3-4)$$

$$\Delta R = R_r - R \quad (6.3-5)$$

R_p = resistencia en paralelo (Shunt)

R = resistencia de la banda

R_r = resistencia resultante

ΔR = variación de la resistencia

A partir de aquí se obtiene

$$\begin{aligned} \frac{U_A}{U_B} &= \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{4} \cdot \frac{R_r - R}{R} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\frac{R \cdot R_p}{R + R_p} - R}{R} \\ &= \frac{1}{4} \left(\frac{R_p}{R + R_p} - 1 \right). \end{aligned} \quad (6.3-6)$$

y para la banda obtenemos, reorganizando la ecuación (3.3-1):

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (6.3-7)$$

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{4} \cdot k \cdot \varepsilon. \quad (6.3-8)$$

Si denominamos ε^* al valor de calibrado que queremos calcular, obtenemos

$$\varepsilon^* = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{k} \left(\frac{R_p}{R + R_p} - 1 \right) \quad \text{en m/m} \quad (6.3-9)$$

o bien

$$\varepsilon^* = \frac{1}{k} \left(\frac{R_p}{R + R_p} - 1 \right) \cdot 10^6 \quad \text{en } \mu\text{m/m}. \quad (6.3-9a)$$

Si una resistencia conectada en paralelo a la banda tiene un valor mil veces mayor al de la banda y asumimos un factor de banda $k = 2$ se produce un valor de calibrado de $\varepsilon^* = 499,5 \mu\text{m/m} \approx 500 \mu\text{m/m}$.

Ejemplo:

$$R_{\text{banda}} = R = 120 \Omega$$

$$R_p = 120 \text{ k}\Omega$$

$$k = 2$$

$$\varepsilon^* = \frac{1}{2} \left(\frac{120\,000}{120\,120} - 1 \right) \cdot 10^6 = -499,5 \mu\text{m/m}$$

$$\approx -500 \mu\text{m/m}$$

El signo del valor de calibrado se vuelve negativo si se realiza el shunt en las ramas del puente R_1 o R_3 , y se vuelve positivo si se realiza el shunt en las ramas R_2 o R_4 .

En los circuitos de cuarto de puente la banda se coloca siempre en la posición R_1 para que coincidan los signos de la deformación y de la pantalla de visualización. Por eso el calibrado solo es posible para la región negativa. Por lo tanto se requiere un dispositivo indicador capaz de mostrar valores negativos. el calibrado entonces también es válido para la región positiva. Para los circuitos de medio puente y de puente completo el calibrado es posible para ambas regiones, según la posición de la resistencia a la que se aplica el shunt. El ejemplo proporcionado aporta un método aproximado para el chequeo de puntos de medición con bandas extensométricas. Para el calibrado los valores de R_{banda} , R_p y k tienen que ser conocidos con la máxima precisión ya que de ellos depende la precisión del calibrado.

Al contrario que en el método descrito en 6.2, si se aplica el shunt inmediatamente junto a la banda, se incluyen todas influencias que afectan la indicación tales como p.ej. la resistencia del cable conector, la ganancia del amplificador y la sensibilidad del dispositivo indicador. Si se relaciona el valor de calibrado calculado ε^* con el valor de medición indicado ε_a se obtiene un valor de corrección F_c :

$$\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_a} = F_c. \quad (6.3-10)$$

ε_a multiplicado por F_c es igual a la deformación ε que es numéricamente equivalente al valor calibrado ε^*

$$\varepsilon_a \cdot F_c = \varepsilon^* = \varepsilon. \quad (6.3-11)$$

Se puede emplear un método más elegante si se utilizan amplificadores con amplificación ajustable, véase el apartado 6.1. Con ellos se pueden igualar numéricamente el valor de la indicación y el valor de calibrado ε^* , haciendo que el calculo de corrección sea innecesario.

6.4 El calibrado con una unidad de calibrado.

Mientras que el método descrito en 6.3 es fundamentalmente independiente de los valores de las resistencias de las bandas empleadas y de las resistencias de shunt (solo tienen que ser conocidos), las unidades de calibrado están diseñadas para funcionar con ciertas resistencias estándar, p.ej. 120 Ω , y 350 Ω . Las resistencias nominales de la unidad de calibrado y de la banda tienen que coincidir para que los efectos de los cables puedan ser registrados y eliminados. La unidad de calibrado se introduce en el circuito en lugar de la banda o el transductor, véase la figura 6.4-1, y tras el calibrado se vuelve a sustituir por la banda o el transductor.

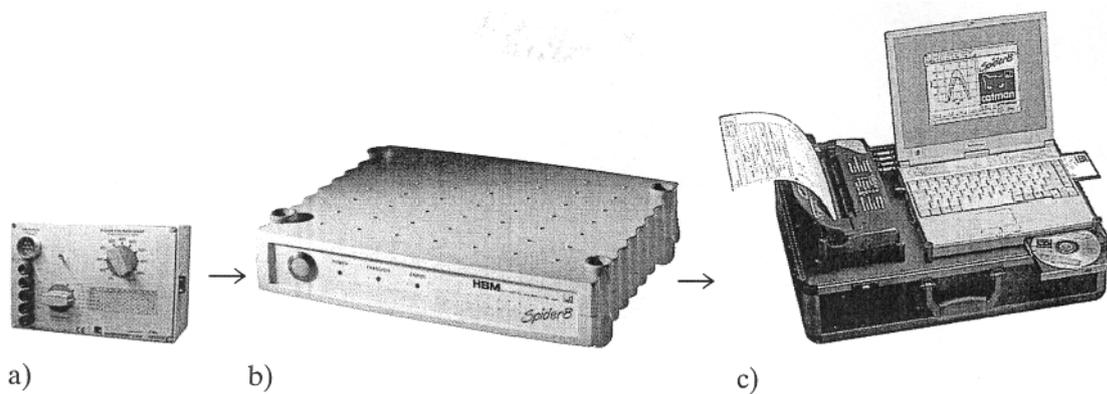


Figura 6.4-1: Colocación de la unidad de calibrado dentro del equipo de medición
a) unidad de calibrado
b) amplificador de medida
c) instrumento indicador

Las unidades de calibrado pueden funcionar utilizando distintos métodos. El dispositivo de la figura 6.4-2 funciona según el método de shunt explicado en el apartado 6.4-3. La figura 6.4-3 muestra el esquema del circuito básico.

Con las resistencias shunt, perfectamente dimensionadas y montadas dentro de la unidad de calibrado se pueden ocasionar desequilibrios en el circuito puente de distintas magnitudes tanto positivos como negativos. Los distintos niveles de desequilibrio del puente están señalados en la escala del interruptor en mV/V. La relación entre el desequilibrio del puente U_A/U_B en mV/V y la deformación s está fijada por la equivalencia $1 \text{ mV/V} \hat{=} 2000 \mu\text{m/m}$ siendo $k = 2,0$ véase el apartado 6.2.

Si es necesario, el circuito puente de la unidad de calibrado se puede modificar con un interruptor para formar un circuito de medio puente o de puente completo. Las resistencias shunt se conectan cada una paralela a tan sólo una rama del puente. El valor indicado es negativo si se conecta paralelo a R_1 y positivo si es paralelo a R_2 . Sin embargo los circuitos de cuarto de puente también pueden ser calibrados sin más problemas. Este tipo de circuito se emplea a menudo para el análisis experimental de tensiones. En este caso se conectan los cables de conexión de la banda a los terminales 1 y 2 de la unidad de calibrado. El calibrado solo es posible en dirección negativa.

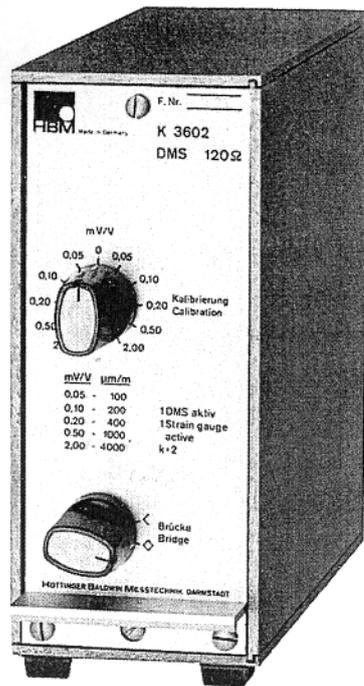


Figura 6.4-2: Unidad de calibrado K3602 con un sistema de calibrado de shunt

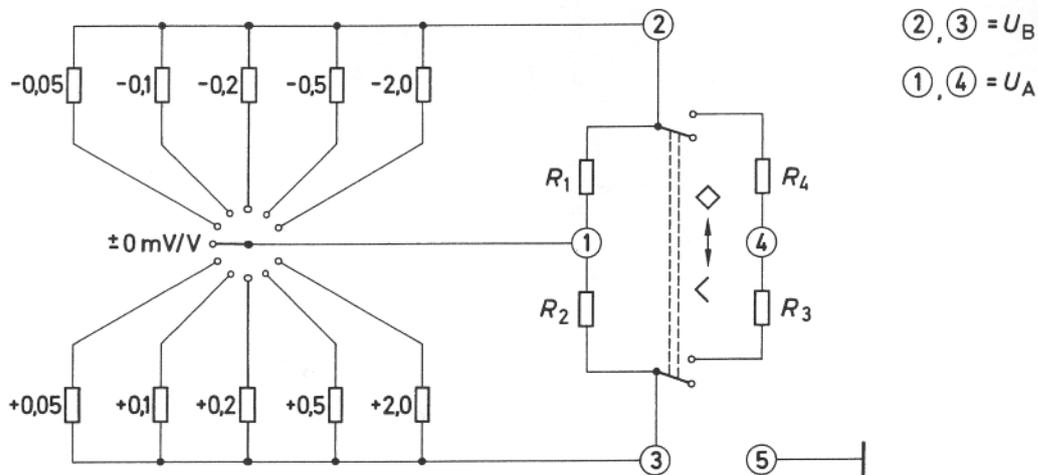


Figura 6.4-3: Circuito básico de una unidad de calibrado basada en el método de shunt

Cuando los factores de banda k reales son distintos del valor aproximado de 2 es necesario realizar correcciones. Las distintas posibilidades para corregir el calibrado o para corregir el valor de medición están descritas en el apartado 6.5.

La unidad de calibrado K 3607, véase la figura 6.4-4, funciona según otro principio distinto. Contiene un circuito de resistencias en forma de estrella muy preciso que sirve para la simulación del desequilibrio por transductores de un circuito de puente completo con bandas extensométricas.

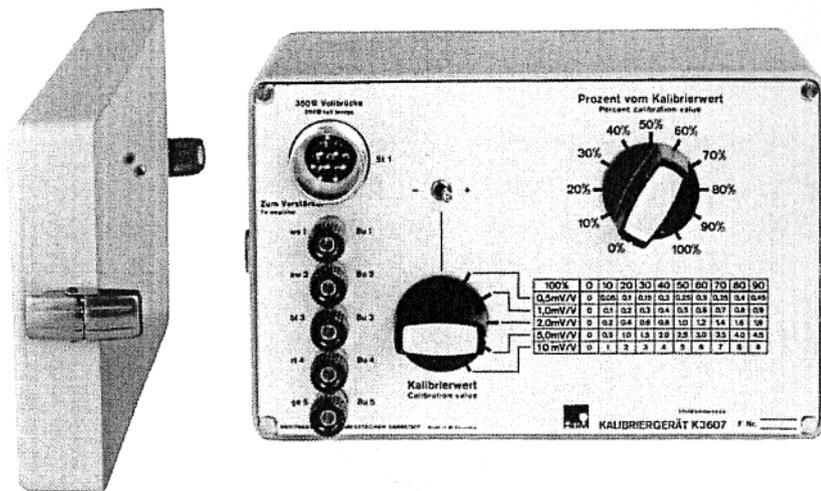


Figura 6.4-4: Unidad de calibrado K 3607

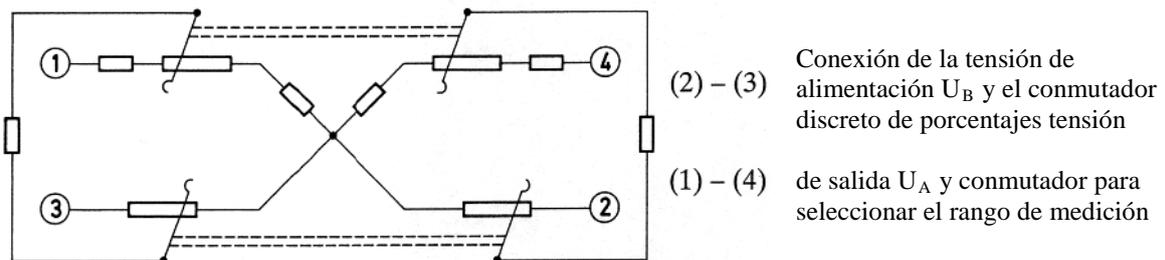


Figura 6.4-5: Circuito básico de la unidad de calibrado K 3607

Con la unidad de calibrado se pueden calibrar equipos de medición sin que el transductor correspondiente sea expuesto al efecto de la variable de medición. Está diseñado para una resistencia de puente de 350Ω de acuerdo con la resistencia de puente estándar de los transductores disponibles comercialmente. La unidad se puede utilizar para comprobar la linealidad del equipo de medición gracias a 5 niveles de rango distintos para la señal de calibrado que a su vez están subdivididos en escalones del 10 %. La auto capacitancia y la auto inductancia extremadamente pequeñas de las resistencias de precisión integradas hacen que la unidad de calibrado tenga un error de medición máximo del del 0,025.

En principio se deberían incluir los cables de conexión largos entre la banda y el amplificador en el calibrado para registrar los efectos de la resistencia y la capacitancia de los cables. Con los amplificadores apropiados la unidad de calibrado puede funcionar con circuitos de 6 hilos, véase el apartado 7.3.2).

6.5 Consideración de un factor de banda k distinto a 2

En las hojas de datos de bandas extensométricas está indicado el factor de banda k determinado para el lote en cuestión así como su tolerancia indicada como un porcentaje. Los factores de banda k reales pueden diferir en pequeños porcentajes de los valores medios indicados en la tabla 3.3.1. Las tolerancias dentro de un mismo lote de producción son mucho más estrechas y suelen estar entre 0,5 y 1 %. Esta tolerancia es válida para una banda aplicada adecuadamente y aparte de los pequeños valores de dispersión del factor de banda k contiene las influencias inevitables de la aplicación.

Para el usuario es importante calibrar el equipo de medición al factor de banda k concreto.

En los amplificadores de medida con selector de factor de banda se fija primeramente el valor en 2,0 y luego se ajusta el valor indicado mediante el control de sensibilidad

- bien para que concuerde con el valor en $\mu\text{m/m}$ de la señal de calibrado
- o bien al valor de 2000 si la señal de calibrado es de 1mV/V.

A continuación se fija el selector de factor de banda k en el valor del factor de banda real k . El selector de factor de banda modifica la amplificación según la relación $k : 2$, de manera que el calibrado para el factor de banda distinto a 2 es correcto de nuevo.

Para los amplificadores de medida sin selector de factor de banda k se calcula el valor de calibrado ε^* de la forma siguiente:

- a) Si la señal de calibrado está presente con un valor Z en $\mu\text{m/m}$:

$$\varepsilon^* = Z \cdot \frac{2}{k_{\text{DMS}}} \quad (6.5-1)$$

- b) Si la señal de calibrado corresponde al desequilibrio del puente U_A/U_B en mV/V se obtiene,

también en $\mu\text{m/m}$

$$\varepsilon^* = \frac{U_A}{U_B} \cdot 2000 \cdot \frac{2}{k_{\text{DMS}}}, \quad (6.5-2)$$

Ejemplo de a):

$$Z = 5000 \mu\text{m/m}$$

$$k_{\text{banda}} = 2,07$$

$$\varepsilon^* = 5000 \cdot \frac{2}{2,07} = 4830,9 \mu\text{m/m}.$$

Ejemplo de b):

$$\frac{U_A}{U_B} = 0,5 \text{ mV/V}$$

$$k_{\text{banda}} = 2,06$$

$$\varepsilon^* = 0,5 \cdot 2000 \cdot \frac{2}{2,06} = 970,9 \mu\text{m/m}.$$

El control de amplificación del amplificador de medida se ajusta de manera que la pantalla de visualización muestre el valor calculado para ε^* .

Si el dispositivo de visualización es digital el valor se fijara en 4831 para a) y en 971 para b).

Para un instrumento indicador analógico con una escala de 100 subdivisiones se fijaría el valor para a) en 48,3 divisiones de la escala o en 97,1 divisiones de la escala para b), (las partes decimales tienen que ser aproximadas). Las fracciones de $\mu\text{m/m}$ deben redondearse al valor entero más cercano.

7 Medidas para la reducción y/o eliminación de errores de medida

Cada medición, del tipo que sea, inevitablemente conlleva un error de medida. La persona que realiza la medición tiene la tarea de mantener el error dentro de los límites aceptables con un esfuerzo razonable. El grado hasta el cual se puede influir sobre los errores de medida depende:

- del método de medición
- de la concentración y esmero del usuario
- del conocimiento de las posibles fuentes de error y de las contramedidas adecuadas
- del esfuerzo requerido para eliminar o corregir el error.

El campo de aplicación extraordinariamente amplio de las técnicas de medición con bandas extensométricas inevitablemente también trae consigo un espectro igualmente amplio de posibles fuentes de interferencia. La tabla 7.0-1 aporta una visión general de las posibles fuentes de error o interferencia. La tabla también contiene los distintos elementos que engloban el término “punto de medición”.

A continuación no se tratarán las fuentes de error que surgen en los amplificadores de medición o en la instrumentación auxiliar. Un método esencial para prevenir la aparición de errores de medida, la calibración, ya se ha tratado en el apartado 6. Otras fuentes de error, específicas para cada equipo de medición no se pueden tratar en este libro debido a la gran variedad de equipos disponibles. El lector debe referirse a las instrucciones de uso correspondientes que contienen las informaciones necesarias para la prevención de errores. Además los errores específicos de cada instrumento suelen ser relativamente insignificantes siempre que no se cometan errores durante su manejo.

Los efectos de algunas de las influencias sobre bandas extensométricas mencionadas en la tabla 7.0-1 ya se discutieron en el capítulo 3. En ese capítulo también se dieron consejos para prevenir, reducir y corregir los errores resultantes. Los apartados siguientes describen este tipo de medidas.

Tabbella 7.0-1: Possibili fonti de errore e azioni di disturbo relative a un punto di misure con estensimetro e spiegazione del concetto “punto di misura”

| Posibles fuentes de error y efectos de interferencia | | | | | | | | |
|---|--|--|---|---|----------------------------------|--|--|---|
| Planificación | Acciones mecánicas | Temperatura | Efectos de los cables | Sobrepasar los límites permisibles | Efectos hidráulicos y neumáticos | Efectos químicos | Campos radiantes | Propiedades del componente |
| Selección del tipo de banda extensométrica, método de fijación, protección del punto de medición. Calidad de la soldadura, aislamiento. | Choque, impacto, compresión, aceleración, fatiga | Nivel, variación, velocidad de variación, periodo activo | Resistencia, capacitancia y simetría del cable, impedancia característica, aislamiento, apantallamiento | Alargamiento, rango de temperatura, número de ciclos de deformación | Presión, vacío | Humedad, agua, sustancias químicas, gases, bacterias | Neutrones, radiación gamma y rayos X, campos eléctricos y magnéticos | heterogeneidad, condiciones anisótropas, propiedades reológicas |

| Punto de medición con bandas extensométricas compuesto de | | | | | |
|---|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|
| Componente | Banda extensométrica | Agente de fijación | Conexiones eléctricas | Círculo eléctrico | Agente de protección |
| Material | Material de la rejilla de medición | Adhesivo orgánico | Hilos de unión | Cuarto de puente | Agente de cobertura |
| Propiedades adhesivas y de soldado | Material del soporte | Agente de fijación cerámico | Puntos de soldadura | Medio puente | Apantallado |
| | | Unión soldada | Cable de conexión | Puente diagonal | Blindaje |
| | | | | Puente completo | |

Tabla 7.0-1: Posibles fuentes de error e interferencias sobre puntos de medición con bandas extensométricas

7.1 Compensación de la respuesta a la temperatura

Solamente se produce una respuesta a la temperatura cuando la temperatura del objeto medido de los cables de conexión y/o del equipo de medición varía durante la medición. “Durante la medición“ significa entre el registro del valor de referencia, es decir del cero, y el registro de la medida bajo el efecto de la carga. El origen de una respuesta a la temperatura de la banda ya se describió en el apartado 3.3-4. En este apartado también se explican los principios y los límites para la compensación automática de la respuesta a la temperatura empleando bandas autocompensadas térmicamente.

Otro factor que a menudo contribuye significativamente en la respuesta a la temperatura de un punto de medición, que no siempre se puede desestimar, son las conexiones eléctricas dentro del puente. Este efecto aparece especialmente si las bandas se conectan entre si o a los amplificadores empleando cables de cierta longitud. Las posibilidades de compensación en el circuito se describen en los apartados siguientes.

El modo en que puede ocurrir una respuesta a la temperatura en los amplificadores únicamente se menciona en este párrafo. La respuesta a la pregunta de si aparece, y si lo hace hasta que punto, se encuentra en la información técnica de los distintos instrumentos.

Tal y como se indicó en la introducción de esta sección, una respuesta a la temperatura no puede ocurrir si la temperatura es constante. No obstante, en objetos expuestos a una expansión de su volumen una corriente de aire de una ventana o puerta abiertas por poco tiempo es suficiente para alterar la medición, aunque la diferencia de temperatura sea muy pequeña. En este caso la causa no es tanto la respuesta a la temperatura si no la tensión que surge en el objeto debido al enfriamiento no uniforme. Esta tensión causa deformaciones que son medidas e indicadas por la banda. Aunque en estos casos los valores medidos sean correctos, su interpretación puede resultar imposible teniendo en cuenta el objetivo de la medición, véase también el apartado 8.4.7: la medición de tensiones térmicas. Aquí las causas del error se deben corregir.

Principalmente se deben emplear bandas autocompensadas térmicamente para el coeficiente de expansión térmica del material del objeto. En los casos en los que la autocompensación de la banda es insuficiente por los motivos descritos en el apartado 3.3.4 o no hay ninguna banda disponible con el coeficiente de expansión térmica del material del objeto a medir se utilizan los métodos de compensación que ofrece el puente de Wheatstone.

El principio de compensación del puente está basado en el hecho de que las señales de interferencia de mismo signo que afectan ramas colindantes del puente contribuyen al desequilibrio del puente con signos opuestos, reduciéndose entre si y compensándose por completo si son de la misma magnitud.

El principio queda claro si se considera la ecuación (7.1-1) derivada de la ecuación (5.2-7) donde ε_a es el valor indicado de la deformación y ε_1 a ε_4 son las señales de deformación de las ramas del puente 1 a 4.

$$\varepsilon_a = \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_B} = + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4. \quad (7.1-1)$$

Las mediciones de materiales heterogéneos, p.ej. sobre materiales sintéticos reforzados con fibra, presentan problemas respecto a la respuesta a la temperatura. Las fibras de carbono y de vidrio tienen un coeficiente de expansión térmica significativamente inferior al de los materiales sintéticos que las unen. Por eso se obtienen distintos coeficientes de expansión en las direcciones longitudinal y transversal, particularmente para piezas con las fibras orientadas, con todos los valores intermedios para las direcciones entre los dos extremos. Las magnitudes de los coeficientes dependen tanto de los materiales involucrados como del grado de carga. No se pueden fabricar bandas de autocompensación térmica para este tipo de materiales. Una compensación de temperatura con bandas de autocompensación solo resulta efectiva si la banda se aplica en las mismas condiciones a un trozo del mismo material. Se tiene que prever una mayor dispersión de las características del material que la habitual para metales, y por consiguiente mayores errores residuales debidos a la respuesta a la temperatura.

7.1.1 Compensación de la respuesta a la temperatura para un circuito de cuarto de puente simple.

En el análisis experimental de tensiones y en todos los ámbitos de aplicación relacionados las bandas extensométricas se emplean casi exclusivamente en circuitos de cuarto de puente, véase el apartado 5.2, la figura 5.2-2a. Las bandas autocompensadas térmicamente ofrecen el único método utilizable para la compensación de la respuesta a la temperatura, véase el apartado 3.3.4. No obstante, la respuesta efectiva temperatura de los cables de conexión, es decir de las conexiones entre la banda y el resto del puente sigue afectando. Su origen es la dependencia de la temperatura de la resistencia eléctrica del material conductor. El coeficiente de temperatura de una resistencia eléctrica de cobre es aproximadamente 0,4%/K (de aumento de la resistencia con la temperatura). Las variaciones de resistencia debidas a la temperatura son aun mucho mayores en los materiales habitualmente empleados para altas temperaturas como las aleaciones de cromo- níquel o de platino.

Todas las variaciones de resistencia que ocurren dentro del puente provocan su desequilibrio. El puente no puede diferenciar entre las variaciones de resistencia de la banda y aquellas de los cables conectados en serie con la banda. Esta respuesta adicional a la temperatura reduce la efectividad de las bandas autocompensadas térmicamente e incluso puede llegar a anularla por completo.

La figura 7.1-1 muestra un circuito de cuarto de puente simple. Si se calientan los cables de conexión aparece una indicación aunque el punto de medición en si permanezca sin ninguna variación térmica y mecánica. El valor indicado sería positivo en la rama del puente 1 y negativo en la rama del puente 2.

El siguiente ejemplo muestra la magnitud de la respuesta a la temperatura a causa del cableado.

Ejemplo:

Un cable de cobre de 1m de longitud(es decir 0,5m de ida y 0,5m de vuelta) con una sección transversal de 0,15 mm² conectado en serie con una banda de 120 Ω causa una respuesta a la temperatura de 20μm/m si hay una variación de la temperatura de 10 K . Con una banda de 350 Ω y las mismas condiciones la respuesta a la temperatura es sólo de 7μm/m.

Por eso el circuito simple de cuarto de puente de la figura 7.1-1 únicamente se debería emplear con conexiones cortas y una temperatura más o menos constante, p.ej. en condiciones de laboratorio. Los cables largos que transcurren al aire libre y están expuestos al sol y a la Lluvia durante la medición pueden ocasionar errores de medida importantes.

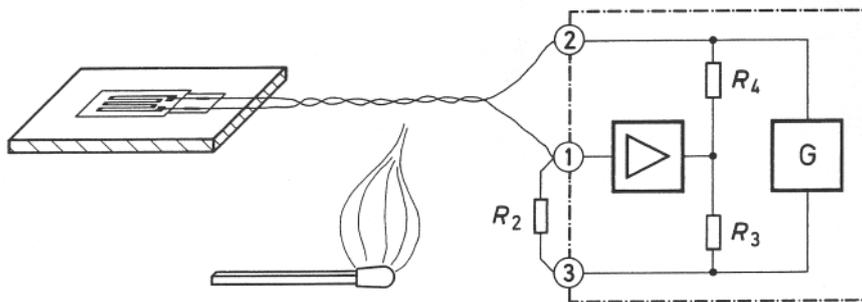


Figura 7.1-1: Respuesta a la temperatura causada por el calentamiento de los cables en un circuito de cuarto de puente simple

Cálculo de la respuesta a la temperatura a causa del calentamiento de los cables de conexión conectados en serie con la banda en la misma rama del puente.

ϵ_{MK} = Respuesta a la temperatura del punto de medición a causa del calentamiento de los cables

α_K = coeficiente de temperatura de la resistencia del material conductor del cable

$$\alpha_{Cu} \approx 0,004 \frac{\Omega}{\Omega} \cdot \frac{1}{K}$$

ρ = conductividad del material conductor $\rho_{Cu} \approx 0,018 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$

$\Delta\vartheta$ = variación de temperatura
 R_K = resistencia del cable
 ΔR_K = variación de la resistencia del cable
 R_{DMS} = resistencia de la banda
 k = factor de banda
 l = longitud del cable
 A = sección transversal del cable

$$\varepsilon_{MK} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R_K}{R_{DMS} + R_K} \quad (7.1-2)$$

$$R_K = \varrho \cdot \frac{l}{A}; \quad \begin{array}{l} l \text{ en m} \\ A \text{ en mm}^2 \end{array} \quad (7.1-3)$$

$$\Delta R_K = R_K \cdot \alpha_K \cdot \Delta\vartheta = \varrho \cdot \frac{l}{A} \cdot \alpha_K \cdot \Delta\vartheta \quad (7.1-4)$$

$$\varepsilon_{MK} = \frac{\varrho \cdot l/A \cdot \alpha_K \cdot \Delta\vartheta}{k (R_{DMS} + \varrho \cdot l/A)} \cdot 10^6 \quad \text{en } \mu\text{m/m} \quad (7.1-5)$$

7.1.2 Respuesta a la temperatura de un circuito de cuarto de puente en configuración de tres hilos

Las explicaciones del principio del puente de Wheatstone en el apartado 5. muestran claramente que las variaciones de la resistencia del mismo signo que ocurren en las ramas colindantes del puente reducen el desequilibrio en el puente compensándose si son de la misma magnitud.

Esta característica del puente se utiliza de varias maneras para la compensación de efectos de interferencia y para la compensación de la respuesta a la temperatura.

Con el circuito conocido como el circuito de tres hilos es posible conectar los hilos causantes de la respuesta a la temperatura en ramas colindantes del puente. Esto se consigue conectando el potencial de la tensión de salida del puente directamente a la banda con un tercer hilo que se conecta al instrumento de medición (de aquí viene el nombre “circuito de tres hilos”).

La figura 7.1-2 compara el circuito de cuarto de puente simple (a) con el circuito de tres hilos (b).

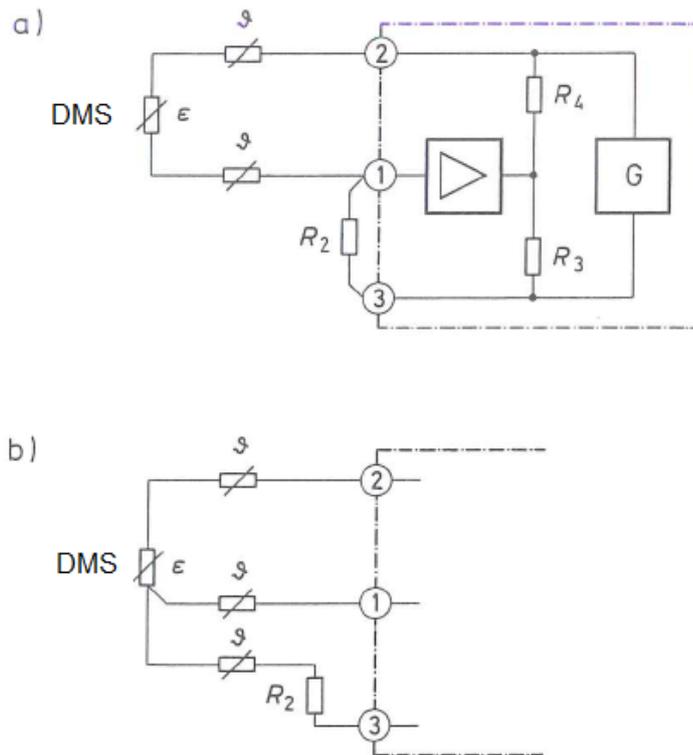


Figura 7.1-2: Comparación de la configuración de dos hilos con la configuración de tres hilos del circuito de cuarto de puente
a) conexión con dos hilos, hilos de ida i de vuelta en serie con la banda
b) conexión con tres hilos, hilo de ida en serie con la banda, hilo de vuelta en serie con la resistencia complementaria R_2


símbolo para la resistencia del cable dependiente de la temperatura

Para la compensación completa es necesario que el hilo de ida y el de vuelta tengan los mismos datos físicos, es decir longitud, sección transversal, coeficiente de temperatura etc. y que estén expuestos a las mismas variaciones de temperatura a lo largo de toda su longitud (hilos envueltos en la misma funda p.ej. cable de tres hilos). Importante: Es posible que hilos conductores con la misma apariencia externa posean coeficientes de temperatura distintos si no provienen del mismo fabricante. El tercer hilo (potencial) llega a la entrada del amplificador que tiene una impedancia muy alta, por lo tanto su resistencia interna y las variaciones de su resistencia interna no producen efectos de interferencia significativos para la medición.

La conexión de tres hilos se debería utilizar con una alimentación de tensión continua del puente y con cables de pocos metros de longitud. La conexión de tres hilos también se puede emplear con alimentación de frecuencia portadora. Para cables de gran longitud y una alimentación con tensiones de alta frecuencia, p.ej. 5 kHz de frecuencia portadora, la asimetría capacitiva puede ocasionar problemas (detectables en los indicadores de modulación de los amplificadores de frecuencia portadora, véase el apartado 7.4).

7.1.3 La compensación de un circuito de cuarto de puente con bandas extensométricas de compensación.

En circuitos de cuarto de puente se alcanza una muy buena compensación de la expansión térmica con el uso de bandas de compensación.

La banda de compensación se diferencia de la banda activa de medida únicamente por su función dentro del circuito de medición. Por lo demás tiene que poseer las mismas características físicas que la banda destinada a la medición. Por eso ambas bandas deberían formar parte del mismo lote de producción y de la misma caja.

Aunque no es esencial, sí que es aconsejable emplear bandas autocompensadas térmicamente tanto para la banda activa como para la banda de compensación, especialmente cuando no se pueden cumplir los requisitos mencionados a continuación. Otros requisitos adicionales son:

La banda de compensación se debe aplicar sobre un punto del objeto a medir sin carga mecánica y debe experimentar exactamente las mismas variaciones de temperatura que la banda de medición tanto en tiempo como en magnitud. Normalmente es complicado o incluso imposible encontrar un punto de estas características en el objeto a medir. En ese caso se puede aplicar la banda de compensación sobre un trozo del mismo material que el objeto a medir (un bloque metálico pequeño) y hay que colocar ambos en contacto térmico. El contacto térmico se puede producir por un simple contacto físico o por adhesión parcial o a través de algún método de fijación mecánico como tornillos o soldadura. No se puede transferir ningún tipo de carga mecánica a la pieza de compensación y tampoco se debe distorsionar o distorsionarse de ninguna forma, por ejemplo a causa de tensiones residuales, con los efectos térmicos. También debe ser suficientemente rígida como para no oscilar a causa de vibraciones ya que este tipo de comportamiento inherente ocasionaría errores de medida.

La capacidad térmica, es decir el volumen de la pieza de compensación debería ser suficientemente pequeño para permitir que su temperatura se adapte rápidamente a la del objeto a medir durante las variaciones de temperatura. La compensación completa sólo se obtiene de nuevo una vez se ha establecido el equilibrio de temperatura. Para pequeños radios de curvatura del punto de medida se deben tener en cuenta las observaciones del apartado 3.3.4 para asegurar la correcta correspondencia entre el objeto a medir y la pieza de compensación.

La banda de compensación y la banda activa se conectan eléctricamente como un circuito de medio puente de Wheatstone, véase el apartado 5.2 y la figura 5.2-2b, siendo R_1 la banda de medida y R_2 la banda de compensación, véase la figura 7.1-3. Desde el punto de vista de la medición se trata de un circuito de cuarto de puente pero es de medio puente si se observa el circuito en sí. Es importante tomar nota de la diferencia funcional. El tipo de circuito mostrado en a) se emplea si la banda de compensación se puede posicionar muy cerca de la banda de medida. El circuito mostrado en b) se emplea cuando la banda de compensación se aplica lejos de la banda de medida.

También se emplea cuando se utilizan varias bandas de medida con una banda de compensación común, p. ej. con un escáner multipunto. Los efectos de la respuesta a la temperatura de los cables de conexión se compensan si se cumplen las condiciones mencionadas en el apartado 7.1.2 para el circuito de tres hilos.

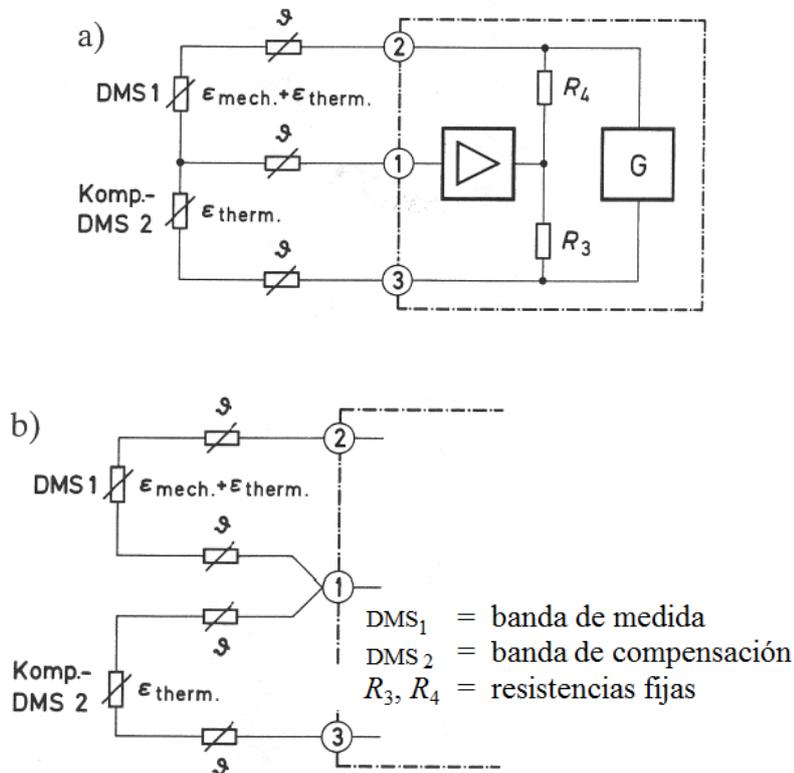


Figura 7.1-3: Circuito con banda de compensación
 a) y b) : métodos alternativos de conexión

La compensación de la expansión térmica se explicara a partir de un ejemplo.

La banda 1 aporta la señal de deformación ϵ_1 , que es la suma de la deformación mecánica ϵ_{mech} y de la expansión térmica ϵ_{therm} . La banda de compensación 2 aporta la señal de deformación ϵ_2 que únicamente representa la deformación térmica ϵ_{therm} de la pieza de compensación.

Las ramas del puente R_3, R_4 son resistencias fijas cuya aportación a la señal total ϵ_a , en la ecuación (7.1-1) es igual a cero, de manera que la expresión se reduce a

$$\epsilon_a = \epsilon_1 - \epsilon_2. \quad (7.1-6)$$

$$\epsilon_a = \underbrace{(\epsilon_{\text{mech}} + \epsilon_{\text{therm}})}_{\epsilon_1} - \underbrace{(\epsilon_{\text{therm}})}_{\epsilon_2}.$$

Por lo tanto la señal de medición indicada ϵ_a únicamente representa la tensión debida a la carga mecánica ejercida sobre el objeto a medir ϵ_{mech} .

Si la banda de compensación se aplica correctamente también se eliminan por completo los restos de la respuesta a la temperatura inevitable de la banda autocompensada, véanse las figuras 3.3-10 y 3.3-11.

7.1.4 Compensación de la respuesta a la temperatura para un puente de dos cuartos o puente diagonal

La designación de “puente de dos cuartos” describe mejor las características funcionales del circuito, véase la figura 7.1-4. que el término “puente diagonal”. Con respecto a la medición, cada una de las mitades del puente, 2-1-3 y 2-4-3, consiste de un cuarto de puente con una resistencia complementaria, véase la figura 7.1-4a o bien de un cuarto de puente con una banda de compensación, véase la figura 7.1-4b. Desde el punto de vista del circuito se trata de un puente completo pero no se debe confundir su funcionalidad.

Para la compensación de las respuestas a la temperatura causadas por los cables de compensación en la figura 7.1-4a se emplea el circuito de tres hilos explicado en el apartado 7.1.2 y en la figura 7.1-4b se emplea el circuito de compensación del apartado 7.1.3 .

El valor medido ϵ_a , si se emplean resistencias fijas para R_2, R_4 está compuesto por:

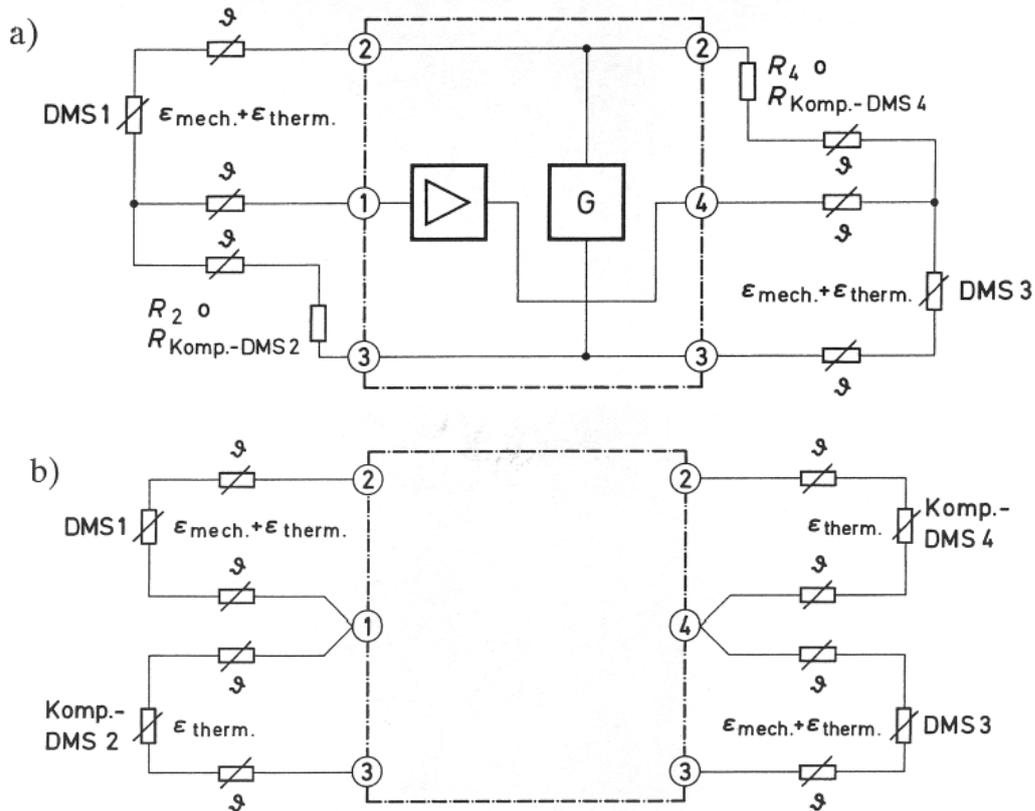
$$\epsilon_a = \underbrace{(\epsilon_{\text{mech } 1} + \epsilon_{\text{therm } 1})}_{\epsilon_1} - \underbrace{\text{cero}}_{\epsilon_2} + \underbrace{(\epsilon_{\text{mech } 3} + \epsilon_{\text{therm } 3})}_{\epsilon_3} - \underbrace{\text{cero}}_{\epsilon_4} .$$

El circuito proporciona la suma de las tensiones mecánicas ϵ_1 mas ϵ_3 . Las deformaciones térmicas se tienen que eliminar mediante el uso de bandas autocompensadas térmicamente teniendo en cuenta los requisitos para su correcta aplicación, véanse los apartados. 7.1.1 y 7.1.2. Cuando se utilizan bandas de compensación en lugar de las resistencias R_2, R_4 la deformación total es

$$\epsilon_a = \underbrace{(\epsilon_{\text{mech } 1} + \epsilon_{\text{therm } 1})}_{\epsilon_1} - \underbrace{(\epsilon_{\text{therm } 2})}_{\epsilon_2} + \underbrace{(\epsilon_{\text{mech } 3} + \epsilon_{\text{therm } 3})}_{\epsilon_3} - \underbrace{(\epsilon_{\text{therm } 4})}_{\epsilon_4} .$$

Si se cumplen las condiciones descritas en el apartado 7.1.3 se consigue una buena compensación de la respuesta a la temperatura.

El puente de dos cuartos se emplea relativamente poco.



Las bandas 1 y 3 son bandas activas de medida.
 R_2 y R_4 son resistencias complementarias o bandas de compensación.

Figura 7.1-4: Puente de dos cuartos o puente diagonal
 a) en conexión de tres hilos
 b) con bandas de compensación

7.1.5 Compensación de la respuesta a la temperatura para un circuito de medio puente

La compensación de la respuesta a la temperatura empleando un circuito de medio puente funciona del mismo modo que con las bandas de compensación. Se deben cumplir los mismos requisitos. La diferencia respecto a la compensación con bandas de compensación es que la banda en la rama 2 del puente no tiene porque aplicarse sobre un punto libre de carga mecánica, sino que colabora en la medición de la deformación mecánica. Todos los otros requisitos mencionados para las bandas de compensación son válidos. En los circuitos 7.1-3a y b se sustituye la banda de compensación R_2 por una banda activa de medida.

El valor medido, la deformación indicada ε_a , se compone según la siguiente expresión.

$$\varepsilon_a = \underbrace{(\varepsilon_{\text{mech } 1} + \varepsilon_{\text{therm } 1})}_{\varepsilon_1} - \underbrace{(\varepsilon_{\text{mech } 2} + \varepsilon_{\text{therm } 2})}_{\varepsilon_2}.$$

Las deformaciones térmicas $\varepsilon_{\text{therm } 1}$ y $\varepsilon_{\text{therm } 2}$ se compensan entre sí, si se cumplen las condiciones. Las deformaciones mecánicas se suman si tienen signos opuestos y se restan si tienen el mismo signo:

$$\begin{aligned}\varepsilon_a &= (+ \varepsilon_{\text{mech } 1}) - (- \varepsilon_{\text{mech } 2}) = \varepsilon_{\text{mech } 1} + \varepsilon_{\text{mech } 2}, \\ \varepsilon_a &= (+ \varepsilon_{\text{mech } 1}) - (+ \varepsilon_{\text{mech } 2}) = \varepsilon_{\text{mech } 1} - \varepsilon_{\text{mech } 2}.\end{aligned}$$

Por eso el circuito de medio puente solo se emplea si se conocen las proporciones de las deformaciones ε_1 y ε_2 en la señal total ε_a en magnitud y signo, p.ej. para una carga normal pura o para una carga pura de flexión sobre un objeto a medir con una sección transversal simétrica, véase el apartado 8.

Para la compensación de los efectos de la respuesta a la temperatura de los cables de conexión hay que prestar atención para asegurar simetría de los hilos 2 y 3 en cuanto a su longitud, su resistencia eléctrica, y su coeficiente de temperatura, y asegurar que experimentan las mismas variaciones de temperatura, véanse los apartados 7.1.1 y 7.1.2.

7.1.6 Compensación de la respuesta a la temperatura para el circuito de puente completo

El circuito de puente completo, véase la figura 7.1-5 se emplea principalmente para la fabricación de transductores y las técnicas de medición relacionadas. En este tipo de circuito todos los brazos del puente están ocupados por bandas de medición colocadas muy cerca la una de la otra. Por eso, las conexiones internas del puente que normalmente producen una contribución indeseada a la respuesta a la temperatura son muy cortas y el error producido es muy pequeño. Si se exige una precisión muy alta, estas conexiones deberían corresponderse tanto en su sección transversal como en su longitud.

La deformación térmica del objeto a medir actúa de la misma forma sobre las cuatro bandas, de manera que hay una buena compensación de la respuesta a la temperatura. La señal medida ε_a es la suma aritmética de las 4 deformaciones medidas ε_1 a ε_4 :

$$\varepsilon_a = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4.$$

Si el objeto a medir está expuesto a variaciones irregulares de temperatura, p.ej. por radiación térmica unilateral hay que intentar mantener el equilibrio térmico encapsulando el objeto en material aislante, con una pantalla contra la radiación térmica o con otras medidas adecuadas.

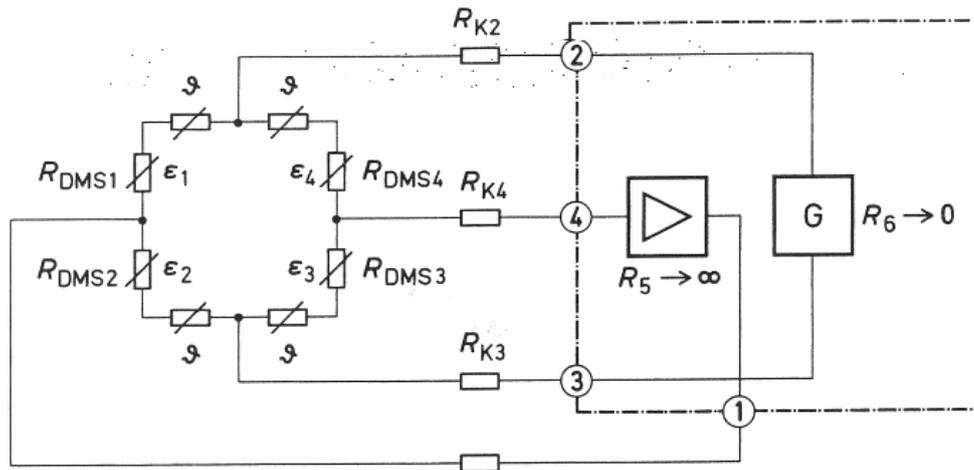


Figura 7.1-5: Circuito de puente completo

Los cables de salida del puente (cables de señal) mostrados en la figura 7.1-5, con las resistencias eléctricas R_{K1} y R_{K4} respectivamente no tienen ninguna influencia sobre la respuesta a la temperatura ni sobre la señal medida. Los dos cables de alimentación del puente con las resistencias R_{K2} y R_{K3} respectivamente tampoco tienen influencia alguna sobre la respuesta a la temperatura; su influencia sobre la señal medida se trata en el apartado 7.2.

El circuito de puente completo solo se puede emplear para el análisis experimental de tensiones cuando se conoce exactamente la distribución de la deformación sobre las cuatro bandas respecto a su signo, y los ratios entre dichas deformaciones, p.ej en una viga en flexión con una sección transversal de flexión simétrica o para barras de tensión y compresión, véase el capítulo 8. Para todos aquellos casos donde se desconoce la distribución de la deformación se tiene que emplear el circuito de cuarto de puente.

7.2 La influencia de la resistencia de los cables

En los circuitos asimétricos (cuarto de puente simple y puente de dos cuartos o puente diagonal) la resistencia de los cables de conexión entre la banda y los puntos de medida del puente, es decir los puntos de conexión señalados como 1 y 4 en los esquemas del circuito siguientes, pueden ocasionar un desequilibrio en el puente tan grande que no pueda ser corregido con los dispositivos de ajuste del amplificador (compensación de R) y queda completamente saturado o incluso sobreexcitado.

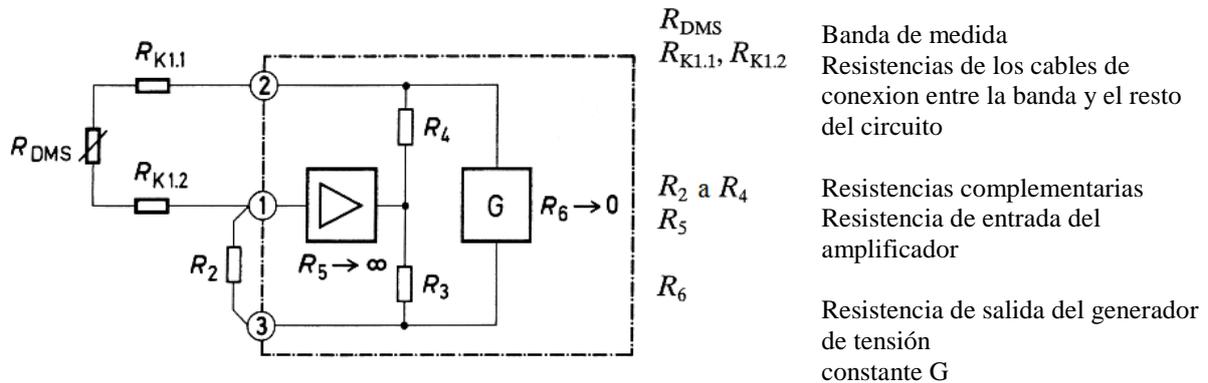


Figura 7.2-1: La influencia de la resistencia de los cables en un circuito de cuarto de puente simple

La resistencia de la rama 1 del puente está compuesta por la resistencia de la banda (R_{DMS}), la resistencia del hilo de ida ($R_{K1.1}$) y la del de vuelta ($R_{K1.2}$).

En la medición de deformación con bandas se asume que el desequilibrio del puente es una medida de la deformación según la ecuación (5.2-9):

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{DMS} \quad (7.2-1)$$

La variación relativa de la resistencia de la banda es proporcional a la deformación.

$$\frac{\Delta R_{DMS}}{R_{DMS}} = \varepsilon \cdot k. \quad (7.2-2)$$

En el caso mostrado en la figura 7.2-1 el puente “ve” la variación de la resistencia ΔR de la banda respecto a la resistencia total de la rama 1 del puente, es decir una variación relativa de la resistencia menor.

$$\frac{\Delta R_{DMS}}{R_{K1.1} + R_{DMS} + R_{K1.2}} < \varepsilon \cdot k. \quad (7.2-3)$$

Por eso la señal medida resulta demasiado pequeña.

El ejemplo siguiente da una impresión del orden de magnitud de la influencia de la resistencia del cable sobre el resultado medido.

En un caso así se tiene que aumentar apropiadamente el valor de la resistencia complementaria adyacente (R_2 para el circuito de cuarto de puente, R_2 y R_4 para el puente de dos cuartos). Las resistencias en láminas metálicas de gran estabilidad son las únicas adecuadas como resistencias complementarias.

En el capítulo 6 para la calibración ya se mencionó otro efecto causado por la resistencia de los cables: la reducción del valor medido registrado por las bandas extensométricas. También se describen las medidas para eliminar este error con métodos de calibración especiales (apartado 6.3) Si hay suficientes resistencias shunt de precisión disponibles, la calibración shunt es a veces el método más fiable para reducir los errores de medida. Si se emplean técnicas multipunto, la calibración shunt también permite controlar la asignación de la banda a la posición del interruptor en el escáner. Si no se puede realizar la calibración se tienen que corregir las influencias de los cables. Las explicaciones siguientes asumen una tensión de alimentación constante.

En los esquemas de los circuitos se asume que las conexiones entre los distintos elementos del circuito no tienen ninguna resistencia eléctrica. En realidad esta suposición solamente se puede hacer si el cable es corto y su resistencia es como mínimo dos o tres ordenes de magnitud menor que la resistencia de la banda y del puente, lo que permite que se pueda prescindir de su resistencia. Para cables más largos esta suposición ya no tiene validez. Si se emplean cables con hilos muy finos o de materiales con una alta resistividad relativa p.ej. en el rango de altas temperaturas es posible que incluso un cable corto lleve a errores de medida considerables. Lo importante no es la longitud del cable sino su resistencia.

Los apartados 7.2.1 hasta 7.2.6 contienen las ecuaciones para la corrección numérica de los valores medidos en distintos circuitos. El apartado 7.2.7 contiene las ecuaciones para la corrección de errores mediante el selector de factor de banda k del amplificador.

Para información acerca de la influencia de la resistencia de contacto en las técnicas de anillos rozantes véase el apartado 8.4.4.1.

7.2.1 Circuito de cuarto de puente simple

La manera en la que la resistencia de los cables de conexión reduce la señal de la banda se explicará primero para un circuito de cuarto de puente, véase la figura 7.2-1. La banda extensométrica forma la rama 1 del puente junto con los cables de conexión; las resistencias fijas R_2 , R_3 , R_4 completan el puente.

Ejemplo:

Un cable de cobre de 100m de longitud (2 hilos de 100m) con una sección transversal por hilo de 0,5mm² provoca en un circuito de cuarto de puente (la resistencia de los cables en serie con la resistencia de la banda) un error de medida de:

- 5,8 % con una resistencia de banda de 120 Ω,
- 1,8 % con una resistencia de banda de 350 Ω,
- 1,2 % con una resistencia de banda de 600 Ω.

Con una sección transversal por hilo de 0,14 mm² los errores de medición son

- 17,5 % con una resistencia de banda de 120 Ω,
- 6,8 % con una resistencia de banda de 350 Ω,
- 3,7 % con una resistencia de banda de 600 Ω.

El resultado erróneo se puede corregir fácilmente con la ayuda del diagrama de la figura 7.2.-2 según la relación.

$$\varepsilon = \varepsilon_a \frac{100 \%}{\text{Indicación residual } \%} \quad (7.2-4)$$

ε representa el valor medido correcto y ε_a el valor indicado (erróneo). El porcentaje de indicación residual o perdida en la señal (el error) se puede leer en el diagrama.

En la figura 7.2-2: se muestran dos ejemplos que explican como emplear el diagrama.

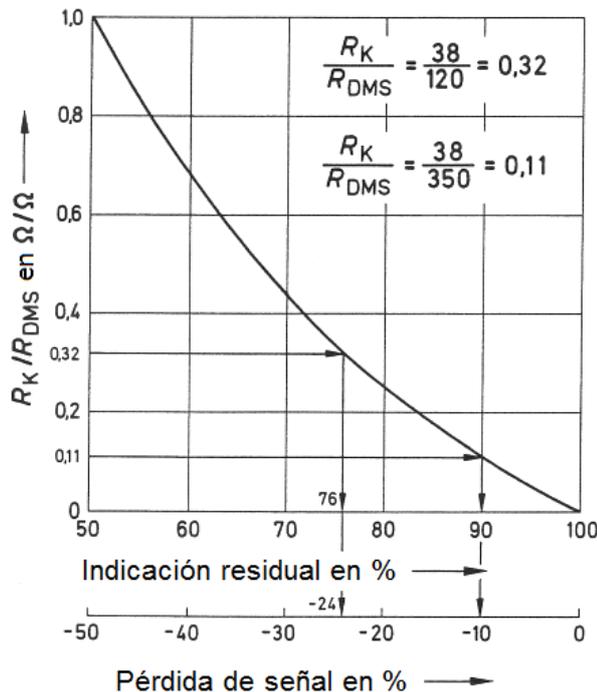


Figura 7.2-2 Diagrama para determinar la indicación residual y la pérdida de señal causada por la resistencia del cable

En primer lugar se forma la relación R_K/R_{DMS} y se busca el valor sobre la escala de medido. Desde ese punto se traza una línea horizontal hasta la curva y luego se traza una línea vertical hasta la abscisa donde se puede leer el valor del porcentaje de la indicación se aplica la ecuación siguiente que se coloca en el denominador de la ecuación 7.2-4.

ε_a siempre representa el valor de medida indicado, no corregido y R_K representa el valor total de la resistencia del cable conectada en serie con la banda en la rama correspondiente del puente. La precisión de la corrección depende fundamentalmente de la precisión con la que se midan las resistencias de los cables.

Si los cables de conexión son muy largos es posible que la resistencia total $R_{DMS} + R_{K1.1} + R_{K1.2}$ de la rama 1 del puente sea tan grande que los dispositivos de ajuste del amplificador no sean suficientes para la compensación del cero. En ese caso se tiene que ajustar la resistencia complementaria R_2 . El aumento de R_2 al valor de la resistencia total R_1 no perjudica el resultado medido.

También es posible corregir el valor medido ε_a con un ordenador. Para un circuito de cuarto de puente simple se aplica la ecuación siguiente.

$$\varepsilon = \varepsilon_a \frac{R_{K1.1} + R_{DMS} + R_{K1.2}}{R_{DMS}} \quad (7.2-5)$$

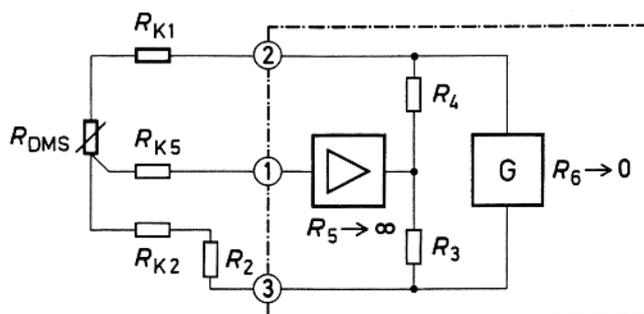
En la figura 7.2-1 están señaladas en negrita las resistencias que se deben incluir para la corrección. Para ambos métodos de corrección es necesario conocer los valores de las resistencias de los cables (por medición) y de la banda (señalado en la hoja de datos que se incluye en su paquete).

7.2.2 Circuito de cuarto de puente con conexión de 3 hilos

En el circuito de cuarto de puente con conexión de 3 hilos, véase la figura 7.2-3 solamente el hilo de ida está conectado en serie con la banda. Por ese motivo solamente la resistencia R_{K1} tiene influencia sobre la señal medida de la banda 1. La ecuación de corrección es:

$$\varepsilon = \varepsilon_a \frac{R_{DMS} + R_{K1}}{R_{DMS}} \quad (7.2-6)$$

Los valores de las resistencias señaladas en negrita en la figura 7.2.3 tienen que substituirse en la ecuación de corrección.



Mismas definiciones que en la figura 7.7-1.

Figura 7.2.-3: La influencia de las resistencias de los cables en el circuito de cuarto de puente con la banda en conexión de tres hilos

El hilo de retorno con la resistencia R_{K2} está en la rama pasiva R_2 y por lo tanto no tiene influencia sobre el resultado de la medición.

La resistencia R_{K5} del hilo de señal es insignificante si la resistencia de entrada del amplificador, R_5 es al menos mil veces mayor que la resistencia de la banda. Los amplificadores modernos cumplen este requisito.

La corrección del error también se puede realizar con ayuda del diagrama de la figura 7.2-2.

7.2.3 Circuito de cuarto de puente con banda de compensación

La figura 7.2-4 muestra dos variantes del circuito de cuarto de puente con bandas de compensación:

- Banda de compensación y banda activa de medición colocadas cerca la una de la otra.
La ecuación de corrección correspondiente es la ecuación.(7.2-6).
- Banda de medición y banda de compensación colocadas lejos la una de la otra.
La ecuación de corrección correspondiente es la (7.2-5).

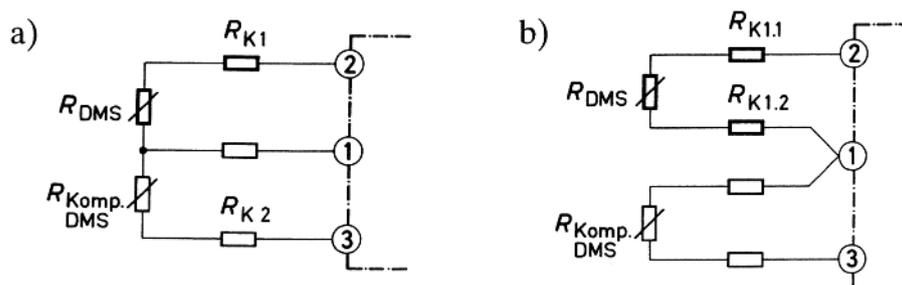


Figura 7.2-4: Circuito de cuarto de puente con banda de compensación
a) banda de medición y banda de compensación cerca entre si.
b) banda de medición y banda de compensación lejos entre si.

Las resistencias a tener en cuenta para la corrección de errores están señaladas en negrita.

Se emplea el circuito a) cuando la banda de compensación se aplica muy próxima de la banda de medición. El circuito b) se emplea cuando hay una mayor distancia entre la banda de compensación y la banda de medición. También se utiliza habitualmente para los equipos de medición multipunto cuando se conecta consecutivamente la misma banda de compensación a un cierto número de bandas de medición.

Para ambos circuitos la corrección de errores también se puede hacer con ayuda del diagrama de la figura 7.2-1.

7.2.4 Puente de dos cuartos o puente diagonal.

En la figura 7.2-5 se muestran dos variaciones del circuito de puente de dos cuartos:

- a) Circuito del puente de dos cuartos con las bandas de medición 1 y 3 cada una en conexión de 3 hilos con las resistencias complementarias R_2 y R_4 . La ecuación de corrección correspondiente es:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_3 = \varepsilon_a \frac{R_{K1} + R_{DMS1} + R_{DMS3} + R_{K3}}{R_{DMS1} + R_{DMS3}} \quad (7.2-7)$$

Si en lugar de las resistencias fijas se emplean bandas de compensación colocadas cerca de su banda entre si (similar a la figura 7.2-4a) es válida la misma ecuación de corrección.

- b) Si las bandas de compensación se colocan separadas (similar a la figura 7.2-4b) la ecuación de corrección es:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_3 = \varepsilon_a \frac{R_{K1.1} + R_{DMS1} + R_{K1.2} + R_{K3.1} + R_{DMS3} + R_{K3.2}}{R_{DMS1} + R_{DMS3}} \quad (7.2-8)$$

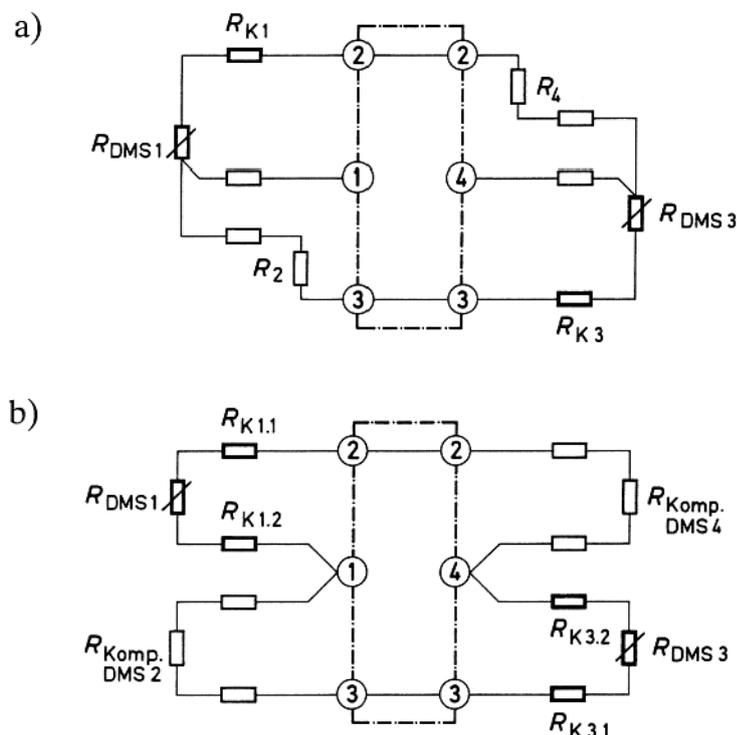


Figura 7.2-5: Circuito del puente de dos cuartos o puente diagonal
a) puente de dos cuartos en conexión de tres hilos
b) puente de dos cuartos con colocación separada de las bandas de compensación

7.2.5 Circuito de medio puente

El circuito de medio puente de la figura 7.2.6 contiene dos bandas de medición; es lo que lo diferencia del circuito de cuarto de puente, véase la figura 7.2-4.

En la figura 7.2-6 se vuelven a mostrar dos variantes. El caso a) representa la situación en la que las dos bandas están colocadas una junto a la otra. La ecuación de corrección correspondiente es:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \varepsilon_a \frac{R_{K1} + R_{DMS1} + R_{DMS2} + R_{K2}}{R_{DMS1} + R_{DMS2}} \quad (7.2-9)$$

El caso b) es válido cuando las bandas están colocadas a cierta distancia entre si, lo que puede suceder en objetos de medición más grandes. En este caso la ecuación de corrección es:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \varepsilon_a \frac{R_{K1.1} + R_{DMS1} + R_{K1.2} + R_{K2.1} + R_{DMS2} + R_{K2.2}}{R_{DMS1} + R_{DMS2}} \quad (7.2-10)$$

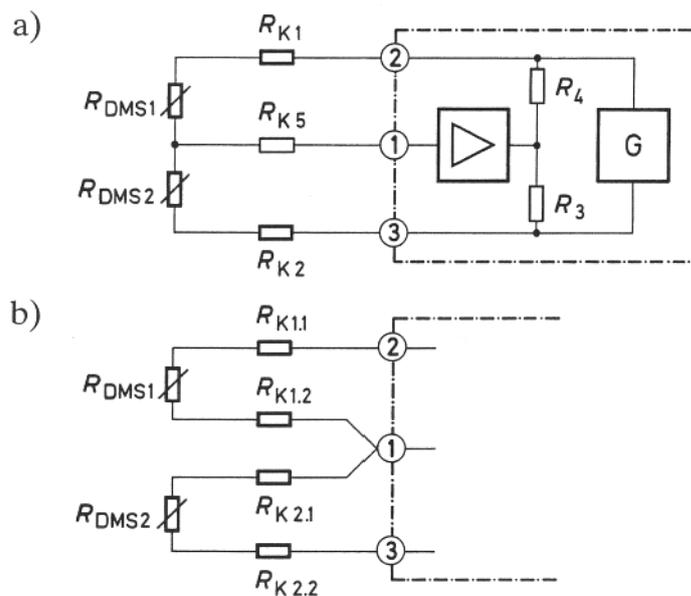


Figura 7.2-6: Circuito de medio puente
 a) bandas colocadas una junto a la otra
 b) bandas colocadas con cierta distancia entre si

7.2.6 Circuito de puente completo

El circuito de puente completo se emplea preferentemente para la construcción de transductores por sus características favorables – señal medida mayor, compensación automática de interferencias. Sus ventajas se muestran especialmente cuando las conexiones dentro del puente son cortas y simétricas.

En estas condiciones las resistencias de las conexiones internas del puente se mantienen suficiente pequeñas y no se tienen que tener más en cuenta. En su lugar hay que prestar especial atención a las resistencias de los cables de conexión entre el amplificador y el transductor, es decir los dos hilos para la alimentación del puente con sus respectivas resistencias R_{K2} y R_{K3} , véase la figura 7.2-7. Igual que en los ejemplos anteriores las resistencias de las conexiones de señal 1 y 4 no influyen sobre la señal medida.

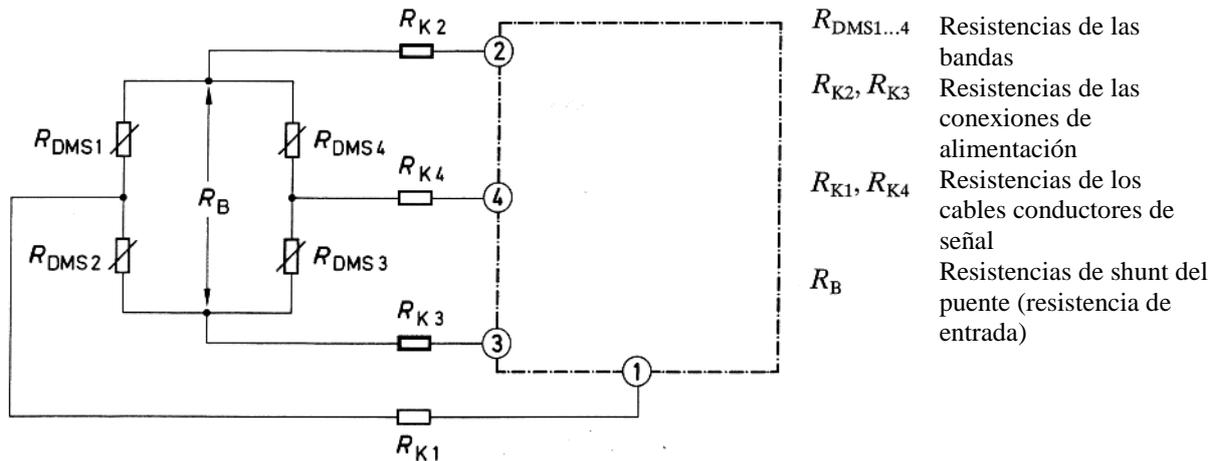


Figura 7.2-7: Circuito de puente completo

La ecuación de corrección es:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = \varepsilon_a \frac{R_{K2} + R_B + R_{K3}}{R_B}. \quad (7.2-11)$$

R_B representa la resistencia de shunt del puente (resistencia de entrada)

$$R_B = \frac{(R_{DMS1} + R_{DMS2}) \cdot (R_{DMS3} + R_{DMS4})}{R_{DMS1} + R_{DMS2} + R_{DMS3} + R_{DMS4}}. \quad (7.2-12)$$

Si las resistencias de las bandas son todas iguales entre si, hecho que se puede asumir, la resistencia de entrada del puente es la misma que la resistencia de la banda.

Para las mediciones con transductores con un circuito de puente completo el método de calibración empleando una unidad de calibración descrito en el apartado 6.4 debe tenerse en cuenta por ser el más simple y a menudo también el mejor.

7.2.7 Corrección de errores con el selector de factor de banda

Existe otra posibilidad de eliminar la influencia de las resistencias de los cables si el amplificador utilizado tiene un selector del factor de banda (véanse los apartados 6.1 y 6.5).

La pérdida de señal ocasionada por la resistencia de los cables se puede considerar como una reducción del factor de banda k de la banda extensométrica. Si se ajusta el selector de factor de banda para que tenga el valor del factor de banda reducido k^* , la ganancia del amplificador aumenta correspondientemente, de forma que el valor medido indicado vuelve a ser correcto. Existen las fórmulas siguientes para calcular el factor de banda aparente k^* para los distintos circuitos.

Circuito de cuarto de puente simple, según la figura 7.2-1:

$$k^* = k \cdot \frac{R_{DMS}}{R_{K1.1} + R_{DMS} + R_{K1.2}}. \quad (7.2-13)$$

Cuarto de puente en conexión de tres hilos, véase la figura 7.2-3:

$$k^* = k \cdot \frac{R_{DMS}}{R_{DMS} + R_{K1}}. \quad (7.2-14)$$

Cuarto de puente con bandas de compensación según la figura 7.2-4:

Para el caso a) es válida la ecuación 7.2-14, para el caso

b) es válida la ecuación 7.2-13.

Puente de dos cuartos o puente diagonal, según la figura 7.2-5:

Para el caso a) es válida la ecuación 7.2-14, para el caso

b) es válida la ecuación 7.2-13.

Se supone que las dos ramas 1 y 3 del puente están ocupadas con componentes idénticos.

Circuito de medio puente según 7.2-6:

Para el caso a) es válida la ecuación 7.2-14, para el caso

b) es válida la ecuación 7.2-13.

También aquí se supone que las dos ramas 1 y 2 del puente están ocupadas con componentes idénticos.

Circuito de puente completo según la figura 7.2-7:

$$k^* = k \cdot \frac{R_B}{R_{K2} + R_B + R_{K3}}. \quad (7.2-15)$$

La resistencia de entrada del puente R_B se tiene que medir o calcular con la ecuación (7.2-12).

7.3 La eliminación de los efectos de los cables con circuitos específicos en el amplificador de medida

Mientras que las medidas descritas en los apartados 7.1 y 7.2 se centran fundamentalmente en la compensación de efectos de interferencia, en esta sección se describe el diseño de equipos de medición que de entrada impiden la aparición de errores a causa de los cables de conexión. En [5-2] se explican los principios operativos de un dispositivo de este tipo a partir del esquema de su circuito. En el apartado siguiente se reproduce un extracto de dicha publicación con la autorización de su autor.

7.3.1 El puente de HBM (cita de [5-2])*)

Ya en el año 1976, el autor propuso un circuito [7-1], basado en el puente de Wheatstone pero que evita sus inconvenientes casi por completo.

En la figura 7.3-1 se muestra el principio de este circuito. La tensión de alimentación del puente U_B ya no se aplica directamente sobre la banda sino que únicamente sirve como tensión de referencia a los amplificadores V2 y V3. Estos amplificadores V2 y V3 corrigen sus tensiones de salida hasta que las tensiones detectadas por hilos de detección en los puntos de medida y realimentadas a través de los amplificadores seguidores de tensión (de ganancia unitaria) SF2' y SF3' son iguales a las tensiones $+U_{B/2}$ o $-U_{B/2}$.

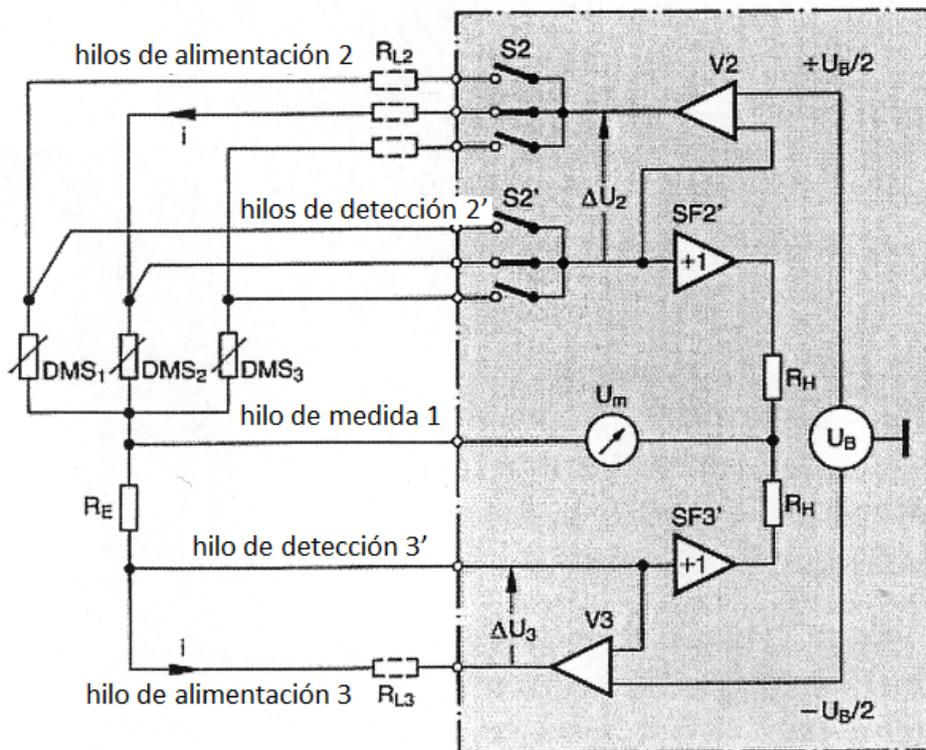


Figura 7.3-1: Circuito de cuarto de puente para la conexión prácticamente libre de errores de una banda extensométrica con la resistencia complementaria R_E o banda de compensación conectada cerca del punto de medición

*) Estos circuitos patentados se emplean para los instrumentos comercialmente disponibles bajo el nombre de circuito Kreuzer o circuito Kreuzer extendido.

Las caídas de tensión ΔU_2 y ΔU_3 en las conexiones y en los interruptores de alimentación S2 de esta forma se eliminan; las tensiones de salida de los amplificadores V2 y V3 son superiores a las tensiones $+U_{B/2}$ y $-U_{B/2}$ por el valor de las caídas de tensión ΔU_2 y ΔU_3 de manera que la tensión suministrada en los puntos de medición es exactamente igual a la tensión de alimentación del puente.

Debido a las impedancias de entrada extremadamente grandes de los amplificadores y de los seguidores de tensión (SF2', SF3'), los hilos de detección no tienen prácticamente corriente, de manera que su resistencia y la resistencia de los interruptores S2' no pueden ocasionar caídas de tensión, ni errores de medida. Ya que el circuito de medio puente interno (resistencias R_H) que complementa el circuito de medición formando un puente completo está conectado a las tensiones de realimentación desde los puntos de medición a través de los seguidores de tensión SF2' y SF3', tanto el medio puente interno como el externo tienen exactamente la misma tensión, incluso aunque la regulación de los amplificadores V2 y V3 deje pequeños errores residuales. Mediante circuitos con amplificadores operacionales modernos se pueden ajustar los seguidores de tensión de forma tan precisa que su error es tan pequeño que se puede prescindir de él.

De este modo los errores de cero y de sensibilidad se puede eliminar casi por completo. El circuito es adecuado para funcionar con tensión continua o con frecuencia portadora. En el modo de frecuencia portadora se alcanza una precisión aun mayor ya que las pequeñas tensiones de desequilibrio de cero y las derivas por temperatura de los amplificadores y seguidores de tensión no tienen ninguna influencia. Otra ventaja del circuito mostrado en la figura 7.3-1 es que solo se necesitan dos hilos y dos interruptores para cada banda extensométrica adicional.

Por otro lado, el circuito requiere que la resistencia complementaria R_E se conecte cerca de la banda ya que las caídas de tensión que surgen en los cables de conexión entre la banda y la resistencia complementaria R_E no se pueden compensar. Además la conexión metálica directa entre las bandas implica que si una de ellas está conectada a tierra las medidas de todo el grupo pueden ser erróneas.

En la figura 7.3-2 se muestra un circuito ampliado respecto al de la figura 7.3-1 que permite conectar bandas individuales a través de largas distancias de hasta 1000m mientras que la resistencia complementaria se puede conectar incluso dentro del instrumento de medición [7-2]. Respecto al circuito de la figura 7.3-1, el circuito de la figura 7.3-2 incorpora dos seguidores de tensión adicionales SF1 y SF4 así como el amplificador diferencial DV. La caída de tensión ΔU_1 , causada por la corriente de alimentación del cable de alimentación 4 y del interruptor S4, es decir de la conexión entre la banda y la resistencia complementaria R_E , se capta directamente de los seguidores de tensión SF1 y SF4 y divide exactamente en dos por las resistencias R_T para poder asignar proporciones idénticas a cada rama del medio puente exterior.

Así se descarta la influencia de la caída de tensión ΔU_1 sobre el cero. Debido a que la caída de tensión ΔU_1 se lleva al generador de tensión del puente a través del amplificador diferencial DV donde se incrementa la tensión de alimentación U_B del puente en la cantidad ΔU_1 , la suma de las tensiones que llegan a la banda y a la resistencia complementaria es siempre una constante U_{ref} . Por tanto las caídas de tensión ΔU_1 y ΔU_2 tampoco influyen sobre la sensibilidad de la medición. Ya que el circuito de la figura 7.3-2 conecta o desconecta cada banda por completo, si una banda está conectada a tierra las otras no se verán afectadas

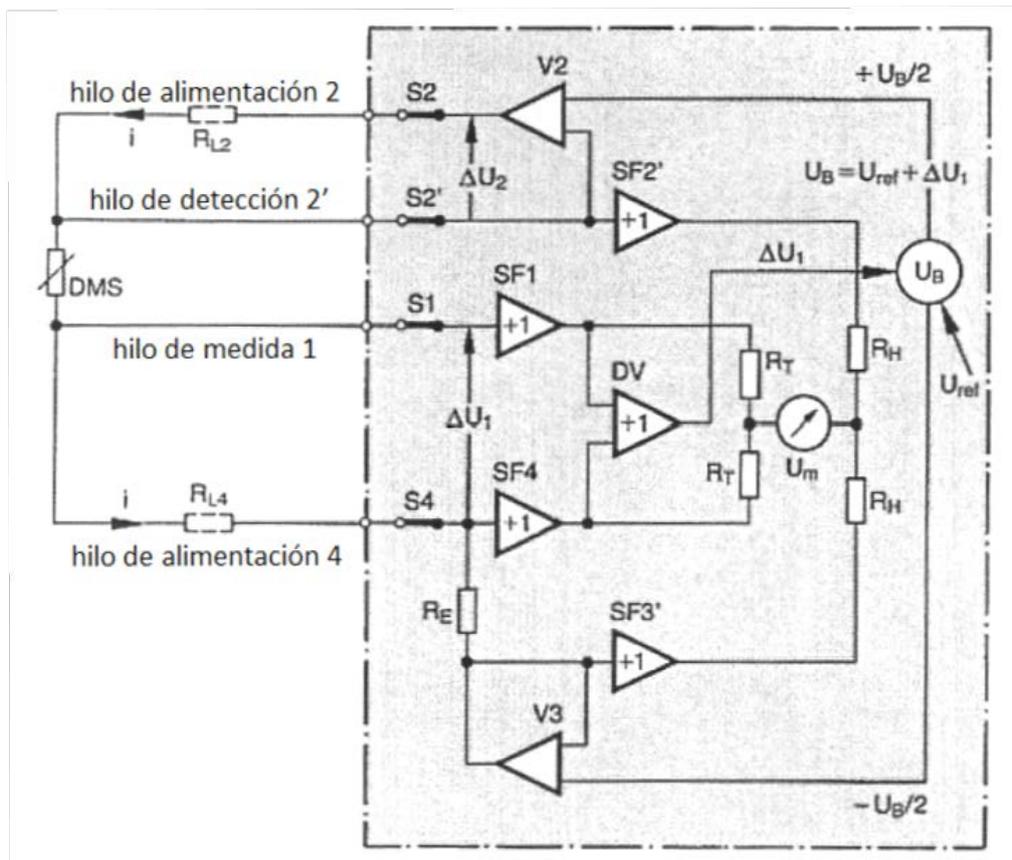


Figura 7.3-2: Circuito de cuarto de puente para la conexión prácticamente libre de errores de una banda extensométrica con la resistencia complementaria R_E conectada lejos del punto de medición

En la figura 7.3-3 se muestra de forma más detallada que en el circuito de la figura 7.3-2, la técnica empleada por HBM para conectar puentes completos, medios puentes y cuartos de puente. Es posible complementar las bandas extensométricas con bandas de compensación conectadas lejos la una de la otra, p.ej tal y como se muestra para el punto de medición M2 de la figura 7.3-3 o complementar una banda con una resistencia interna $R_{E\text{ int}}$ dentro del instrumento o con una resistencia externa $R_{E\text{ ext}}$ común para formar un circuito de medio puente. Si se emplea el método de frecuencia portadora, es decir si se alimenta el puente con una tensión alterna sinusoidal, se puede construir un divisor inductivo con el circuito de medio puente interno R_H y si es necesario también con el divisor de resistencia R_T , reduciendo de forma considerable los errores de medición de los circuitos de medio y de cuarto de puente, ya que los divisores inductivos se pueden construir con mayor estabilidad de temperatura, y sobre todo con mayor estabilidad a largo plazo que los divisores de resistencia.

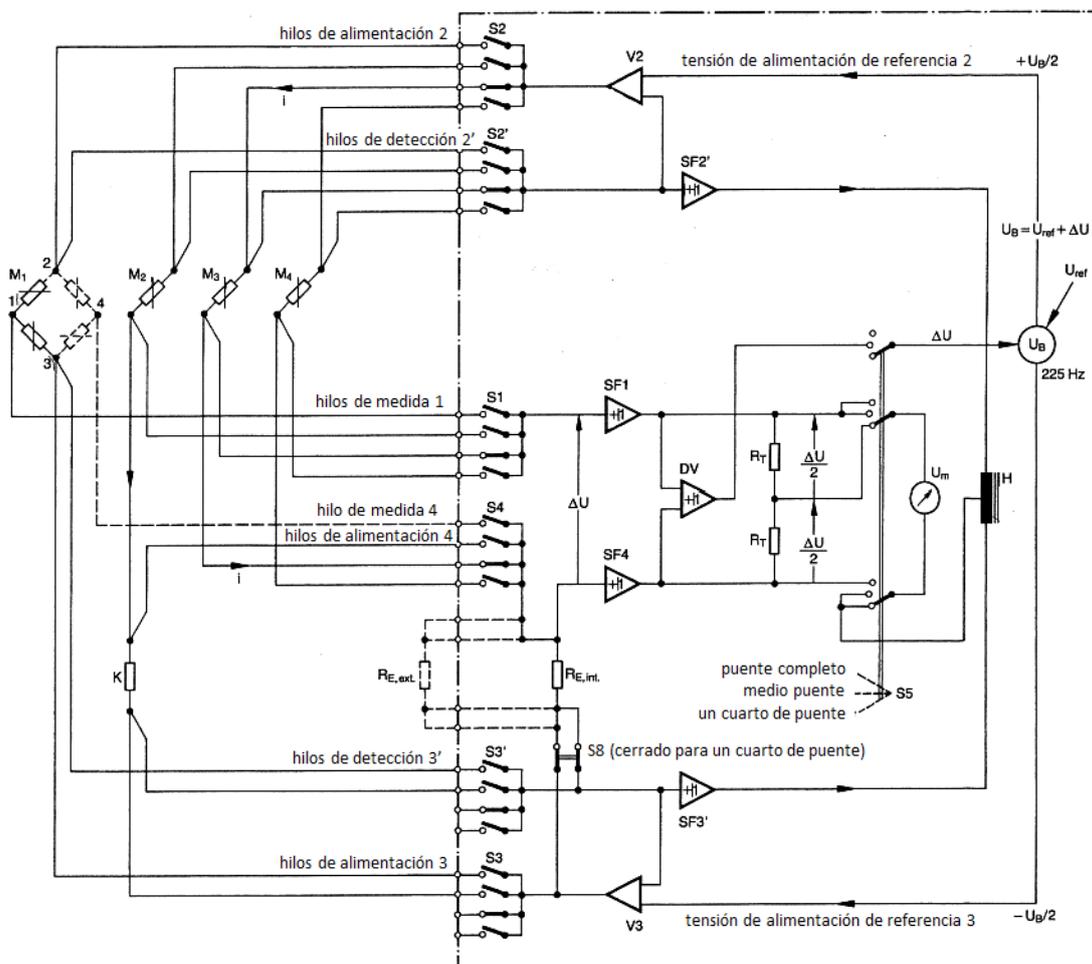


Figura 7.3-3: Circuito HBM para la conexión libre de errores de circuitos de cuarto de puente, de medio puente y de puente completo

7.3.2 El circuito de seis hilos

El efecto del circuito de seis hilos es similar al del circuito Kreuzer. Sin embargo únicamente se pueden conectar circuitos de puente completo. La figura 7.3-4 muestra su principio.

Un generador de tensión regulable G proporciona una tensión U_G para la alimentación de un transductor con un puente completo de bandas extensométricas. Debido a la caída de tensión resultante a causa de la corriente de alimentación I_B en las resistencias del cable de alimentación R_{K2} y R_{K3} el transductor recibe una tensión de alimentación U_B menor.

Los dos hilos de detección 6 y 7 devuelven la tensión U_B a un comparador que la compara con la tensión de referencia U_{Ref} . La tensión de referencia U_{Ref} es igual a la tensión requerida de alimentación del puente. Las resistencias de los hilos de detección R_{K6} y R_{K7} no producen ningún efecto negativo porque no pasa corriente a través de ellos. Si U_B es distinto de U_{Ref} , el generador, controlado por el comparador, aumenta su tensión U_G hasta que los hilos de detección detectan que las tensiones U_B y U_{Ref} son iguales. En ese caso el transductor tiene la tensión requerida.

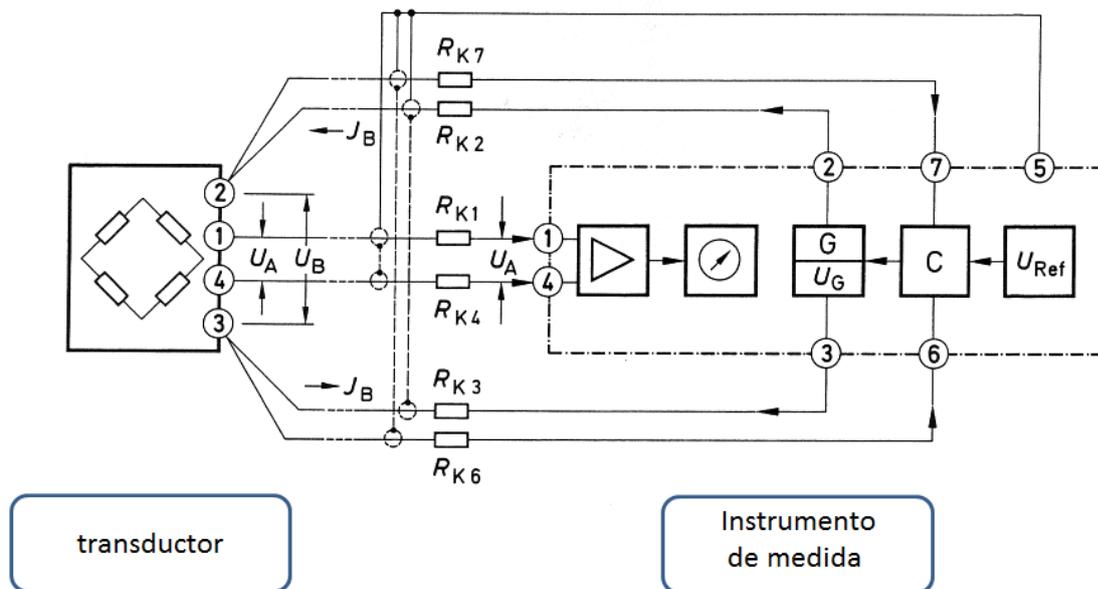


Figura 7.3-4: El principio del circuito de seis hilos

El ajuste de la tensión del generador se puede realizar tanto manual como automáticamente. El ajuste automático tiene la gran ventaja de que siempre inmediatamente compensa las variaciones de las resistencias de los cables de alimentación durante una medición, p.ej. debido a variaciones de temperatura por el coeficiente de temperatura del cobre. De esta forma la señal medida U_A corresponde en todo momento al valor medido. Las resistencias de los cables de señal R_{K1} y R_{K4} tampoco tienen ningún efecto en este caso porque el amplificador de medición tampoco toma corriente

7.4 La influencia de la capacidad eléctrica de los cables

Los hilos de un cable forman condensadores entre si. Su capacidad eléctrica depende de la longitud de los hilos, de la distancia entre ellos, de su diámetro, del dieléctrico (aislamiento) y de la temperatura. Lo mismo es válido para hilos conectados por separado.

La figura 7.4-1 muestra el circuito de un puente de bandas completo con un cable apantallado conectado. El circuito de puente de Wheatstone está formado por las resistencias R_1 a R_4 . Entre los hilos 1 a 4 del cable de conexión se forman las capacidades eléctricas C_1 a C_4 , C_9 hasta C_{10} . Si el cable está apantallado también se forman las capacidades eléctricas C_5 hasta C_8 .

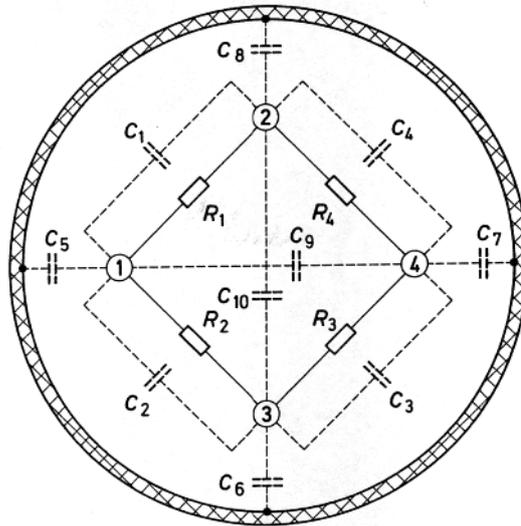


Figura 7.4-1: Las capacidades eléctricas que se forman en el cable de conexión apantallado de un circuito de puente de Wheatstone entre los distintos hilos y entre los hilos y el apantallamiento.

Las capacidades eléctricas de los cables pueden aparecer de dos formas como fuentes de error:

a) la asimetría capacitiva del circuito del puente puede llevar a la sobreexcitación del amplificador de medida y por tanto a medidas erróneas. La sobreexcitación capacitiva solo es posible en los sistemas de frecuencia portadora. El apartado 7.4.1 describe como se puede contrarrestar.

b) Con las resistencias y las capacidades eléctricas de los cables se forman circuitos RC que con señales dinámicas provocan una variación de la fase. Además de la duración ligeramente más larga esto no tiene mayores efectos negativos para los sistemas de tensión continua o de frecuencia portadora baja. En los sistemas de frecuencias portadoras altas pueden aparecer errores de amplitud si el control de demodulación no trabaja sincrónico a la frecuencia portadora desfasada que llega al amplificador. Las medidas para contrarrestar este efecto están descritas en el apartado 7.4.2

Ambos efectos ocurren principalmente en cables de cierta longitud aunque en algunos casos desfavorables también pueden ocurrir incluso en cables cortos si los instrumentos están mal ajustados. En cualquier caso es aconsejable emplear cables capacidad eléctrica baja y de alta calidad y evitar cables innecesariamente largos.

7.4.1 Asimetría capacitiva

La figura 7.4-2 solo muestra una parte de las capacidades eléctricas de los cables que contiene la figura 7.4-1. Se trata de las capacidades eléctricas C_1 a C_4 que están en paralelo a las resistencias del puente R_1 a R_4 formando un puente capacitivo en paralelo al puente resistivo.

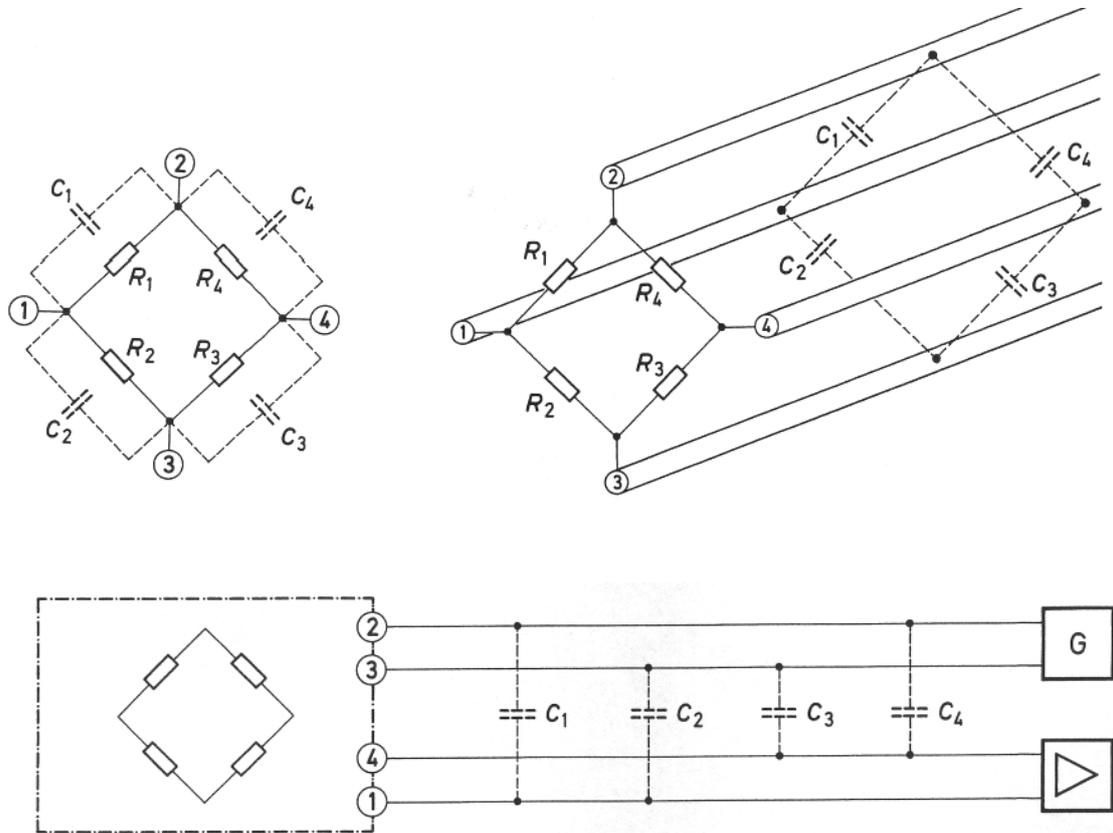


Figura 7.4-2: El puente resistivo y, en paralelo el puente capacitivo que se produce a causa de las capacidades eléctricas de los cables mostrado de tres formas distintas

Para una alimentación de tensión alterna (modo de frecuencia portadora) cada capacidad eléctrica actúa como una impedancia dependiente de la frecuencia. La impedancia capacitiva X_C , es decir la impedancia reactiva de un condensador depende de su capacidad eléctrica C y de la frecuencia f de la tensión alterna.:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \pi \cdot f \cdot C}. \quad (7.4-1)$$

Mientras las 4 capacidades eléctricas sean iguales, el puente capacitivo está equilibrado. Sin embargo, si hay diferencias entre las capacidades eléctricas (asimetría capacitiva) el puente capacitivo está desequilibrado causando una tensión de salida del puente *no* determinada por la magnitud medida. La tensión de salida capacitiva tiene 90° de desfase respecto a la tensión de salida resistiva. El amplificador de seguimiento amplifica ambas tensiones, tanto la tensión capacitiva como la tensión resistiva.

Dependiente de la fase, la demodulación realizada por los amplificadores de medición de frecuencia portadora se encarga de que solo se indique la señal amplificada que corresponde al desequilibrio resistivo del puente y no la que corresponde al desequilibrio capacitivo. Hasta aquí todo parece estar en orden, pero puede que, ante un gran desequilibrio capacitivo del puente el amplificador esté saturado total o parcialmente. Si entonces se le suma un desequilibrio resistivo, el amplificador puede sobresaturarse, lo que implica que su tensión de salida ya no es proporcional al desequilibrio resistivo del puente y que el valor indicado es erróneo. Los amplificadores de medición están provistos de un indicador que muestra su grado de saturación. Esta indicación solo informa sobre el nivel total de saturación del amplificador sin indicar su causa. Se puede minimizar la indicación de saturación con la ayuda del compensador de capacitancia (compensación C) de los amplificadores de frecuencia portadora. De esta forma se consigue el equilibrio capacitivo del puente. Si queda una indicación residual probablemente este causada por un desequilibrio resistivo el puente. Para detalles concretos véanse las instrucciones de uso del amplificador en cuestión.

Es importante mencionar que existen amplificadores de frecuencia portadora sin compensación C y que no la necesitan debido a su diseño especial. Se emplean para sistemas con una baja resolución de señal.

¿Cómo surgen las asimetrías capacitivas?

En la figura 7.4-3 se muestran los circuitos habitualmente utilizados para la medición con bandas extensométricas junto con las capacidades eléctricas efectivas.

En un *circuito de puente completo*, véase la figura 7.4-3a, la disposición geométrica de los hilos de los cables tiene que corresponderse con las esquinas del puente. Si se intercambian dos hilos contiguos surge una asimetría capacitiva con las consecuencias descritas anteriormente.

Para un cable de medición la capacidad eléctrica entre los hilos está entre 70 y 150pF/m, dependiendo de su construcción. Los cables de medición de HBM destacan por su gran simetría capacitiva; incluso en cables de gran longitud normalmente no ocurre una tendencia sistemática. (La asimetría resistiva, es decir las diferencias de resistencia entre los distintos hilos es prácticamente insignificante.) Las dificultades de compensación en las pruebas de simetría capacitiva durante la búsqueda de errores pueden indicar errores de los hilos en las conexiones. Las pruebas se realizan con un instrumento para la medición de la capacidad eléctrica, cuya frecuencia debería estar entre 1000 y 10000Hz si es posible.

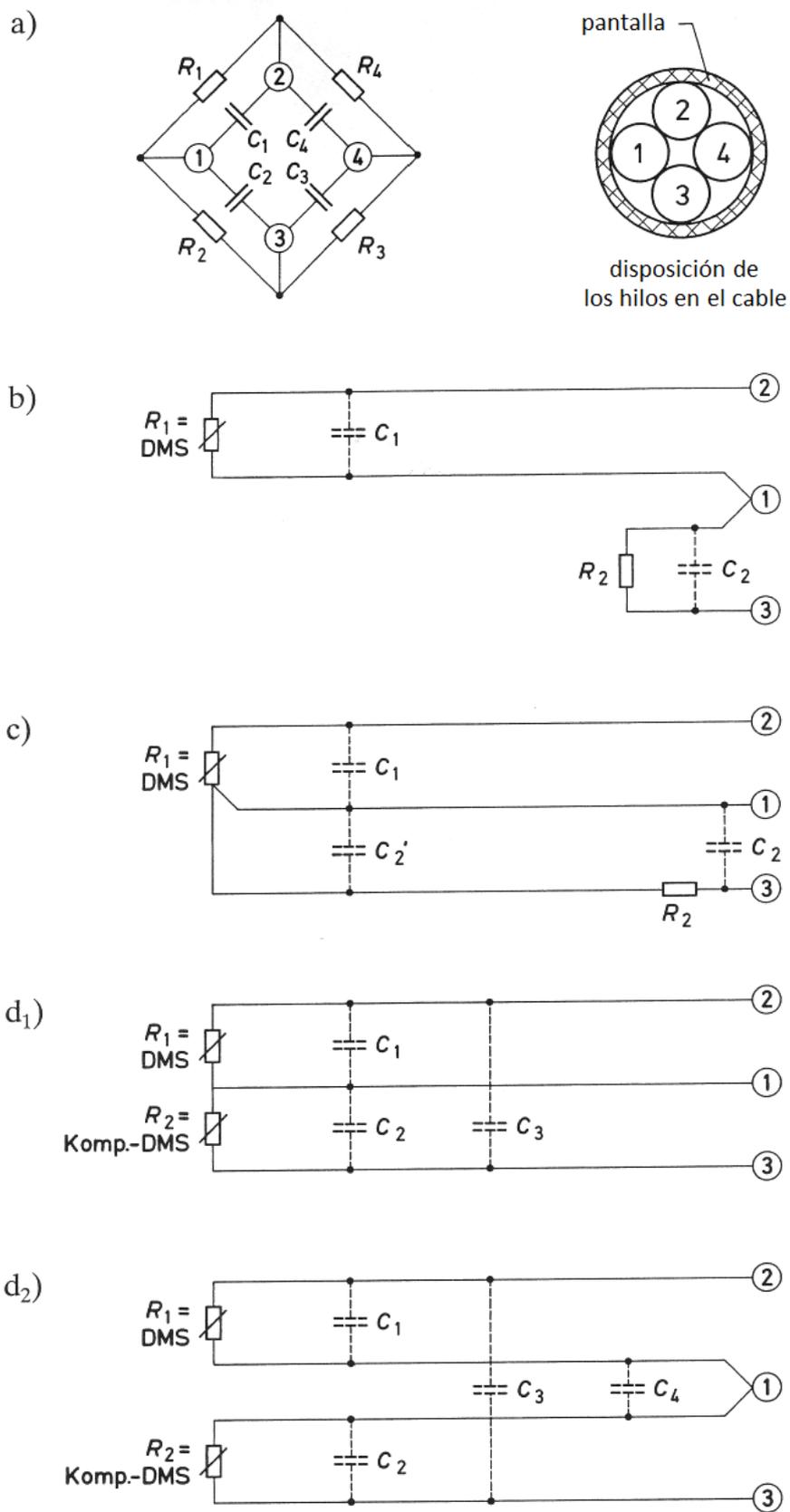


Figura 7.4-3: Representación de las capacidades eléctricas de los cables para varios metodos de conexión de las bandas extensométricas

- a) Las capacidades eléctricas entre los hilos 1 y 2 (C_1) y entre 1 y 3 (C_2) tienen que ser iguales. Una diferencia de 100 a 200 pF se puede tolerar independientemente de la longitud del cable.
- b) Las capacidades eléctricas entre de los hilos 4 y 2 (C_4) y entre 4 y 3 (C_3) también deben corresponderse con una tolerancia de 100 a 200 pF.

No tiene importancia si los valores de la capacidad eléctrica son distintos para a) y b). Lo importante es la simetría dentro de cada una de las mitades del puente 2-1-3 y 2-4-3. Si se da una asimetría mayor de los valores de tolerancia mencionados, se puede compensar con condensadores adicionales. Antes hay que asegurarse de que no hay ningún error de los hilos de conexión. Los condensadores se pueden conectar tanto al principio como al final del cable.

Ocurre una asimetría capacitiva drástica en los circuitos de *cuarto de puente simple*, véase la figura 7.4-3b, cuando la banda (R_1) se conecta con cables largos y la resistencia complementaria (R_2) se conecta con cables cortos cerca del amplificador. En ese caso C_1 es mucho más grande que C_2 . Si la compensación de la capacidad eléctrica del amplificador de medición no es suficiente para compensar la asimetría se puede conectar un condensador del tamaño adecuado entre los puntos 1 y 3.

En principio los circuitos asimétricos (el circuito de cuarto de puente o el de dos cuartos) son los más desfavorables respecto a su susceptibilidad frente a los errores. *El cuarto de puente en conexión de tres hilos*, véase la figura 7.4-1c, compensa la respuesta de temperatura del punto de medición causada por los cables pero no las asimetrías capacitivas. Las conexiones 1 y 3 están ambas conectadas en la banda y por consiguiente tienen el mismo potencial. Debido a este corto circuito la capacidad eléctrica C_2 no resulta efectiva. Si es necesario se debe establecer la simetría con la ayuda de un condensador, éste se tiene que conectar en el amplificador entre las conexiones 1 y 3.

El *cuarto de puente* con bandas de compensación, véase la figura 7.4-3d₁ es una solución mejor, incluso si se utiliza una resistencia de compensación en lugar de una banda de compensación.

Los cables de longitud idéntica 1,2 y 3 aseguran la simetría de las dos capacidades eléctricas C_1 y C_2 . C_3 no tiene influencia; los cables 2 y 3 están prácticamente en cortocircuito por la impedancia interna extremadamente pequeña del generador de alimentación.

No hay diferencias entre el comportamiento capacitivo de la variante 7.4-3d₂ y el de la variante d₁. Lo mismo es válido si se emplean bandas activas de medida en lugar de las bandas de compensación. En ese caso se obtiene un circuito de *medio puente*.

En el *puente de dos cuartos* la asimetría capacitiva se duplica respecto al cuarto de puente simple o al cuarto de puente en conexión de tres hilos.

7.4.2 La rotación de la fase

En el apartado 4.2.3.2 se indican las ventajas que aporta el empleo de cables con apantallamiento para la conexión de la banda o el transductor al amplificador. La conexión a tierra del apantallamiento trenzado de cobre protege contra los efectos de los campos eléctricos, incluyendo las interferencias de 50 Hz de la red de alimentación.

Aparte de las capacidades eléctricas descritas en el apartado 7.4.1, surgen las capacidades eléctricas C_5 a C_8 entre los hilos de los cables y el apantallamiento, así como las capacidades eléctricas diagonales C_9 y C_{10} en el cable de 4 hilos. Esto se muestra en la figura 7.4-4.

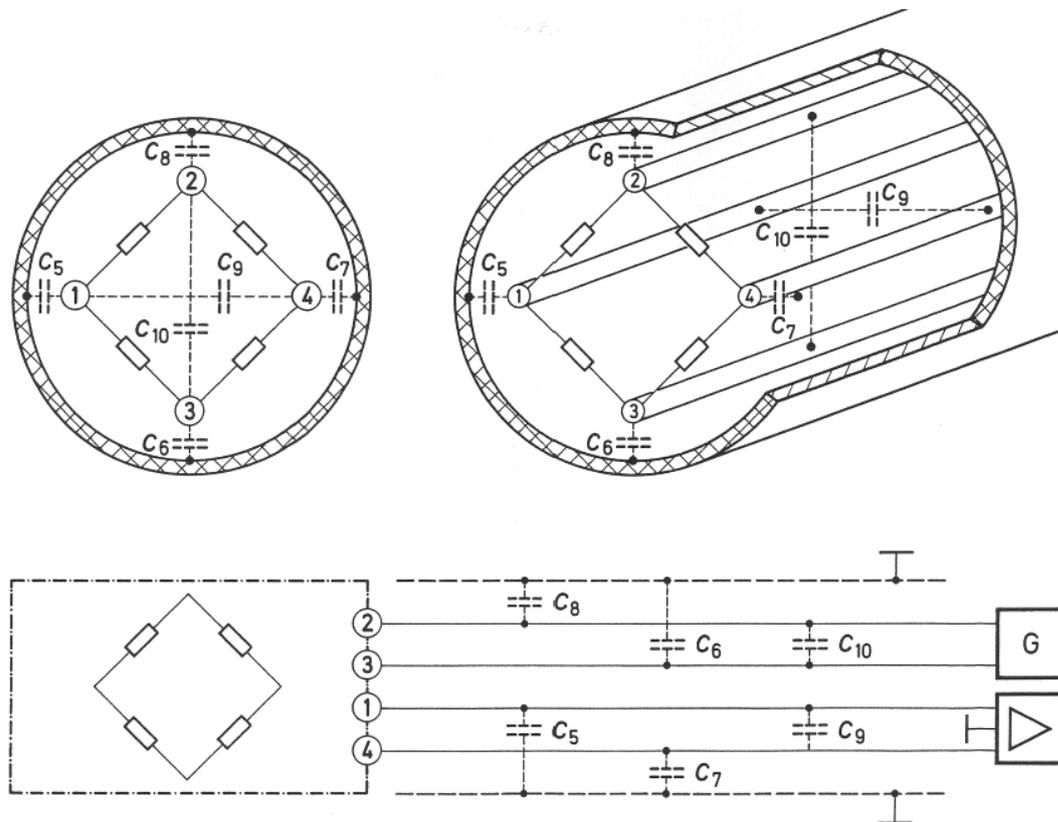


Figura 7.4-4: las capacidades eléctricas de los cables que contribuyen a la rotación de la fase de la señal medida.

En el modo de alimentación con tensión alterna las capacidades eléctricas que actúan entre los hilos de alimentación del puente 2,3 y la pantalla, junto con las capacidades eléctricas C_6, C_8 y C_{10} que interactúan entre sí, sólo suponen una carga adicional para la fuente de alimentación, pero no tienen efectos negativos sobre la medición.

Las capacidades eléctricas C_5, C_7 y C_9 por el contrario forman un circuito $R-C$ a través de los hilos de medida 1 y 4 junto con la resistencia interna del puente del transductor. Debido a la constante de tiempo τ del circuito y a la frecuencia f de la tensión de alimentación (o la frecuencia de la señal medida en caso de alimentación con tensión continua) ocurre una rotación de la fase entre la señal medida en la salida del transductor y la señal que entra en el amplificador.

$$\tau = R \cdot C \quad (7.4-2)$$

$$\varphi = \frac{R \cdot C}{f} \cdot 2 \pi \quad (7.4-3)$$

Con una alimentación de tensión continua sólo es relevante si se tienen que registrar varias señales simultáneamente y sincrónicamente.

En los amplificadores de frecuencia portadora el demodulador tiene que convertir la señal del transductor modulada en amplitud en una señal de salida rectificadas. Para ello la tensión de conmutación para el demodulador tomada del generador (oscilador) tiene que tener la misma relación de fase que la señal del transductor a la entrada del demodulador. El ajuste se realiza empíricamente con la ayuda de un segundo circuito RC en el amplificador de medida, cuya constante de tiempo τ es regulable; de este modo la relación de fase de la tensión de conmutación se puede alinear con la de la señal del transductor. El ajuste simple necesario para ello está descrito en las instrucciones de uso bajo el título „ajuste de la fase de referencia”.

El ajuste de la fase de referencia para evitar errores de medida se realiza del mismo modo y con la misma eficacia para todos los tipos de circuito descritos en apartado 7.2.

7.5 La corrección de la sensibilidad transversal de la banda extensométrica

El término „sensibilidad transversal” indica que una banda no sólo reacciona ante deformaciones en el eje longitudinal de su rejilla de medición con una variación de su resistencia, sino que también lo hace ante deformaciones transversales a su eje principal. La definición de sensibilidad transversal así como sus causas está descrita en el apartado 3.3.3. Afortunadamente, la sensibilidad transversal de las bandas en laminas modernas es muy pequeña. En las figuras 3.3-7a) y b) se indica la sensibilidad transversal de varias bandas lineales y rosetas habituales. Para los tipos más populares la sensibilidad transversal es del $\pm 0,005$ ($\pm 0,5\%$), incluso hay un tipo especial que alcanza el valor ideal de 0 y para el resto la sensibilidad transversal es alrededor del 0.01 (1%). Por eso, en la mayoría de los casos se puede prescindir de la corrección de los valores medidos [7-3], sin que se incurra en errores graves a no ser que haya deformaciones transversales extremadamente grandes que actúen sobre la banda o se requiera una precisión de medida muy alta. Sólo en estos casos merece la pena una corrección.

En el diseño de transductores la sensibilidad transversal tiene un papel subordinado, ya que los transductores se calibran una vez terminados. La sensibilidad transversal de la banda puede contribuir a perturbar una señal medida por el acoplamiento con otras señales únicamente en los transductores multicomponente, e incluso aquí sólo lo hace de forma parcial.

Nota:

Los transductores multicomponente son aquellos que p.ej. pueden medir fuerzas en distintas direcciones axiales independientemente unas de otras. Si p.ej. una fuerza que actúa sobre el eje-X del sistema de medición influye sobre el eje-Y de manera indeseada, ésto se conoce como acoplamiento cruzado, un término empleado para un efecto similar en electro-acústica es diafonía.

En los apartados siguientes se indican fórmulas para la corrección de los valores de medición. Las explicaciones teóricas con las derivaciones de las fórmulas se pueden encontrar en [7-4, 7-5].

Antes de centrarse en la corrección de errores en si es necesario reconsiderar el método para la determinación del factor de banda k , véase el apartado 3.3.1. Las bandas extensométricas se calibran, según un método aceptado internacionalmente, en el campo de tensión uniaxial de una viga de acero, (véase [2-1]). Un estado de tensión uniaxial produce un campo de deformación biaxial. Las dos direcciones principales de la deformación están alineadas en la dirección longitudinal, $\varepsilon_1 = \varepsilon_l$ y en la dirección transversal, $\varepsilon_2 = \varepsilon_q$. La relación entre ambas deformaciones se expresa mediante el coeficiente de Poisson ν (véanse los apartados 2.2.4 y 2.3.3). El coeficiente de Poisson para la viga de calibración se denomina ν_0 ; para una viga de calibración de acero es igual a

$$\nu_0 = \frac{|\varepsilon_q|}{\varepsilon_l} = 0,285.$$

Para la calibración se aplica la banda con su eje longitudinal orientado en la dirección de la deformación longitudinal sobre la viga de calibración. Como resultado de la calibración se obtiene por definición el factor de banda k :

$$k = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_l}. \quad (7.5-1)$$

Por motivos históricos aquí no se considera la deformación transversal ε_q que actúa sobre la banda.

Es obvio que una banda con cierta sensibilidad para la deformación transversal que actúa sobre la viga de calibración experimenta una variación de su resistencia debido a la deformación transversal ε_q .

Con
$$\varepsilon_q = -\nu \cdot \varepsilon_l \quad (7.5-2)$$

La variación relativa de la resistencia de la banda es igual a

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k_1 (\epsilon_1 - q \cdot \nu_0 \cdot \epsilon_1) = k_1 \cdot \epsilon_1 (1 - q \cdot \nu_0). \quad (7.5-3)$$

Donde q es la sensibilidad transversal de la banda, véase el apartado 3.3.3.

7.5.1 Correcciones para bandas extensométricas individuales

Las mediciones que se realizan en base a las suposiciones mencionadas anteriormente y que emplean el factor k de banda proporcionado por el fabricante solamente son exactas si se cumplen los siguientes requisitos:

1. si la banda no es sensible en dirección transversal ($q = 0$),
2. si en un campo de deformación biaxial, el cociente $\epsilon_q / \epsilon_l = \nu_0$ y la banda mide en la dirección de ϵ_l , es decir en las condiciones de calibración.

Para condiciones distintas surge un error f_ϵ cuya magnitud depende tanto de la sensibilidad transversal como del cociente de las deformaciones que actúan sobre la banda en dirección longitudinal y transversal.:

$$f_\epsilon = \frac{q}{1 - \nu_0 \cdot q} \left(\nu_0 + \frac{\epsilon_q}{\epsilon_l} \right) \quad (7.5-4)$$

Como consecuencia de la baja sensibilidad transversal de la banda los errores se suelen encontrar dentro de los límites aceptables. El error porcentual de la deformación menor solo crece si la relación entre las deformaciones en las direcciones principales es extrema. El diagrama de la figura 7.5-1. proporciona una impresión general. Contiene, como parámetro once relaciones ϵ_q / ϵ_l distintas para valores de la sensibilidad transversal $q = +0,03$ hasta $-0,03$. Los valores intermedios se pueden obtener mediante interpolación.

Para el empleo del diagrama se asume el conocimiento de la relación entre las deformaciones ϵ_q / ϵ_l . En un campo de tensión uniaxial la relación ϵ_q / ϵ_l en la dirección principal es:

$$\frac{\epsilon_q}{\epsilon_l} = -1 \cdot \nu_0 \quad (7.5-5)$$

Los coeficientes de Poisson para distintos materiales se encuentran en la tabla 2.3-2. El empleo del diagrama se explicara a partir de tres ejemplos

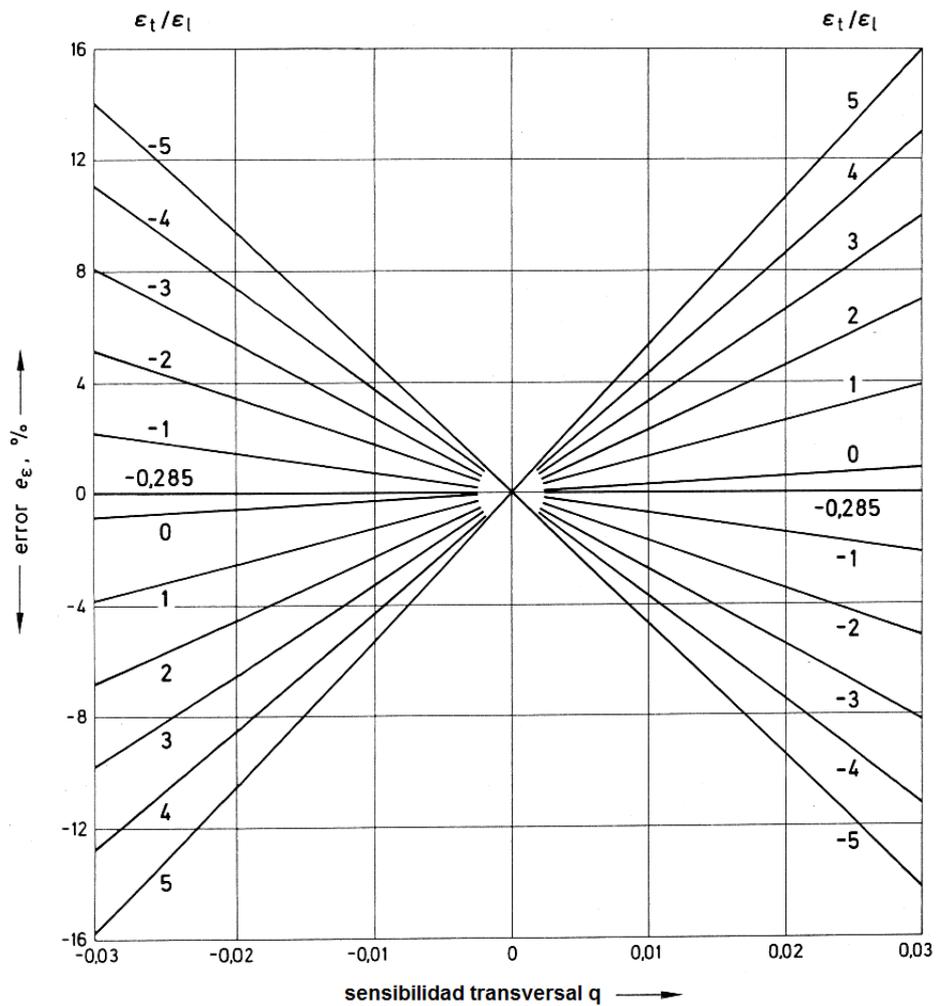


Figura 7.5-1: Diagrama para determinar el error de medida debido a la sensibilidad transversal de una banda

Ejemplo 1:

$q = -0,01$;

campo uniaxial de tensión = campo biaxial de deformación;

material del componente: aluminio, $\nu = 0,33$;

Se realizó la medición de la tensión principal, $\epsilon_1 = \epsilon_l$.

Se busca el error debido a la sensibilidad transversal q de la banda:

Nota:

Las deformaciones se denotan con índices distintos. Los índices 1 y 2 (ϵ_1, ϵ_2) denotan las direcciones principales, es decir las direcciones perpendiculares (ortogonales) en las cuales ocurren los valores extremos sobre el objeto a medir.

Los índices l y q (ε_l , ε_q) también se refieren a las deformaciones perpendiculares correspondientes a la dirección de su efecto sobre la banda. En algunos casos aparecen los índices x e y (ε_x , ε_y) que se refieren a las direcciones x e y de un sistema axial alineado aleatoriamente. Las direcciones x e y pueden ser distintas a las direcciones principales 1 y 2 y a las direcciones de la banda l y q .

Solución:

En primer lugar se calcula la relación $\varepsilon_q/\varepsilon_l$:

$$\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l} = -1 \cdot \nu = -0,33.$$

Para el valor -0,33 no hay ninguna curva paramétrica en el diagrama. El valor se encuentra a través de la interpolación. El punto está tan cerca del eje de error cero, es decir la línea horizontal en el centro del diagrama, que la evaluación gráfica es prácticamente imposible. El error es aproximadamente +0,07 % y por lo tanto insignificante.

Ejemplo 2:

Los mismos datos que en el ejemplo 1, solo que en este caso se busca el error que ocurre si se midió la deformación transversal ε_2 del objeto. En este caso $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$.

Solución:

$$\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = -\frac{1}{\nu} = -\frac{1}{0,33} = -3.$$

En el diagrama se sigue la curva -3 hasta que cruza la vertical por la abscisa de coordenada $q = -0,01$. Desde ese punto se mira horizontalmente hacia la izquierda y se obtiene el resultado sobre la escala de error. Los valores intermedios se obtienen por interpolación.

Resultado:

$$f_{\varepsilon_1} = f_{\varepsilon_2} = +2,8\%$$

Ejemplo 3:

$q = +0,015$;

campo biaxial de deformación $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = \varepsilon_l/\varepsilon_q = 5 : 1$;

medición en dirección $\varepsilon_1 = \varepsilon_l$;

$\varepsilon_q/\varepsilon_1 = 1 : 5 = +0,2$;

Error: $f_{\varepsilon_1} = f_{\varepsilon_2} = +1,2\%$

El diagrama de la figura 7.5-2. aporta un método igual de simple para la corrección de errores. Se utiliza de manera similar al diagrama de error. El valor correcto de la deformación ϵ se obtiene multiplicando el valor de deformación indicado ϵ_a coeficiente el factor de corrección C tomado del diagrama:

$$\epsilon = \epsilon_a \cdot C. \quad (7.5-6)$$

Para el ejemplo 1 no se necesita corrección.

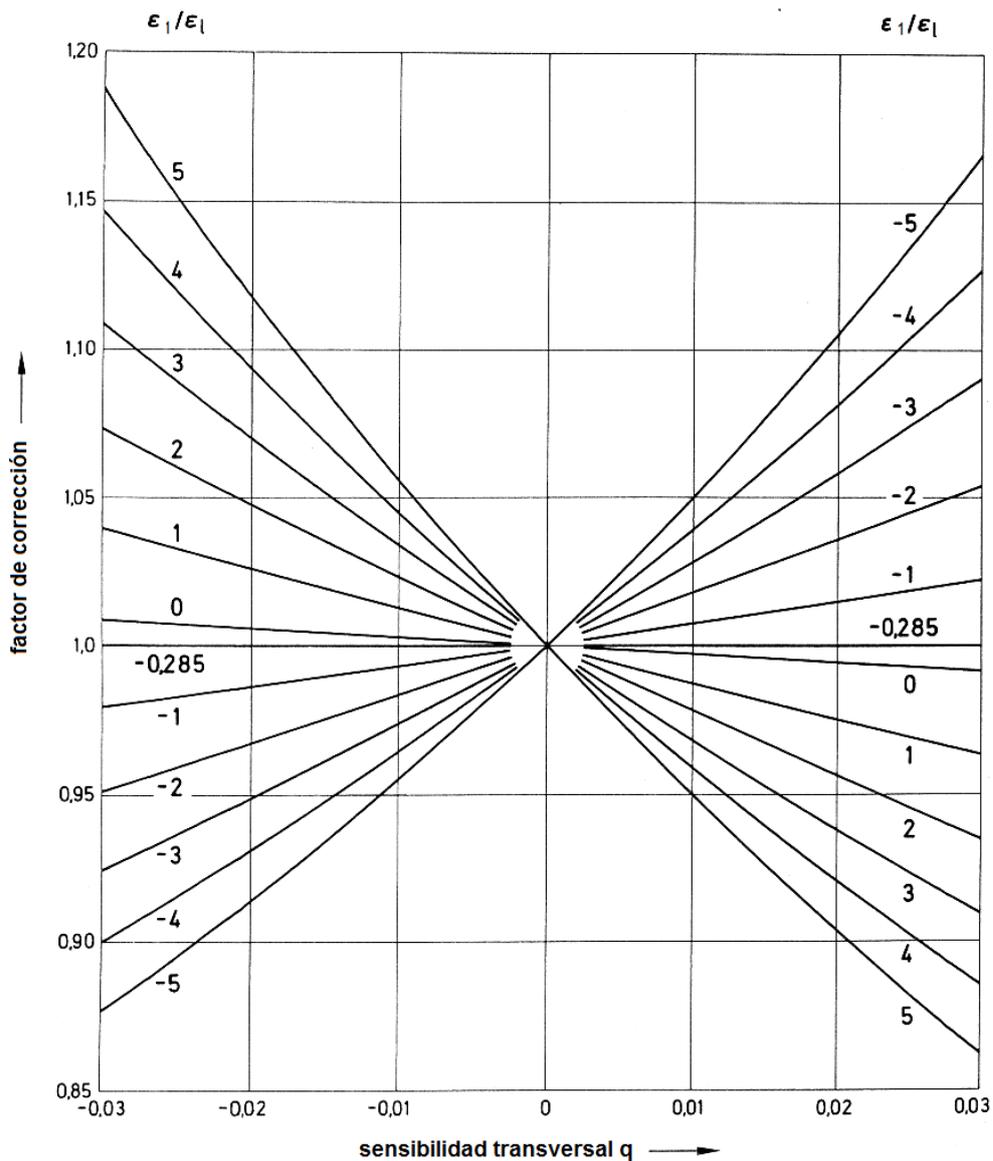


Figura 7.5-2: Diagrama para determinar el factor de corrección C para la corrección de los valores medidos obtenidos con bandas sensibles a la deformación transversal

Para el ejemplo 2 se obtiene $C = 0,974$.

$$\varepsilon_a = \varepsilon + f = 100 \% + 2,8 \% = 102,8 \%,$$

$$\varepsilon = \varepsilon_a \cdot C = 102,8 \% \cdot 0,974 = 100,1 \%.$$

Margen de error: $+ 0,1 \%$.

Para el ejemplo 3 se obtiene $C = 0,991$.

$$\varepsilon_a = 100 \% + 1,2 \% = 101,2 \%,$$

$$\varepsilon = \varepsilon_a \cdot C = 101,2 \% \cdot 0,991 = 100,2 \%.$$

Margen de error: $+ 0,2 \%$.

Para el cálculo y la corrección del error se debe conocer el valor de la relación $\varepsilon_q/\varepsilon_l$. Este conocimiento se tiene, p.ej. para condiciones de tensión uniaxial con coeficiente de Poisson conocido o para una carga de torsión pura sobre un eje ($\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$). Para los casos restantes se tienen que medir las deformaciones tanto en dirección longitudinal como en dirección transversal a la rejilla de medición, p.ej. con rosetas X, véase la sección 3.2.2.2.

7.5.2 Correcciones para bandas en roseta

Para las bandas en lámina la sensibilidad transversal de rejillas geoméricamente idénticas depende ligeramente de la dirección del eje principal de la rejilla respecto a la dirección del laminado. Para las rosetas X con las rejillas colocadas en $0^\circ/90^\circ$ los ejes de las rejillas de medición se colocan durante la fabricación en un ángulo de $\pm 45^\circ$ respecto a la dirección del laminado y por eso tienen la misma sensibilidad transversal. Para las rosetas de tres rejillas de los tipos $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ y $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ esta concordancia solo se puede alcanzar de forma aproximada. Sin embargo las diferencias son tan pequeñas que en la práctica se puede calcular con los mismos valores. Por eso en el diagrama de la figura 3.3-7b solo se indica un valor.

7.5.2.1 Las rosetas X $0^\circ/90^\circ$

Las rosetas X con dos rejillas de medición colocadas a 90° la una de la otra, véase el apartado 3.2.2.2., normalmente se emplean para mediciones de deformación en campos de deformación biaxiales con direcciones principales conocidas. Para ello se colocan los ejes de medición 1 y 2 de forma que concuerden con los ejes principales ε_1 y ε_2 . A partir de los valores medidos ε_1 y ε_2 se pueden calcular las tensiones principales σ_1 y σ_2 , véase el apartado 8.2.1.

No obstante el cálculo para la corrección presentado a continuación no sólo es válido para la orientación en las direcciones principales sino que es válido para cualquier dirección del sistema de coordenadas dentro del campo de deformación. Por eso a partir de este punto se emplearán los índices x e y en lugar de 1 y 2 ($\varepsilon_x, \varepsilon_y$ en lugar de $\varepsilon_1, \varepsilon_2$). Se pueden calcular las deformaciones ε_x y ε_y a partir de los valores indicados (medidos) ε_{xa} y ε_{ya} para cualquier orientación del sistema de coordenadas ortogonal formado por las rejillas de medición.

$$\varepsilon_x = \frac{1 - \nu_0 \cdot q}{1 - q^2} (\varepsilon_{xa} - q \cdot \varepsilon_{ya}) \approx (1 - \nu_0 \cdot q) (\varepsilon_{xa} - q \cdot \varepsilon_{ya}) \quad (7.5-7)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1 - \nu_0 \cdot q}{1 - q^2} (\varepsilon_{ya} - q \cdot \varepsilon_{xa}) \approx (1 - \nu_0 \cdot q) (\varepsilon_{ya} - q \cdot \varepsilon_{xa}) \quad (7.5-8)$$

Las formas aproximadas de las ecuaciones (7.5-7) y (7.5-8) son suficientemente exactas para los requisitos prácticos ya que $1 - q^2$ es mayor que 0,999 incluso para $q = 0,03$.

De forma alternativa también se puede emplear el diagrama de la figura 7.5-2 para calcular la corrección. Primero se tiene que calcular la relación entre la deformación longitudinal y la transversal para cada una de las bandas; en este caso es igual a:

$$\frac{\varepsilon_{ya}}{\varepsilon_{xa}} \quad \text{para la banda en dirección } x$$

$$\frac{\varepsilon_{xa}}{\varepsilon_{ya}} \quad \text{para la banda en dirección } y$$

A continuación se busca el valor indicado para q y se sigue la línea vertical hasta llegar al valor de la relación de deformación $\varepsilon_q/\varepsilon_l$ apropiado para la rejilla de medición de la roseta. Desde aquí se traza una línea horizontal hasta la escala de ordenada, donde se encuentran los factores de corrección C_x y C_y .

$$\varepsilon_x = C_x \cdot \varepsilon_{xa}, \quad (7.5-9)$$

$$\varepsilon_y = C_y \cdot \varepsilon_{ya}. \quad (7.5-10)$$

Ambos métodos se explicarán a partir de un ejemplo y se compararán los resultados.

Ejemplo:

Roseta X a $0^\circ/90^\circ$,

$$q = 0,03$$

$$\nu_0 = 0,285.$$

Valores medidos:

$$\varepsilon_{xa} = + 1280 \mu\text{m/m}$$

$$\varepsilon_{ya} = + 750 \mu\text{m/m}.$$

Sustituyéndolos en las ecuaciones. (7.4-7) y (7.4-8) se obtiene:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= (1 - 0,285 \cdot 0,03) \cdot (1280 - 0,03 \cdot 750) = 1247 \mu\text{m/m}, \\ \varepsilon_y &= (1 - 0,285 \cdot 0,03) \cdot (750 - 0,03 \cdot 1280) = 706 \mu\text{m/m},\end{aligned}$$

Empleando el diagrama de corrección de la figura 7.5-2 se obtiene:

$$\begin{aligned}\frac{\varepsilon_{ya}}{\varepsilon_{xa}} &= \frac{750}{1280} = 0,59 \approx 0,6 && \text{para la rejilla X,} \\ \frac{\varepsilon_{xa}}{\varepsilon_{ya}} &= \frac{1280}{750} = 1,71 \approx 1,7 && \text{para la rejilla Y,} \\ C_x &= 0,977; C_y = 0,945.\end{aligned}$$

Y por consiguiente

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= C_x \cdot \varepsilon_{xa} = 0,977 \cdot 1280 = 1250 \mu\text{m/m}. \\ \varepsilon_y &= C_y \cdot \varepsilon_{ya} = 0,945 \cdot 750 = 708 \mu\text{m/m}.\end{aligned}$$

7.5.2.2 Rosetas R

Si se desconocen las direcciones de los ejes principales, se necesitan tres medidas independientes entre sí para poder determinar completamente el estado de deformación o tensión. Las rosetas empleadas habitualmente para ello están descritas en el apartado 3.2.2.2. En este caso se consideran las rosetas con las rejillas de medición colocadas en ángulos de $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ o $0^\circ/60^\circ/120^\circ$. Ambas son igualmente adecuadas pero se requieren cálculos distintos para la corrección de la sensibilidad transversal. (Los métodos para calcular las deformaciones o tensiones principales y sus direcciones están descritos en el apartado 8.2.2)

Rosetas R $0^\circ/45^\circ/90^\circ$

Los valores de medición de las rejillas a 0° - y 90° -se corrigen de la misma forma que los de la Roseta X $0^\circ/90^\circ$. Para ello se emplean las ecuaciones (7.5-7) y (7.5-8) en sus variantes (7.5-11) y (7.5-13).

El diagrama de la figura 7.5-2 se puede emplear del mismo modo para determinar los factores de corrección.

La rejilla a 45° requiere una ecuación de corrección distinta. Para simplificar a continuación se dan las tres ecuaciones sin el divisor $(1-q^2)$.

$$\varepsilon_{0^\circ} = (1 - \nu_0 \cdot q) \cdot (\varepsilon_{0^\circ a} - q \cdot \varepsilon_{90^\circ a}) \quad (7.5-11)$$

$$\varepsilon_{45^\circ} = (1 - \nu_0 \cdot q) \cdot [(\varepsilon_{45^\circ a} - q(\varepsilon_{0^\circ a} + \varepsilon_{90^\circ a} - \varepsilon_{45^\circ a}))] \quad (7.5-12)$$

$$\varepsilon_{90^\circ} = (1 - \nu_0 \cdot q) \cdot (\varepsilon_{90^\circ a} - q \cdot \varepsilon_{0^\circ a}) \quad (7.5-13)$$

El índice a siempre denota el valor de la deformación indicado; $\varepsilon_{0^\circ a}$ es el valor indicado, es decir el valor medido de la deformación por la rejilla en la dirección 0° , etc.

ε_{0° , ε_{45° y ε_{90° son los valores corregidos de la deformación en las direcciones 0° , 45° y 90° .

Rosetas R $0^\circ/60^\circ/120^\circ$

La corrección de los valores medidas de las rejillas en 0° , 60° y 90° se realiza de forma similar pero según las ecuaciones siguientes.

$$\varepsilon_{0^\circ} = (1 - \nu_0 \cdot q) \cdot \left[\left(1 + \frac{q}{3} \right) \cdot \varepsilon_{0^\circ a} - \frac{2}{3} q \cdot (\varepsilon_{60^\circ a} + \varepsilon_{120^\circ a}) \right] \quad (7.5-14)$$

$$\varepsilon_{60^\circ} = (1 - \nu_0 \cdot q) \cdot \left[\left(1 + \frac{q}{3} \right) \cdot \varepsilon_{60^\circ a} - \frac{2}{3} q \cdot (\varepsilon_{120^\circ a} + \varepsilon_{0^\circ a}) \right] \quad (7.5-15)$$

$$\varepsilon_{120^\circ} = (1 - \nu_0 \cdot q) \cdot \left[\left(1 + \frac{q}{3} \right) \cdot \varepsilon_{120^\circ a} - \frac{2}{3} q \cdot (\varepsilon_{0^\circ a} + \varepsilon_{60^\circ a}) \right] \quad (7.5-16)$$

8 La ley de Hooke para la determinación de la tensión mecánica del material a partir de mediciones de deformación

Los métodos para el cálculo de la tensión del material a partir de mediciones de deformación se basan en la ley de Hooke. En su forma más simple la ley de Hooke es

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (8.0-1)$$

σ = tensión del material (véase el apartado 2.2.1)

ε = deformación (véase el apartado 2.1)

E = módulo de elasticidad o módulo de Young del material (véase el apartado 2.3.1)

Esta versión de la ley de Hooke solo es válida para el estado de tensión uniaxial, otros estados de tensión requieren versiones extendidas (véase el apartado 2.2.4 y los apartados a continuación).

En este contexto el lector deberá tener en cuenta un factor importante:

Con las mediciones de deformación únicamente se puede determinar la diferencia entre el estado inicial y un estado posterior tras una variación. El estado inicial puede ser un estado libre de carga o bien un estado de pre-carga significativa, p.ej. por el propio peso del objeto, p.ej. un puente.

Las situaciones de precarga, o también de carga residual, véase el apartado 2.2.3 sólo se pueden medir si se permite una interferencia con el objeto, p.ej. haciendo un pequeño agujero con un taladro, véase el apartado 8.3.

8.1 El estado uniaxial de tensión

El caso más simple de tensión uniaxial ocurre con las barras de tracción y presión. El valor máximo de la tensión de tracción (o compresión) se da en la dirección en la que actúa la fuerza. Las tensiones en todas las otras direcciones son más pequeñas y obedecen a la relación:

$$\sigma = f(\varphi) = \frac{1}{2} \sigma_{\max} (1 + \cos 2\varphi). \quad (8.1-1)$$

φ = ángulo entre la dirección activa de la fuerza y la dirección principal que se está considerando.

En la figura 8.1-1 se representa esta relación para una barra de tracción en un diagrama polar.

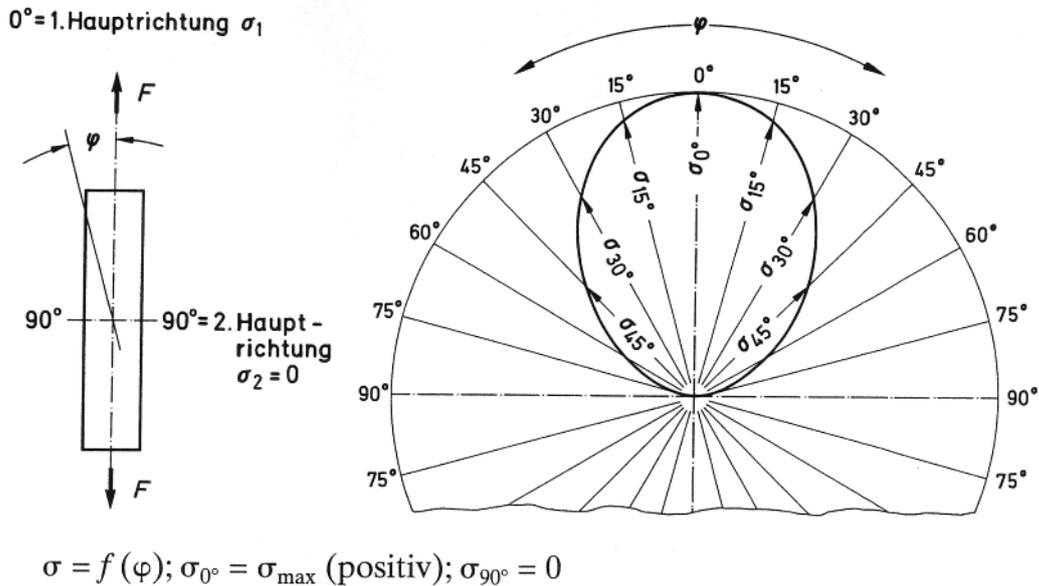


Figura 8.1-1: Distribución de la tensión en una barra de tracción

La figura 8.1-2 muestra la relación (8.1-1) para una barra de presión

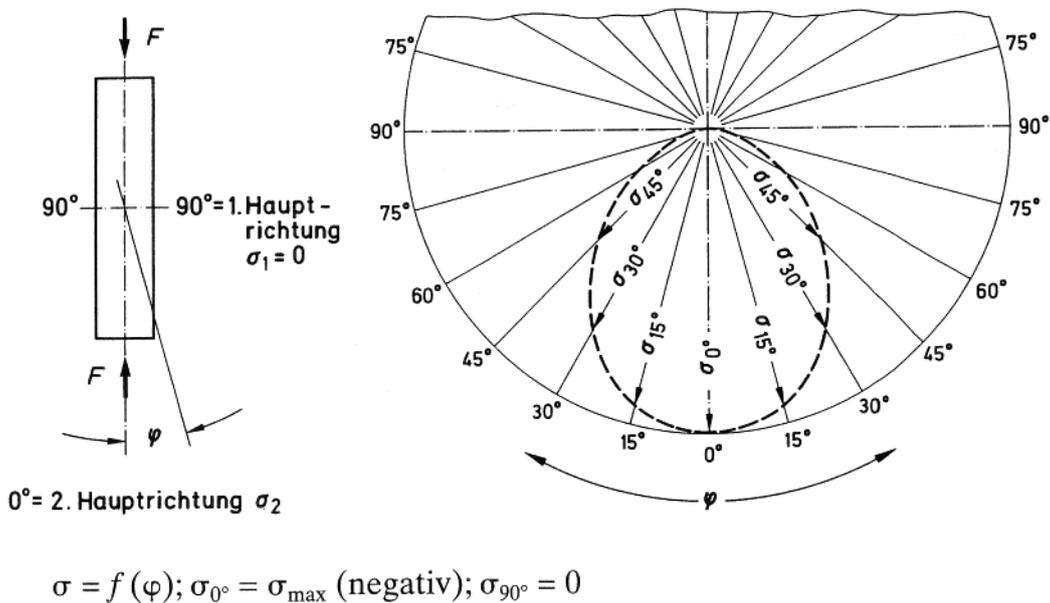


Figura 8.1-2: Distribución de la tensión en una barra de presión

Nota:

Las direcciones principales 1 y 2 siempre son perpendiculares entre si. La dirección principal 1 siempre es aquella con el algebraicamente mayor valor numérico; por eso cambian los índices para las barras de tracción y presión.

Si se observa la distribución de la deformación de forma similar a la distribución la tensión se vera que se obtiene un estado de deformación biaxial a pesar del estado de tensión uniaxial.

Hay dos direcciones definidas, una en la dirección de la fuerza (0°) y la otra perpendicular a ella (90°).

Partiendo de la deformación principal $\varepsilon_{0^\circ} = \varepsilon_1$, las deformaciones ε_φ , que ocurren en los ángulos $\varphi > 0^\circ \dots 90^\circ$ respecto a la dirección x se pueden calcular según la relación:

$$\varepsilon = f(\varphi) = \frac{1}{2} \varepsilon_1 [1 - \nu + \cos 2 \varphi (1 + \nu)]. \quad (8.1-2)$$

El cociente entre las dos deformaciones también se denomina factor de sensibilidad transversal o su valor recíproco, el cociente de Poisson ν (véase el apartado 2.2.3):

$$\varepsilon_2 = -\nu \cdot \varepsilon_1 \quad (8.1-3)$$

En las figuras 8.1-3 y 8.1-4 se representa la relación (8.1-2) para una barra de tracción y una barra de presión respectivamente.

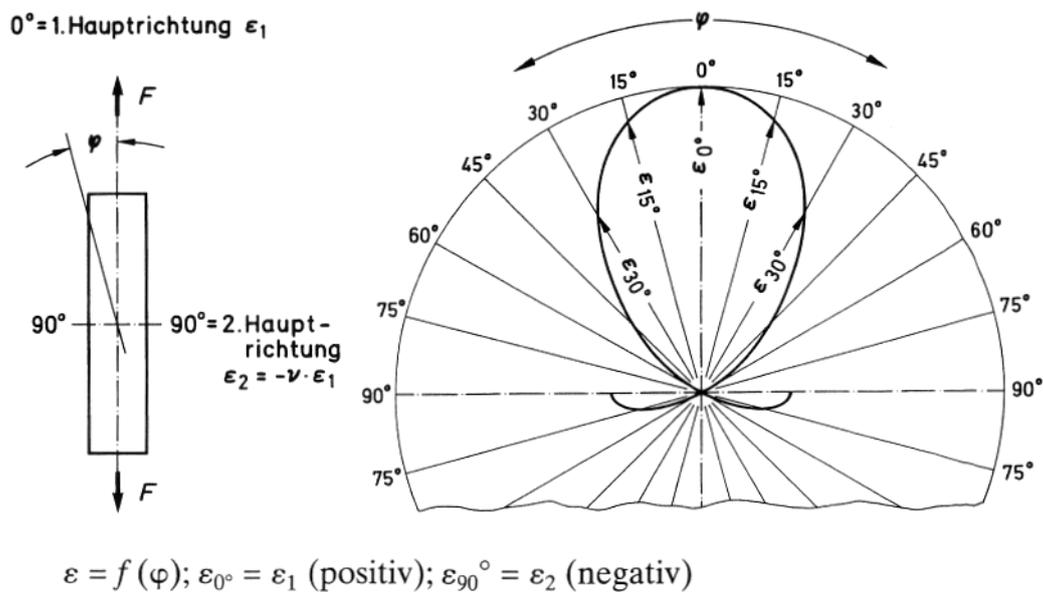


Figura 8.1-3: Distribución de la tensión en una barra de tracción

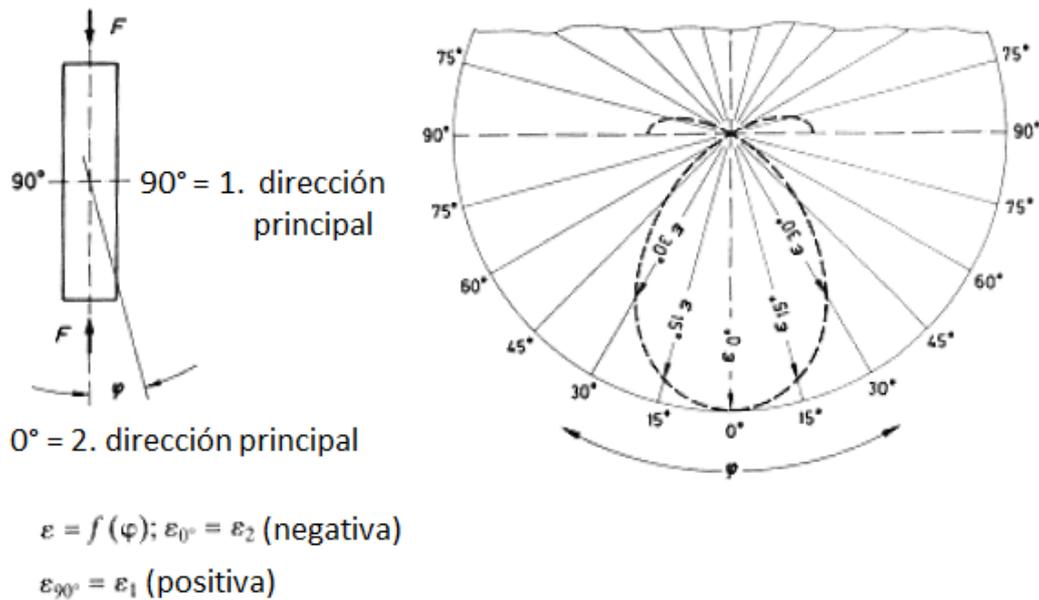


Figura 8.1-4: Distribución de la deformación en una barra en compresión

Nota:

Los diagramas de las figuras 8.1.-3 y 8.1.-4 están dibujados para un material con un coeficiente de Poisson de $\nu = 0,3$. En este caso la deformación $\varepsilon_\varphi = 0$ en un ángulo de $\varphi = 61^\circ 20'$, es decir el cruce por el punto cero entre la región de deformación negativa y positiva es en esta dirección.

La diferencia mostrada en los diagramas entre la distribución de la tensión y la distribución de la deformación en función de la dirección activa de la fuerza lleva a una conclusión importante:

La tensión del material σ solamente se puede calcular a partir de la deformación medida ε según la ley de Hooke para el estado uniaxial de tensión (ecuación 8. 0-1) si la deformación se midió en la dirección activa de la fuerza (la dirección 0° en las figuras 8.1-3 y 8.1-4).

En la dirección transversal (90°) no hay tensión del material aunque se pueda medir una deformación (contracción transversal, dilatación transversal).

Por lo tanto para obtener un resultado fiable se tiene que conocer la dirección activa de la fuerza y se tiene que medir la deformación en esa dirección. Si la dirección activa de la fuerza es desconocida o se conoce solo aproximadamente, las mediciones y también la evaluación se deberían llevar a cabo como en el estado de tensiones biaxial con direcciones principales desconocidas, según el apartado 8.2.2.

8.2 El estado biaxial de tensiones

En el ámbito del análisis experimental de tensiones el estado uniaxial de tensiones es más bien una excepción. El estado biaxial de tensiones es mucho más frecuente y su determinación no se puede realizar con el método simple empleado para el estado uniaxial de tensiones ya que conllevaría a errores significativos, véase el apartado 8.1.

En un estado de tensión plana aparecen las tensiones normales extremas σ_1 y σ_2 en las direcciones perpendiculares 1 y 2. Las tensiones σ_1 y σ_2 se denominan tensiones principales y de forma análoga las direcciones 1 y 2 son las direcciones principales del campo de tensión. Si se conocen las tensiones principales y sus direcciones activas el estado biaxial de tensiones está definido inequívocamente.

Se conocen las direcciones principales de la tensión p.ej en la superficie de un recipiente cilíndrico bajo con presión interna, en un eje sometida a una torsión pura o en una zona alejada de los bordes de una placa a flexión.

Se tiene que asumir que las direcciones principales se desconocen en otros objetos bajo la influencia simultánea de distintas acciones físicas, como p.ej. fuerza normal y torsión o torsión y flexión etc.

8.2.1 El estado biaxial de tensiones con direcciones principales conocidas

La relación entre las tensiones y las deformaciones en el campo biaxial de tensiones y la interacción de las tensiones longitudinales y transversales se explicara a partir de un ejemplo. El estado inicial del objeto utilizado para este ejemplo es un elemento cuadrado de una superficie libre de carga tal y como muestra la figura 8.2-1a.

A este elemento plano se le aplica una fuerza de tracción F_1 actuando uniformemente sobre toda su superficie en la dirección 1-1, véase la figura 8.2-1b. Se produce una tensión en el material σ_1 así como una deformación longitudinal ε_1 en la dirección activa de la fuerza. La tensión del material en dirección transversal $\sigma_2 = 0$ (estado uniaxial de tensiones) y la deformación transversal ε_2 es negativa (contracción transversal).

Si se aplica una segunda fuerza de tracción F_2 perpendicular a la dirección 1-1, en dirección 2-2 sobre este elemento cargado de forma uniaxial se produce una superposición de las dos tensiones σ_1 y σ_2 con un efecto reactivo sobre el estado de deformación existente, véase la figura 8.2-1c. Surge una deformación ε_2 en la dirección 2-2 que se superpone a la contracción transversal del estado de carga b (llegando a superarla en este ejemplo).

Debido a la carga en la dirección 2-2 se produce una contracción transversal en la dirección 1-1, que a su vez se superpone a la deformación existente en el estado de carga *b* reduciéndola. A causa de esta superposición de la deformación y la contracción transversal de ambas cargas en las direcciones principales 1 y 2 se pierde la simple relación lineal entre la tensión y la deformación que fórmula la ley de Hooke para el estado uniaxial de tensiones. La ecuación (8.0-1) ya no se puede emplear, ya que no considera la influencia de la deformación transversal, véase la nota de la página 216. Por eso tampoco es posible la determinación del estado biaxial de tensiones a partir de una sola medida. Las deformaciones principales ε_1 y ε_2 que actúan en las direcciones principales 1 y 2 tienen que medirse por separado.

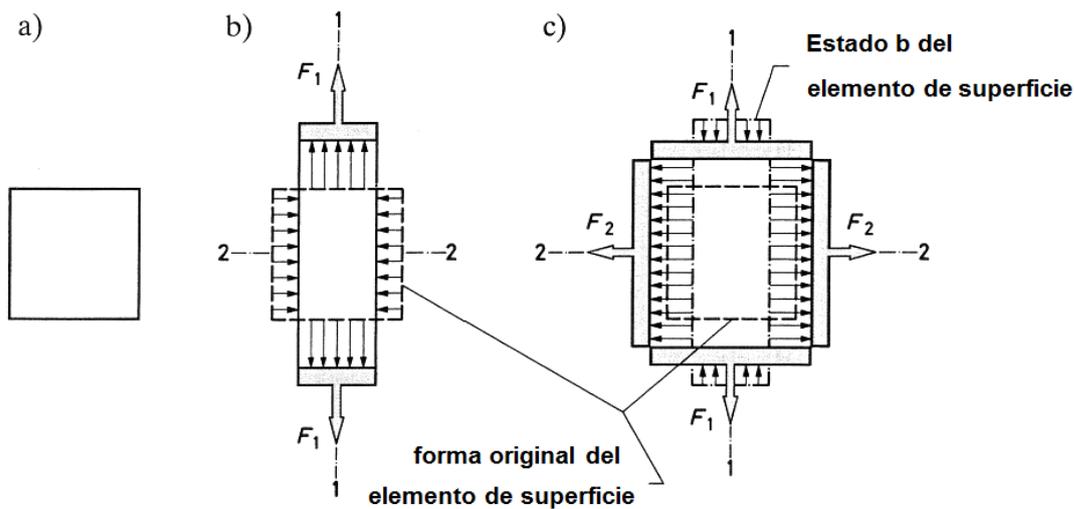


Figura 8.2-1: Estado biaxial de tensiones mostrando el estado de deformación resultante.

- a) elemento de superficie libre de carga
- b) elemento de superficie con una carga en la dirección 1
- c) elemento de superficie con cargas en las direcciones 1 y 2

Las tensiones principales normales σ_1 y σ_2 del estado biaxial de tensiones se calculan según la ley de Hooke en su versión extendida a partir de las deformaciones principales (ε_1 y ε_2) medidas, del módulo de elasticidad E del material y del coeficiente de Poisson ν del material:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_1 + \nu \cdot \varepsilon_2) \quad (8.2-1)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_2 + \nu \cdot \varepsilon_1) \quad (8.2-2)$$

Se asume que la tensión σ_3 en la tercera dirección principal (perpendicular a la superficie) es igual a cero.

Para la evaluación de la medición siempre se deben emplear las ecuaciones (8.2-1) y (8.2-2), incluso aunque $\varepsilon_2 = 0$!

Nota:

En el ejemplo presentado las dos tensiones principales normales σ_1 y σ_2 son positivas y de magnitud similar. Es posible que ambas tensiones sean muy distintas respecto a su magnitud o que sean de distinto signo, lo cual resultaría en un estado de deformación mucho más complicado. Puede ser que en una misma dirección la tensión sea negativa a pesar de que la deformación sea positiva y viceversa.

La figura 8.2-2 aporta un ejemplo de un objeto cuya superficie está sometida a un estado biaxial de tensiones con sus direcciones principales conocidas.

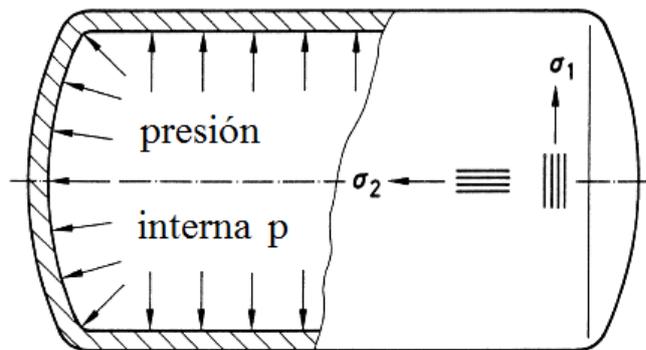


Figura 8.2-2: Un recipiente con sección transversal cilíndrica sometido a una presión interna

Sobre la superficie exterior del recipiente se produce un estado biaxial de tensiones cuya primera dirección principal σ_1 es tangencial (en dirección circunferencial) y cuya segunda dirección principal σ_2 está en la dirección del eje. Las dos tensiones principales σ_1 , σ_2 se calculan a partir de las deformaciones principales medidas ε_1 , ε_2 según las fórmulas (8.2-1) y (8.2-2).

En el apartado 8.4.4 se describe otro ejemplo, un eje con una carga de torsión.

Incluso en estos casos en los que las condiciones de carga parecen estar claras, el técnico de medición debe afrontar la situación con cierto escepticismo ya que una carga normal o de flexión adicional no aparente desde el exterior puede convertir la supuesta condición de direcciones principales conocidas en una condición de condiciones principales desconocidas. En tal caso se deben aplicar las fórmulas mencionadas en el apartado 8.2.2.

A la hora de simplificar el procedimiento de instalación, las rosetas X descritas en el apartado 3.2.2.2. y mostradas en la figura 3.2-9a resultan adecuadas para las mediciones en un campo biaxial de tensiones con direcciones principales conocidas. Los ejes de ambas rejillas de medición se deben aplicar de forma que coincidan con los ejes de las tensiones principales normales (las direcciones principales de la deformación).

8.2.2 El estado biaxial de tensiones con direcciones principales desconocidas

Para los objetos de formas complicadas, ante la superposición de distintos tipos de carga (p.ej. cargas normales, de flexión o de torsión) o para puntos heterogéneos (p.ej. variaciones de la sección transversal) resulta generalmente imposible realizar una predicción de las direcciones principales de las tensiones. Por eso no se puede realizar un análisis según los métodos descritos en el apartado 8.2.1.

En cualquier caso en el que las direcciones de las tensiones principales no estén claramente definidas, se tiene que realizar un análisis según los métodos descritos a continuación [8-1].

Las figuras 8.2-3 y 8.2-4 muestran una estructura de soporte con forma de membrana como ejemplo de un objeto de formas complicadas. Se realizó un análisis de tensiones empleando bandas extensométricas sobre el modelo mostrado en la figura 8.2-3 [8-2]. La figura 7.2-4 muestra la estructura terminada en tamaño real.

El objetivo en este caso también es la determinación de las tensiones principales σ_1 y σ_2 y sus direcciones.

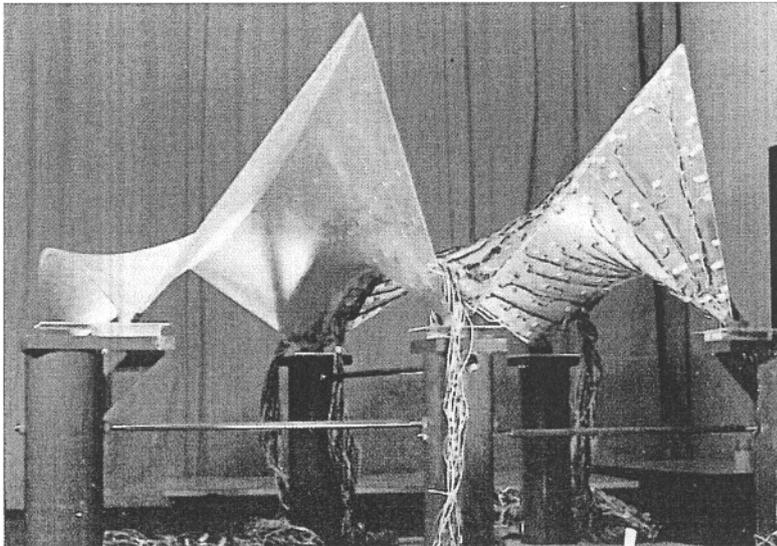


Figura 8.2-3: Ejemplo de un objeto cuyas direcciones principales de tensión se desconocen según [8-2]. Modelo de plástico de un tejado de con membrana de hormigón para su investigación a través del análisis de tensiones con bandas extensométricas.



Figura 8.2-4: Estructura terminada en tamaño real del modelo de la figura 8.2-3 (según [8-2])

En este caso es necesario, medir de la deformación en 3 direcciones distintas para cada punto de interés. Estas direcciones que no coinciden con las direcciones principales, se denotan habitualmente con las letras a, b y c y las deformaciones correspondientes con estos índices ϵ_a , ϵ_b y ϵ_c . Es importante mantener el orden de los ejes de las rejillas de medida a, b y c en sentido de rotación matemáticamente positivo, esto es en sentido contrario a las agujas del reloj con una vista en planta del objeto, porque las fórmulas (8.2-3) a (8.2-7) para el cálculo de las tensiones normales principales y sus direcciones están basadas en este sentido de rotación. Para evitar confusiones las conexiones de las rosetas de HBM tienen señaladas las letras a, b y c.

En principio estas tres deformaciones se podrían medir en cualquier dirección. No obstante, en la práctica han sobresalido dos sistemas para los cuales se realiza la evaluación según las fórmulas correspondientes. Las bandas específicas disponibles para ello, las rosetas R tienen tres rejillas de medición sobre un mismo soporte. Están descritas en el apartado 3.2.2.2.

8.2.2.1 La medición con rosetas de $0^\circ/45^\circ/90^\circ$

La figura 3.2-9b muestra algunos ejemplos de distribuciones posibles de las rejillas de medición dentro del grupo de las rosetas de $0^\circ/45^\circ/90^\circ$.

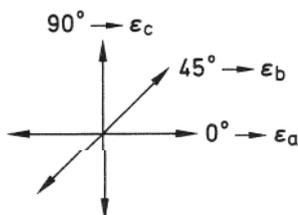


Figura 8.2-5: Asignación de las deformaciones ϵ_a , ϵ_b , ϵ_c a las direcciones angulares 0° , 45° , 90°

El cálculo de las tensiones normales principales σ_1, σ_2 se realiza según la relación

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad (8.2-3)$$

8.2.2.2 La medición con rosetas de 0°/60°/120°

La figura 3.2-9c muestra algunos ejemplos de distribución de las rejillas de medición dentro del grupo de las rosetas de 0°/60°/120°.

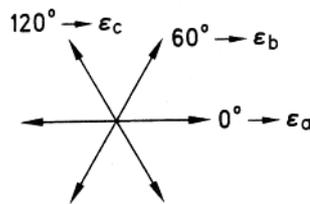


Figura 8.2-6: Asignación de las deformaciones $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$ a las direcciones angulares 0°, 60°, 120°

De acuerdo con esta distribución de las rejillas de medición, el cálculo de las tensiones normales principales σ_1, σ_2 se realiza según la ecuación

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \pm \frac{E}{1+\nu} \cdot \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2} \quad (8.2-4)$$

8.2.2.3 La determinación de las direcciones principales

Las direcciones principales son aquellas direcciones en las que ocurren las tensiones normales principales σ_1 y σ_2 calculadas con las ecuaciones (8.2-3) y (8.2-4). (Son idénticas a las direcciones principales de las deformaciones ε_1 y ε_2 .) Se pueden determinar con la ayuda de relaciones geométricas a partir de las deformaciones $\varepsilon_a, \varepsilon_b$ y ε_c medidas con la roseta R .

El objetivo de las explicaciones siguientes es proporcionar un método conveniente y fiable al ingeniero práctico. Los aspectos teóricos del círculo de tensión de Mohr, que forma la base de este método, se encuentran descritos en la literatura específica y en [8-1]; no se tratarán aquí.

En primer lugar se calcula la tangente del ángulo auxiliar ψ (psi):
para la roseta de $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ según la fórmula

$$\tan \psi = \frac{2 \varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \quad \left| \quad \frac{Z}{N} \right. \quad (8.2-5)$$

Para la roseta de $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ según la fórmula

$$\tan \psi = \frac{\sqrt{3} (\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{2 \varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c} \quad \left| \quad \frac{Z}{N} \right. \quad (8.2-6)$$

Nota:

La tangente de un ángulo en un triángulo rectángulo es la razón entre el cateto opuesto (numerador Z) y el adyacente (denominador N):

$$\tan \psi = \frac{\text{Cateto opuesto}}{\text{Cateto contiguo}} = \frac{Z}{N} \quad (8.2-7)$$

La figura 8.2-7 muestra como el ángulo ψ puede estar situado en cuatro cuadrantes distintos del círculo según los signos de los catetos.

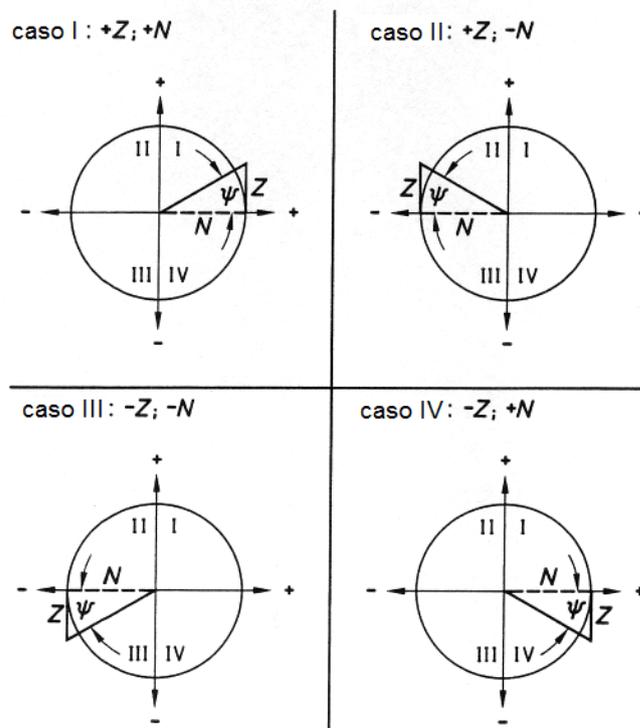


Figura 8.2-7: Esquema para encontrar los cuadrantes correspondientes al ángulo ψ

Esta ambigüedad de la tangente hace que sea necesario determinar los signos del numerador (Z) y el denominador (N) antes de calcular los cocientes (8.2-5) y (8.2-6). Son importantes porque representan la única forma de saber en que cuadrante del círculo se encuentra el ángulo ψ . La asignación inequívoca es esencial para determinar las direcciones principales 1 y 2.

En primer lugar se tiene que determinar la magnitud del ángulo a partir del valor numérico de la tangente

$$|\psi| = \arctan [^\circ] \quad (8.2-8)$$

A continuación se debe determinar el ángulo ϕ (fi) según la tabla de la figura 8.2-8

| Z | $\geq 0 (+)$ | $> 0 (+)$ | $\leq 0 (-)$ | $< 0 (-)$ |
|---------------------------|--------------------------------------|--|--|--|
| N | $> 0 (+)$ | $\leq 0 (-)$ | $< 0 (-)$ | $\geq 0 (+)$ |
| cuadrante correspondiente | I | II | III | IV |
| | | | | |
| $\phi =$ | $\frac{1}{2} \cdot (0^\circ + \psi)$ | $\frac{1}{2} \cdot (180^\circ - \psi)$ | $\frac{1}{2} \cdot (180^\circ + \psi)$ | $\frac{1}{2} \cdot (360^\circ - \psi)$ |

Figura 8.2-8: Esquema para encontrar el ángulo ϕ

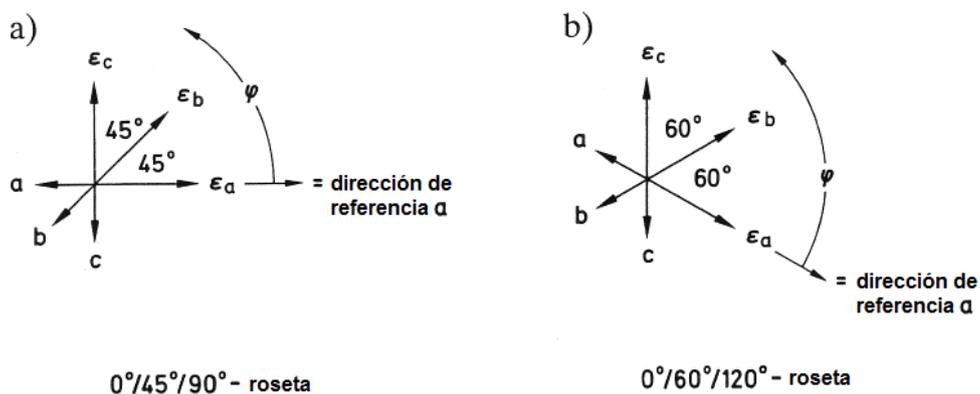


Figura 8.2-9: Esquema para encontrar la dirección principal 1

- a) para la roseta de $0^\circ/45^\circ/90^\circ$
- b) para la roseta de $0^\circ/60^\circ/120^\circ$

El ángulo φ encontrado de esta forma se debe aplicar a partir del eje de la rejilla de referencia en sentido matemáticamente positivo (en sentido contrario a las agujas del reloj), véase la Figura 8.2-9. El eje forma un lado del ángulo φ , el otro lado señala la primera dirección principal (la dirección 1 de la tensión normal principal σ_1 , idéntica con la dirección principal de la deformación ε_1). El ápice del ángulo está situado en la intersección de los ejes de las rejillas de medición.

La segunda dirección principal (σ_2, ε_2) tiene un ángulo de $\varphi + 90^\circ$.

8.2.2.4 Otras formas de determinar las tensiones normales principal y sus direcciones

A) Un método muy simple es la solución gráfica que utiliza los nomogramas especiales que ofrece HBM para los dos tipos de roseta $0/45^\circ/90^\circ$ y $0^\circ/60^\circ/120^\circ$. En el nomograma se introducen las propiedades elásticas, módulo de elasticidad (E) y coeficiente de Poisson (ν) para el acero y el aluminio. Cualquier técnico puede realizar la evaluación ya que no se requieren conocimientos de resistencia de materiales.

B) Existen también calculadoras de bolsillo programables que entrándoles los datos de Catman[®] permiten resolver las ecuaciones correspondientes de las rosetas.

C) Durante programas de ensayo extensos las señales de las rejillas individuales se pueden observar, manual o automáticamente, con dispositivos de conmutación del punto de medida, amplificadas en modo secuencial o en paralelo se introducen a través de un interfaz en el ordenador que realiza la evaluación y todos los procesados.

8.2.3 El círculo de tensión de Mohr

Las direcciones principales 1 y 2 de un estado de tensión plana, se caracterizan porque son las direcciones en las que las tensiones normales principales σ_1, σ_2 adoptan sus valores máximo y mínimo, mientras que las tensiones de cizallamiento τ son iguales a cero. En todas las otras direcciones las tensiones normales adoptan valores están entre estos valores extremos y las tensiones de cizallamiento adoptan valores finitos.

La figura 8.2-10a muestra una sección de la superficie expuesta a una tensión biaxial con las direcciones de las tensiones principales σ_1, σ_2 . Dentro de esta superficie se dibuja un elemento cuyas coordenadas x e y están giradas un ángulo φ respecto a los ejes principales. Las tensiones que se producen sobre el elemento se calculan según las relaciones siguientes.

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos 2 \varphi, \quad (8.2-9)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos 2 \varphi, \quad (8.2-10)$$

$$\tau_{xy}, \tau_{yx} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \sin 2 \varphi. \quad (8.2-11)$$

τ_{xy} y τ_{yx} siempre tienen la misma magnitud; la figura 2.8-10b muestra las reglas que determinan sus signos. Las tensiones normales principales σ_1 , σ_2 y sus direcciones se deben calcular según los métodos de los apartados 8.2.1 y 8.2.2.

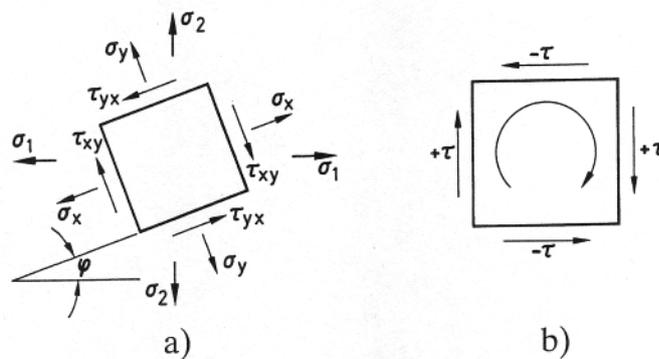


Figura 8.2-10: Estado biaxial de tensiones

- a) tensiones para un elemento de superficie cuyas coordenadas x e y están giradas un ángulo φ respecto a las direcciones principales 1 y 2
- b) regla para los signos de las tensiones de cizallamiento τ (establecidas por convenio)

El estado biaxial de tensiones se puede describir de dos maneras inequívocas:

1. indicando las tensiones normales principales σ_1 , σ_2 y sus direcciones principales,
2. indicando las tensiones normales σ_x , σ_y y las tensiones de cizallamiento τ_{xy} , τ_{yx} .

La primera solución es el resultado de los métodos descritos en los apartados 8.2.1 y 8.2.2, la segunda se obtiene a partir del círculo de tensión de Mohr. Se emplea el segundo método si las tensiones se tienen que referir a un sistema de coordenadas determinado por el componente.

El círculo de tensiones de Mohr se representa en un sistema ortogonal de coordenadas σ - τ , véase la figura 8.2-11a.

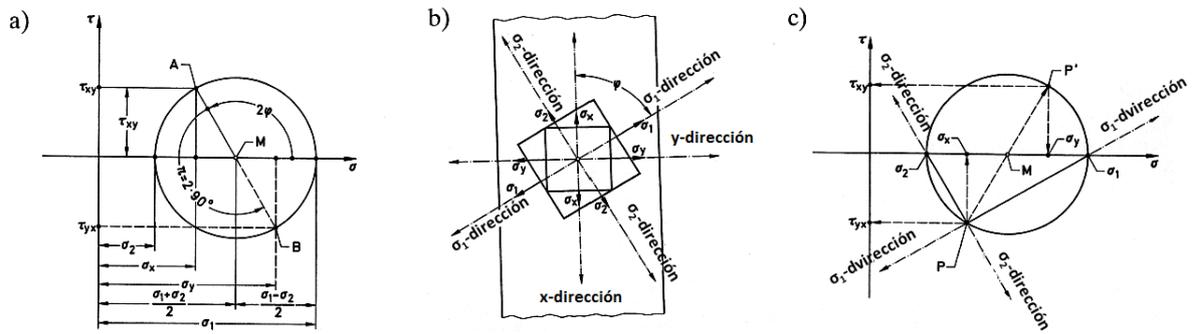


Figura 8.2-11: El círculo de tensiones de Mohr, primer ejemplo
 a) construcción b) situación de las tensiones sobre el componente c) construcción de los polos

más explicaciones en el texto

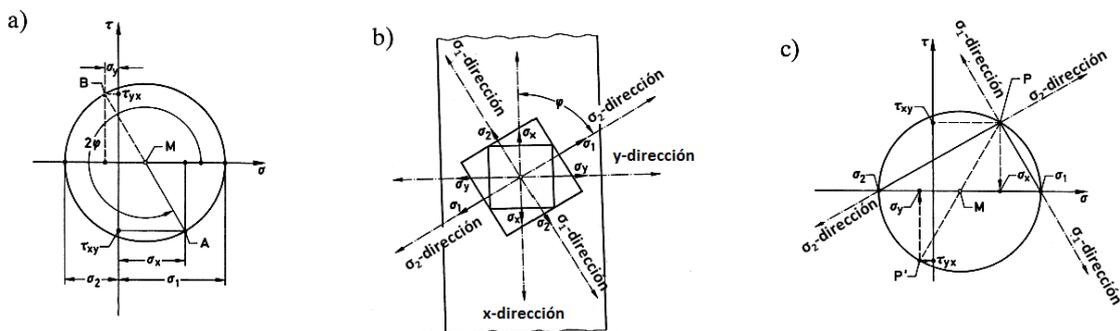


Figura 8.2-12: El círculo de tensiones de Mohr, segundo ejemplo
 (pies como en la fig. 8.2-11.)

Ambos ejes se deben escalar empleando la misma escala en N/mm^2 o N/cm^2 . A continuación las tensiones principales σ_1 , σ_2 calculadas a partir de las mediciones de las deformaciones según las ecuaciones de los apartados 8.2.1 o 8.2.2 se dibujan con el signo correspondiente sobre el eje σ . Se dibuja un círculo alrededor del punto central M. M está situado sobre el eje σ en el punto $1/2 (\sigma_1 + \sigma_2)$, su radio es $1/2 (\sigma_1 - \sigma_2)$. El círculo corta los puntos σ_1 y σ_2 .

En el círculo de Mohr todos los ángulos aparecen con su valor duplicado. Por eso el ángulo φ incluido entre la dirección principal 1 y el eje x , véase la figura 8.2-11b, se debe dibujar en sentido matemáticamente positivo contrario a las agujas del reloj con una magnitud de 2φ a partir del eje σ . Su primer lado es el eje σ , su segundo lado corta el círculo en el punto A. El segundo lado del ángulo $2\varphi + 2 \cdot 90^\circ$ (línea discontinua) corresponde a la dirección σ_y y corta al círculo en el punto B. Los puntos A y B deben proyectarse sobre el eje σ . Sus proyecciones corresponden a los valores σ_x y σ_y . Proyectados sobre el eje τ representan los valores de las tensiones de cizallamiento τ_{xy} y τ_{yx} .

En la figura 8.2-11b los elementos de superficie, dibujados uno dentro del otro, están alineados con las direcciones principales 1 y 2 y con las coordenadas del objeto x y y .

La construcción de polos en el círculo de Mohr representa un método alternativo, descrito en la figura 8.2-11c.

La construcción de polos es un método alternativo para determinar las tensiones σ_x , σ_y , τ_{xy} , τ_{yx} . La construcción de polos mostrada en la figura 8.2-11c también se basa en la situación de la figura 8.2-11b.

El círculo de Mohr se debe dibujar a partir de las tensiones principales calculadas σ_1 , σ_2 en el sistema ortogonal de coordenadas σ - τ del mismo modo que antes, véase la figura 8.2-11c. El resto del procedimiento es distinto al método descrito anteriormente.

Se considera que las direcciones de las coordenadas σ - τ coinciden con el sistema de coordenadas del componente. En el ejemplo el eje τ del diagrama es paralelo al eje x del objeto y el eje σ es paralelo al eje y del objeto. A continuación se transfiere la dirección σ_1 como línea recta sobre el círculo de manera que corte el círculo en el punto σ_1 . Del mismo modo se transfiere la dirección σ_2 de manera que corte el círculo en el punto σ_2 . La intersección de ambas rectas en el punto P debe estar sobre el círculo; es el polo del círculo de Mohr. La proyección del polo P sobre los ejes σ y τ equivale a σ_x y a τ_{xy} respectivamente. Se dibuja una recta desde el polo P a través del centro M que corta al círculo en el lado opuesto obteniendo el punto P'. A través de la proyección de P' sobre los ejes σ y τ se obtienen los puntos σ_y y τ_{yx} .

En la figura 8.2-11 σ_1 y σ_2 son positivas. En el ejemplo de la figura 8.2.-12 σ_1 es positiva y σ_2 es negativa.

8.3 Determinación de las tensiones residuales según el método del taladro

Las tensiones residuales en la superficie de un componente solo se pueden determinar mediante bandas extensométricas, si el estado de tensión existente se perturba a través de una interferencia mecánica. El método del taladro es adecuado ya que cumple la condición de mantener esta interferencia lo más pequeña posible. La roseta del taladro mostrada en el apartado 3.2.2.2, figura 3.2-14 requiere un pequeño agujero de una profundidad y diámetro de tan sólo 1,5 mm. Por lo tanto se puede decir que el procedimiento es prácticamente no destructivo.

Al hacer el agujero hay que tener en cuenta lo siguiente: puncionar el centro no está permitido ya que podría afectar el estado de tensión residual en la región de la roseta. Por eso la roseta del taladro RY 61 de la figura 8.3-1 está provista con un anillo de taladro que junto con la instrumentación auxiliar asegura que el agujero este correctamente centrado. La broca debe estar perfectamente afilada para evitar tensiones residuales adicionales que pueden afectar el resultado de la medición.

El agujero provoca una interrupción del flujo de fuerzas que actúan sobre la superficie del componente causando una relajación del material que lo rodea.

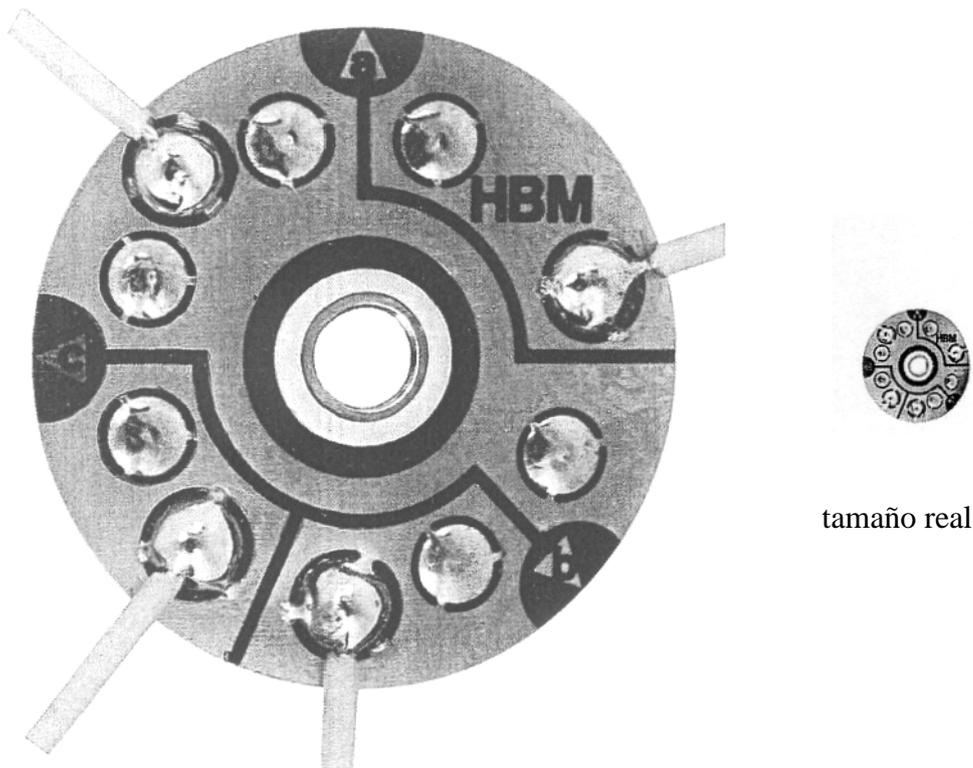


Figura 8.3-1: Roseta del taladro RY 61

La condición de tensión anterior se puede calcular a partir de la relajación medida con la banda extensométrica. Se asume que existe un estado biaxial de tensiones con direcciones principales desconocidas así que se mide la relajación en tres direcciones diferentes.

Los artículos [3-6] y [3-7] describen este método detalladamente. También contienen la derivación de las fórmulas para la evaluación de los resultados de medición. Las siguientes ecuaciones, sacadas de [3-7] y [8-3] asumen mediciones en las direcciones $0^\circ/45^\circ/90^\circ$.

Antes de la perforación se miden los valores de referencia ϵ_v en las rejillas a b y c. Tras la perforación se miden los nuevos valores ϵ_N . La diferencia es la deformación causada por la relajación $\Delta\epsilon$:

$$\Delta\epsilon = \epsilon_N - \epsilon_v \quad (8.3-1)$$

Para diferenciar los distintos valores se les añade un índice con la designación de la rejilla correspondiente, es decir $\Delta\epsilon_a$, $\Delta\epsilon_b$ y $\Delta\epsilon_c$. En las rosetas de HBM las designaciones de la rejilla se encuentran en las conexiones, véanse las figuras 8.3-1 y 8.3-2.

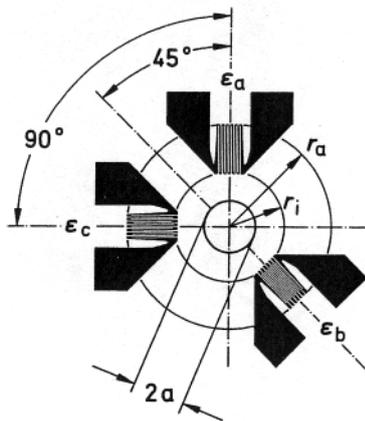


Figura 8.3-2: Dimensiones de la roseta del taladro RY 61

A partir de los tres valores medidos $\Delta\epsilon_a$, $\Delta\epsilon_b$ y $\Delta\epsilon_c$ se puede determinar inequívocamente el estado biaxial de tensiones existente en el objeto antes de la perforación. El estado de tensiones está inequívocamente determinado si se conocen las tensiones normales principales σ_1 y σ_2 así como sus direcciones.

$$\sigma_{1,2} = - \frac{E}{4A} (\Delta\epsilon_a + \Delta\epsilon_c) \pm \frac{E}{4B} \sqrt{(\Delta\epsilon_c - \Delta\epsilon_a)^2 + (\Delta\epsilon_a + \Delta\epsilon_c - 2\Delta\epsilon_b)^2} \quad (8.3-2)$$

E = módulo de elasticidad del material del objeto de medido.

A y B son constantes, que se pueden determinar de la forma siguiente:

$$A = \frac{a^2 (1 + \nu)}{2 r_a \cdot r_i}, \quad (8.3-3)$$

$$B = \frac{2 a^2}{r_a \cdot r_i} \cdot \left[1 - \frac{a^2 (1 + \nu) (r_a^2 + r_a \cdot r_i + r_i^2)}{4 r_a^2 \cdot r_i^2} \right] \quad (8.3-4)$$

ν = coeficiente de Poisson del material del objeto medido

r_a = radio exterior de la rejilla (véase la figura 8.3-2)

r_i = radio interior de la rejilla (véase la figura 8.3-2)

α = radio del agujero taladrado (véase la figura 8.3-2)

$$\tan 2\varphi = \frac{\Delta \varepsilon_a + \Delta \varepsilon_c - 2 \Delta \varepsilon_b}{\Delta \varepsilon_c - \Delta \varepsilon_a} \quad \varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arc tan} \frac{\Delta \varepsilon_a + \Delta \varepsilon_c - 2 \Delta \varepsilon_b}{\Delta \varepsilon_c - \Delta \varepsilon_a}$$

Los cálculos a continuación y los valores numéricos respectivos son válidos para la roseta del taladro RY 61:

$r_a = 3,3 \text{ mm}$,

$r_i = 1,8 \text{ mm}$,

$a = 0,75 \text{ mm}$.

Con estos valores se obtiene:

$A = 0,04735 (1 + \nu)$,

$B = 0,1894 - 0,01515 (1 + \nu)$.

La evaluación se simplifica si se escribe la ecuación (8.3-2) de la siguiente forma

$$\sigma_{1,2} = -A^* \cdot (\Delta \varepsilon_a + \Delta \varepsilon_c) \pm B \cdot \sqrt{(\Delta \varepsilon_a + \Delta \varepsilon_c - 2\Delta \varepsilon_b)^2 + (\Delta \varepsilon_c - \Delta \varepsilon_a)^2} \quad (8.3-5)$$

donde

$$A^* = \frac{E}{4A} = \frac{E}{0,1894 (1 + \nu)}; \quad (8.3-6)$$

$$B^* = \frac{E}{4B} = \frac{E}{0,7576 - 0,0606 (1 + \nu)}. \quad (8.3-7)$$

Nota:

Para el acero con $E = 206000 \text{ N/mm}^2$ y $\nu = 0,28$ se obtiene:

$$A^* = 849720 \text{ N/mm}^2$$

$$B^* = 302930 \text{ N/mm}^2$$

Para aleaciones de aluminio con $E = 70600 \text{ N/mm}^2$ y $\nu = 0,33$ se obtiene:

$$A^* = 280270 \text{ N/mm}^2$$

$$B^* = 104280 \text{ N/mm}^2$$

8.4 Mediciones extensométricas y análisis de tensiones para distintos tipos de carga

Los casos de carga elementales „normal“ (carga de tracción y compresión), de „flexión“ y de „torsión“ rara vez ocurren, si es que lo hacen, de forma pura. Normalmente se superponen en mayor o menor medida, de forma voluntaria o involuntaria. En los siguientes subapartados se analizarán las posibilidades para determinar cargas puras o compuestas. Para ello, la colocación de las bandas sobre el objeto y dentro del circuito de puente de Wheatstone juega un papel esencial.

Hay que prestar especial atención a los signos de las deformaciones medidas.

A continuación se especificarán los símbolos de fórmula empleados en el apartado 8.4 y se hará referencia a los apartados que contienen informaciones adicionales.

DMS 1 ... DMS 4 = bandas autocompensadas térmicamente (3.3.4.1) para la compensación de la expansión térmica (7.1)

E = módulo de elasticidad (2.3.1)

F = fuerza

G = módulo de cizallamiento(2.3.2)

$R_1 \dots R_4$ = Posición de las resistencias dentro del puente (5)

R_E = Resistencias complementarias para completar el puente (5.2)

WB = Circuito de puente de Wheatstone y sus variaciones (5.2)

ε_a = valor de deformación indicado

ε_b = deformación de flexión

ε_n = deformación normal (de tracción o de compresión)

ν = coeficiente de Poisson (2.3.3)
 σ = tensión del material (2.2.1)
 σ_b = tensión de flexión
 σ_l = tensión en la dirección longitudinal del objeto medido
 σ_n = tensión normal (2.2.1)
 σ_o = tensión en la parte superior del objeto medido
 σ_u = tensión en la parte inferior del objeto medido
 ω = frecuencia angular

8.4.1 Medición en una barra a tracción / compresión

En una barra a tracción se produce una deformación longitudinal positiva ϵ_l en la dirección activa de la fuerza (esto es la dirección longitudinal); en la dirección perpendicular se produce una deformación transversal negativa (contracción transversal) ϵ_q . En una barra a compresión la deformación longitudinal es negativa y la transversal es positiva.

La siguiente relación es válida para la deformación longitudinal ϵ_l :

$$\epsilon_l = \frac{F}{A \cdot E} \quad (8.4-1)$$

Con una fuerza normal pura $\epsilon_l = \epsilon_n$ y la deformación transversal ϵ_q es igual a:

$$\epsilon_q = -\nu \cdot \epsilon_l = -\nu \frac{F}{A \cdot E} \quad (8.4-2)$$

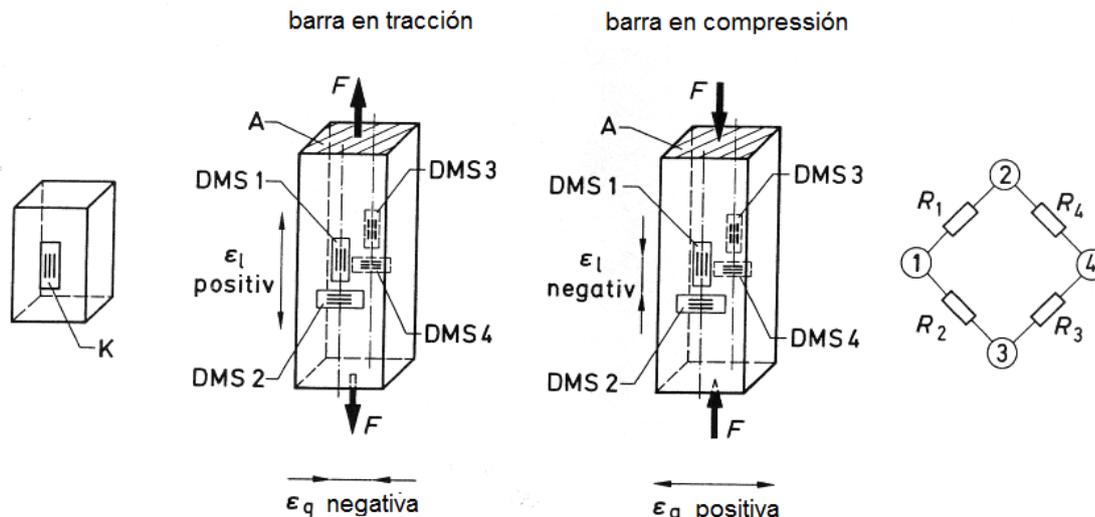
La tensión normal σ_n se obtiene a partir de las relaciones siguientes:

$$\sigma_n = \frac{F}{A} \quad (8.4-3)$$

o

$$\sigma_n = \epsilon_n \cdot E. \quad (8.4-4)$$

En la figura 8.4-1 se muestra la colocación correcta de las bandas sobre la barra a tracción/compresión y dentro del puente. Dependiendo de las circunstancias no es necesario que las cuatro ramas del puente estén ocupadas con bandas. Las características, ventajas y desventajas de los distintos tipos de circuito se muestran en la tabla 8.4.-1.



K = Banda de compensación sobre una pieza sin carga mecánica (véase el apartado 7.1-3)

Figura 8.4-1: Colocación de las bandas sobre la barra en tracción / compresión y en el puente

| rama del puente | R_1 | R_2 | R_3 | R_4 | resultado | notas |
|--|--|-------|-------|-------|---|-------|
| ecuación del puente | $\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4 = \epsilon_a$ | | | | | 1 |
| cuarto de puente simple | DMS1 | R_E | R_E | R_E | $\epsilon_a = \epsilon_1$ | 2 |
| cuarto de puente con banda de compensación | DMS1 | K | R_E | R_E | $\epsilon_a = \epsilon_1$ | 3 |
| medio puente | DMS1 | DMS2 | R_E | R_E | $\epsilon_a = \epsilon_1 + \epsilon_q = (1 + \nu) \cdot \epsilon_1$ | 4 |
| puente diagonal | DMS1 | R_E | DMS3 | R_E | $\epsilon_a = 2 \cdot \epsilon_1$ | 5 |
| puente diagonal con 2 bandas de compensación | DMS1 | K | DMS3 | K | $\epsilon_a = 2 \cdot \epsilon_1$ | 6 |
| puente completo | DMS1 | DMS2 | DMS3 | DMS4 | $\epsilon_a = 2 (\epsilon_1 + \epsilon_q) = 2 (1 + \nu) \epsilon_1$ | 7 |

Tabla 8.4-1: Los circuitos que se pueden emplear para la barra en tracción / compresión y sus resultados, véase la figura 8.4-1 para la especificación de los símbolos

Observaciones para la tabla 8.4-1:

1. Es importante fijarse en el cambio de signo en la ecuación y en los signos de las deformaciones!

En las ramas del puente R_2 y R_4 las deformaciones se reflejan en el resultado ϵ_a con los signos opuestos.

2. Las deformaciones de flexión superpuestas se reflejan en el resultado. Las deformaciones térmicas se tienen que eliminar con bandas autocompensadas térmicamente porque sino producen un error en el resultado de la medición.

$$\sigma_1 = \sigma_n + \sigma_b = \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-5)$$

3. Se obtiene una compensación de la deformación térmica con la banda de compensación aunque el coeficiente de expansión térmica del material del componente no coincida con el de la banda autocompensada o si se excede el rango de compensación de la banda. De lo contrario la situación es la misma que en 2.

4. La superposición de deformaciones de flexión se refleja en el resultado. Las deformaciones térmicas se compensan muy bien.

$$\sigma_1 = \sigma_n + \sigma_b = \frac{\varepsilon_a \cdot E}{1 + \nu}. \quad (8.4-6)$$

5. Las deformaciones de flexión superpuestas se compensan para barras con secciones transversales con simetría especular. Las deformaciones térmicas se tienen que eliminar con bandas autocompensadas térmicamente, ya que sino se producen errores en el resultado de la medición.

$$\sigma_n = \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-7)$$

6. Para la compensación de la deformación térmica véase la nota 3. Por lo demás el procedimiento es igual que para la nota 5.

7. Las deformaciones de flexión superpuestas se compensan para barras con secciones transversales con simetría especular. Las deformaciones térmicas se compensan muy bien. Los efectos de interferencia debido a las conexiones internas del puente se suprimen en gran medida. Muy adecuado para medir fuerzas normales.

$$\sigma_n = \frac{\varepsilon_a \cdot E}{2(1 + \nu)}; \quad (8.4-8)$$

$$F = \frac{\varepsilon_a \cdot E}{2(1 + \nu)} \cdot A. \quad (8.4-9)$$

Nota:

Las bandas se tienen que orientar en las direcciones de los ejes principales para evitar errores, véase también el apartado 8.1. Un error direccional del 5° (que ya es extremadamente grande) causa un error del -1% en la primera dirección principal de un campo uniaxial de tensión y un error del 3,3 % en la segunda dirección principal (transversal), ambos valores calculados para $\nu = 0,3$. Una roseta X girada 5° aportaría un error total de -1,54% en un circuito de medio puente o de puente completo.

Además de las cargas normales hay distintos tipos de interferencias que actúan sobre la barra en tracción, como la flexión, la torsión o el calor. Dependiendo del objetivo de la medición puede ser deseable eliminar las tensiones de flexión (p.ej. en mediciones de fuerza) o registrarlas (p.ej. para la determinación de los valores máximos de tensión). Las distintas variantes del puente de Wheatstone ofrecen algunas posibilidades sin embargo solamente se pueden aplicar si las secciones transversales de la barra tienen simetría especular. Para mediciones con secciones transversales asimétricas véase el apartado 8.4.3.

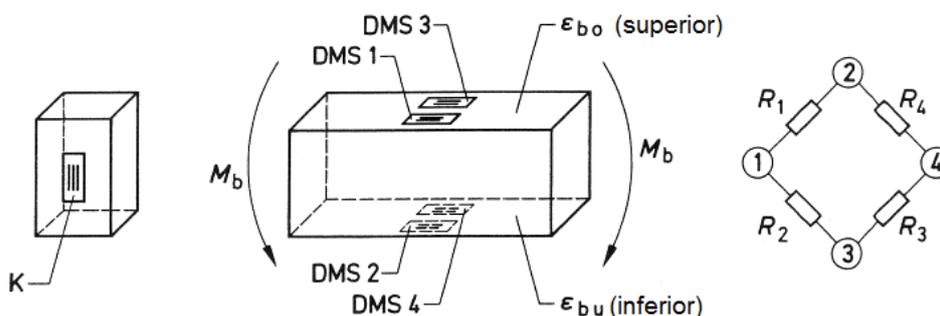
La influencia de la torsión como factor de interferencia se puede eliminar en gran parte colocando la banda de forma simétrica respecto del eje central y/o cerca del eje central. La determinación de la carga máxima que se produce a causa de la superposición solo se puede realizar con el método para la determinación del estado de tensiones biaxial con direcciones principales desconocidas, véanse los apartados 8.2.2 y 8.4.5

8.4.2 Mediciones sobre una viga en flexión

La flexión produce una deformación positiva en un lado de la viga flexionada y una deformación negativa en el lado opuesto. Si las secciones transversales tienen simetría especular, las deformaciones positiva y negativa tienen la misma magnitud. Por eso es posible utilizar las características del puente de Wheatstone para sumar las señales de deformación o para compensar las perturbaciones.

Las perturbaciones pueden ser cargas normales, de torsión o la deformación térmica.

La figura 8.4-2 muestra la colocación de la banda sobre una viga en flexión. De la misma manera que para la barra en tracción aquí tampoco es necesario que las cuatro ramas del puente estén ocupadas con bandas extensométricas. Las características de los distintos tipos de circuito están descritas en la tabla 8.4-2.



K = banda de compensación sobre una pieza sin carga mecánica, véase el apartado 7.1-3

Figura 8.4-2: Colocación de la banda sobre la viga en flexión y en el puente

Las bandas deben estar orientadas en las direcciones principales de tensión. Si las direcciones principales se desconocen (p.ej torsión superpuesta) y se tienen que determinar las tensiones principales, se procede según el apartado 8.2.2 o 8.4.5.

| rama del puente | R_1 | R_2 | R_3 | R_4 | resultado | notas |
|--|---|-------|-------|-------|--------------------------------------|-------|
| ecuación del puente | $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = \varepsilon_a$ | | | | | 1 |
| cuarto de puente simple | DMS1 | R_E | R_E | R_E | $\varepsilon_a = \varepsilon_{bo}$ | 2 |
| | DMS2 | R_E | R_E | R_E | $\varepsilon_a = \varepsilon_{bu}$ | |
| cuarto de puente con banda de compensación | DMS1 | K | R_E | R_E | $\varepsilon_a = \varepsilon_{bo}$ | 3 |
| | DMS2 | K | R_E | R_E | $\varepsilon_a = \varepsilon_{bu}$ | |
| medio puente | DMS1 | DMS2 | R_E | R_E | $\varepsilon_a = 2 \varepsilon_b$ | 4 |
| puente diagonal | DMS1 | R_E | DMS3 | R_E | $\varepsilon_a = 2 \varepsilon_{bo}$ | 5 |
| | DMS2 | R_E | DMS4 | R_E | $\varepsilon_a = 2 \varepsilon_{bu}$ | |
| puente diagonal con 2 bandas de compensación | DMS1 | K | DMS3 | K | $\varepsilon_a = 2 \varepsilon_{bo}$ | 6 |
| | DMS2 | K | DMS4 | K | $\varepsilon_a = 2 \varepsilon_{bu}$ | |
| puente completo | DMS1 | DMS2 | DMS3 | DMS4 | $\varepsilon_a = 4 \varepsilon_b$ | 7 |

Tabla 8.4-2: Los circuitos que se pueden emplear para una viga en flexión con sección transversal con simetría especular y sus resultados
Véase la figura 8.4-2 para una especificación de los símbolos.

Observaciones para la tabla 8.4-2:

1. es importante fijarse en el cambio de signo en la ecuación y en los signos de las deformaciones:

En los brazos del puente R_2 y R_4 las deformaciones se reflejan en el resultado ε_a con los signos opuestos.

2. Las deformaciones normales superpuestas se reflejan en el resultado. Las deformaciones térmicas se tienen que eliminar con bandas autocompensadas térmicamente porque sino producen un error en el resultado de la medición.

$$\sigma = \sigma_b + \sigma_n = \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-10)$$

3. Se obtiene una compensación de la deformación térmica con la banda de compensación aunque el coeficiente de expansión térmica del material del componente no coincida con el de la banda autocompensada o si se excede el rango de compensación de la banda. De lo contrario la situación es la misma que en 2.

4. La superposición de deformaciones normales se refleja en el resultado. Las deformaciones térmicas se compensan muy bien.

$$\sigma_b = \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-11)$$

El momento de flexión activo M_b se puede calcular según la ecuación:

$$M_b = \sigma_b \cdot W_b. \quad (8.4-12)$$

El valor numérico del módulo resistente (elástico) a flexión W_b que depende de la sección transversal de la viga se puede obtener en los libros con tablas. Las fórmulas para el cálculo de W_b para algunas secciones transversales frecuentes están indicadas en la tabla 8.4-3.

5. Las deformaciones normales superpuestas se reflejan en el resultado. Las deformaciones térmicas se tienen que eliminar con bandas autocompensadas, ya que sino se producen errores en el resultado de la medición.

$$\sigma = \sigma_b + \sigma_n = \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-13)$$

6. Se obtiene una compensación de la deformación térmica con la banda de compensación aunque no haya una banda autocompensada adecuada disponible o si se excede el rango de compensación de la banda. Por lo demás igual que 5.

7. Las deformaciones normales superpuestas se compensan para barras con secciones transversales simétricas. Las deformaciones térmicas se compensan en gran parte. Los efectos de interferencia debido a las conexiones internas del puente se suprimen en gran medida. Muy adecuado para medir momentos y fuerzas de flexión (si se conoce la longitud del brazo de palanca).

$$\sigma_b = \frac{1}{4} \varepsilon_a \cdot E. \quad (8.4-14)$$

El momento de flexión efectivo M_b se puede calcular con la ecuación (8.4-12).

Para el cálculo de W_b véase la nota 4 y la tabla 8.4-3

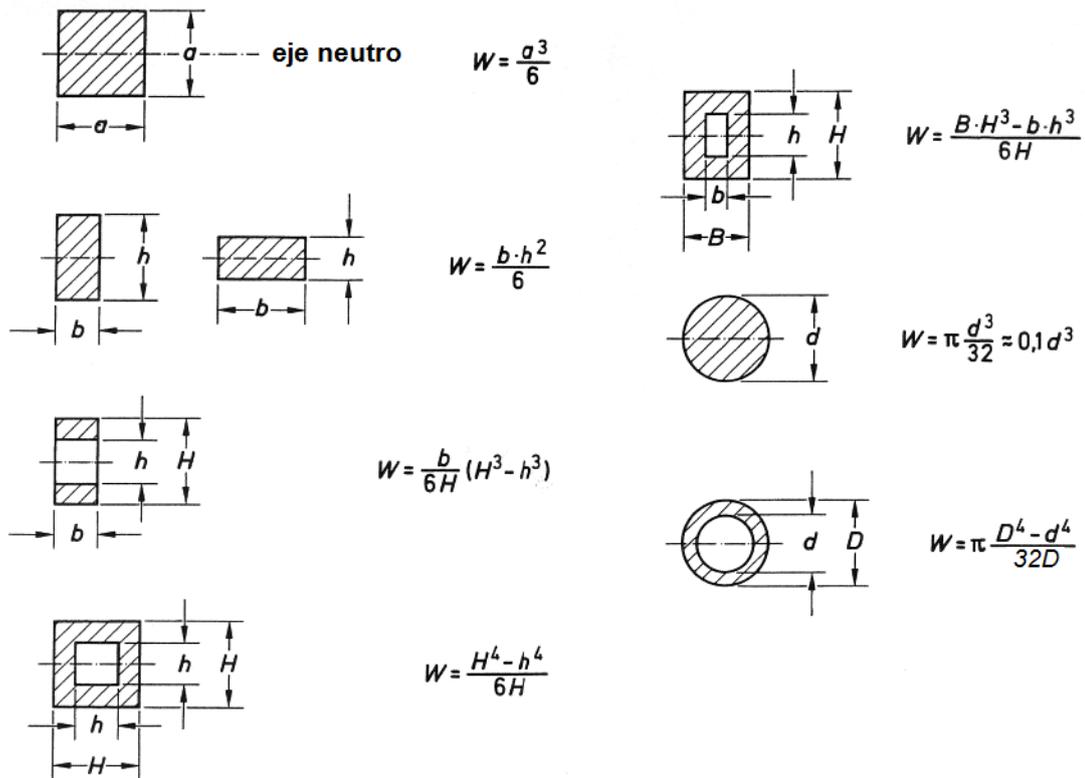


Tabla 8.4-3: módulos resistentes (elásticos) a flexión para algunas secciones transversales frecuentes

8.4.3 Mediciones sobre vigas de sección transversal simétrica y asimétrica solicitadas con una fuerza normal y un momento de flexión

En los apartados 8.4.1 y 8.4.2 ya se describe cómo se pueden determinar las deformaciones normales y las deformaciones de flexión por separado y el tipo de circuito con el que se puede registrar la suma de las deformaciones normales y de flexión para secciones transversales simétricas. Para las secciones transversales asimétricas las deformaciones de flexión en lados opuestos tienen magnitudes distintas. Por eso solamente se pueden determinar a través de mediciones separadas. En el caso de una superposición simultánea de deformaciones normales y de flexión, es imposible separar las partes correspondientes empleando ardidés en la configuración de los circuitos. Las únicas soluciones posibles se basan en el cálculo o en métodos gráficos. Ambos procedimientos se describirán a partir de dos ejemplos.

Las deformaciones de flexión en lados opuestos siempre tienen signos opuestos. No obstante puede que las deformaciones medidas tengan el mismo signo. Esto ocurre, si la tensión normal superpuesta es más grande que la tensión de flexión, véase la figura 8.4-3.

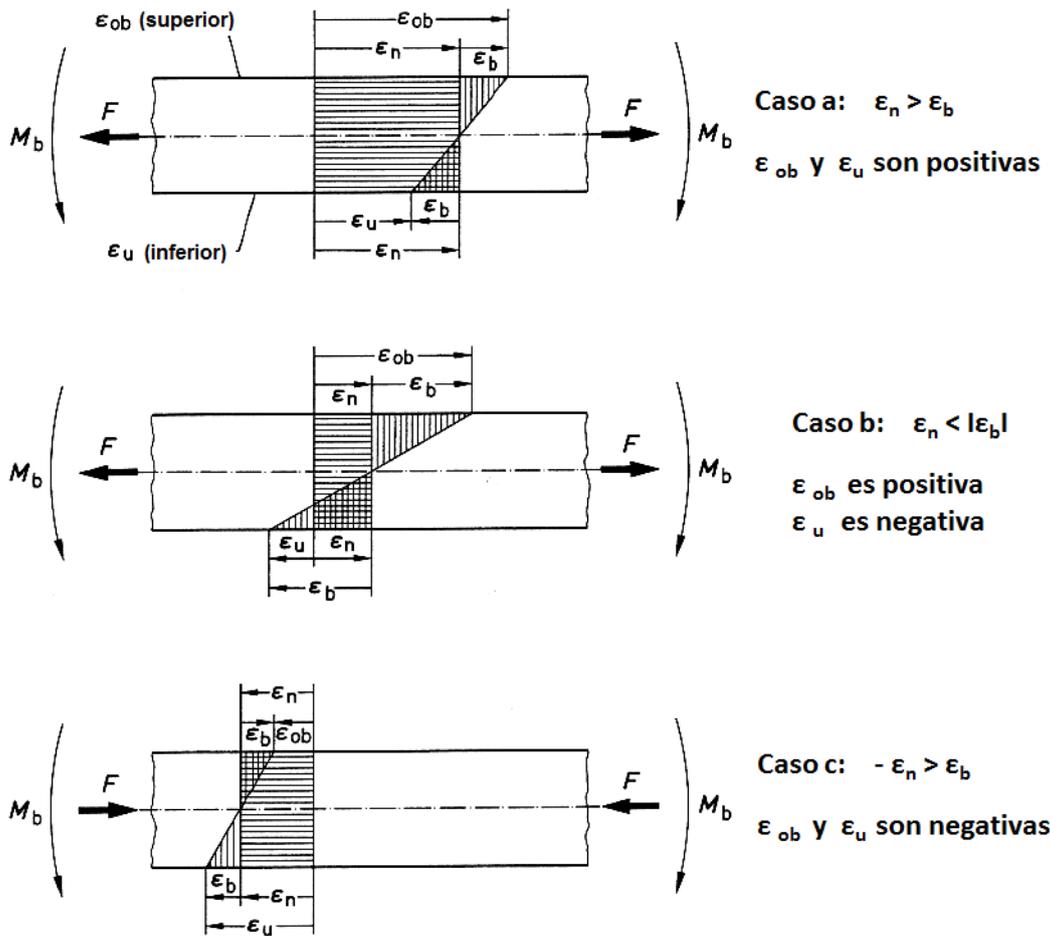


Figura 8.4-3: Ejemplo de la distribución de la deformación en un objeto con carga normal y de flexión superpuestas

Los ejemplos siguientes se basan en mediciones sobre un modelo. Las áreas de la sección transversal de ambas vigas son iguales; las formas de su sección transversal son cuadrada en el ejemplo 1 y en forma de T en el ejemplo 2. Las cargas normales y los momentos de flexión también son iguales.

Ejemplo 1:

Viga de sección transversal cuadrada. El ejemplo es válido para cualquier forma de sección transversal simétrica.

Mediciones:

Las deformaciones ϵ_o y ϵ_u se miden de forma separada.

Resultado de medición:

$$\begin{aligned} \epsilon_o &= 900 \mu\text{m/m}, \\ \epsilon_u &= -1140 \mu\text{m/m}. \end{aligned}$$

A: Solución calculada

Muestra para el ensayo de Al-Cu-Mg 1, $E = 72100 \text{ N/mm}^2$.

A partir de las deformaciones ϵ_o y ϵ_u se pueden calcular las tensiones obteniendo:

$$\begin{aligned}\sigma_o &= \epsilon_o \cdot E = 900 \cdot 10^{-6} \cdot 72100 = 64,9 \text{ N/mm}^2, \\ \sigma_u &= \epsilon_u \cdot E = -1140 \cdot 10^{-6} \cdot 72100 = -82,2 \text{ N/mm}^2.\end{aligned}$$

Las componentes de la deformación son:

$$\begin{aligned}\epsilon_n &= \frac{1}{2} (\epsilon_o + \epsilon_u) = \\ &= \frac{1}{2} (900 - 1140) = -120 \text{ } \mu\text{m/m}, \\ \epsilon_b &= \pm \frac{1}{2} (\epsilon_o - \epsilon_u) = \\ &= \pm \frac{1}{2} (900 + 1140) = \pm 1020 \text{ } \mu\text{m/m}.\end{aligned}$$

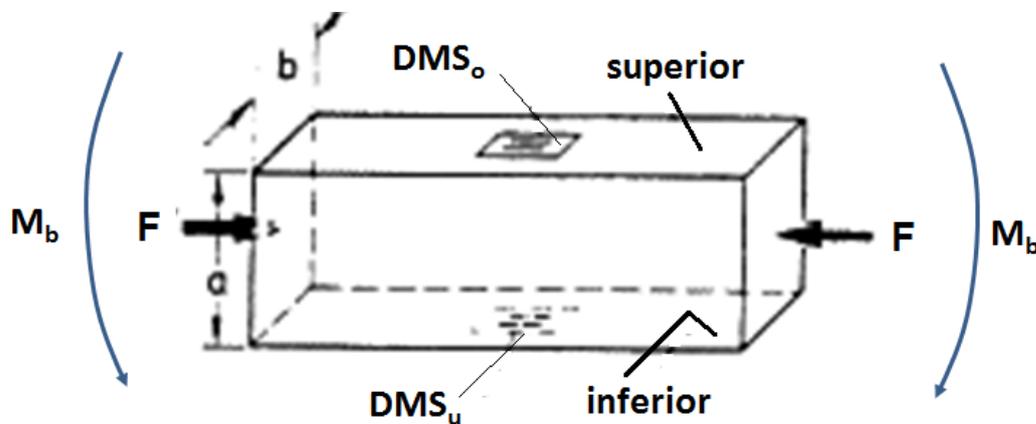


Figura 8.4-4: Croquis para el ejemplo 1

B: Solución gráfica

Se dibuja el contorno de la muestra en la región de la medición de deformación en una escala adecuada (ampliada o reducida) sobre una hoja de papel milimetrado y a su lado se dibuja una escala ϵ , véase la figura 8.4-5a.

El eje baricéntrico pasa a través de los centros de gravedad de las secciones transversales; para secciones transversales simétricas es idéntico al eje central.

Sobre la escala se anotan los valores de deformación medidos ϵ_o y ϵ_u , los cuales se proyectan sobre los bordes correspondientes del croquis de la pieza y se traza una recta que los une. El punto de intersección N entre dicha línea y la línea $\epsilon = 0$ señala la distancia d entre el eje neutro y el borde inferior de la muestra. Este valor se puede tomar del croquis, véase la figura 8.4-5a. Los campos sombreados a izquierda y derecha de la línea $\epsilon = 0$ muestran la distribución de la deformación sobre la sección transversal de la muestra para el ensayo; a la derecha las deformaciones positivas; a la izquierda las negativas, véase la figura 8.4-5b.

A continuación se marca el punto de intersección entre la recta que une $\epsilon_o - \epsilon_u$ y el eje baricéntrico y se proyecta sobre la escala ϵ . El valor señalado sobre la escala ϵ es la magnitud de la deformación normal causada por la fuerza normal, en el ejemplo es igual a $-120 \text{ } \mu\text{m/m}$, véase la figura 8.4-5c.

Las deformaciones de flexión, que tienen la misma magnitud pero signos opuestos, corresponden a las siguientes secciones:

$$\overline{\epsilon_o \epsilon_n} = \epsilon_{bo} = 900 - (-120) = 1020 \mu\text{m/m}$$

$$\overline{\epsilon_u \epsilon_n} = \epsilon_{bu} = -1140 - (-120) = -1020 \mu\text{m/m}.$$

La precisión de la solución gráfica depende de la precisión del dibujo.

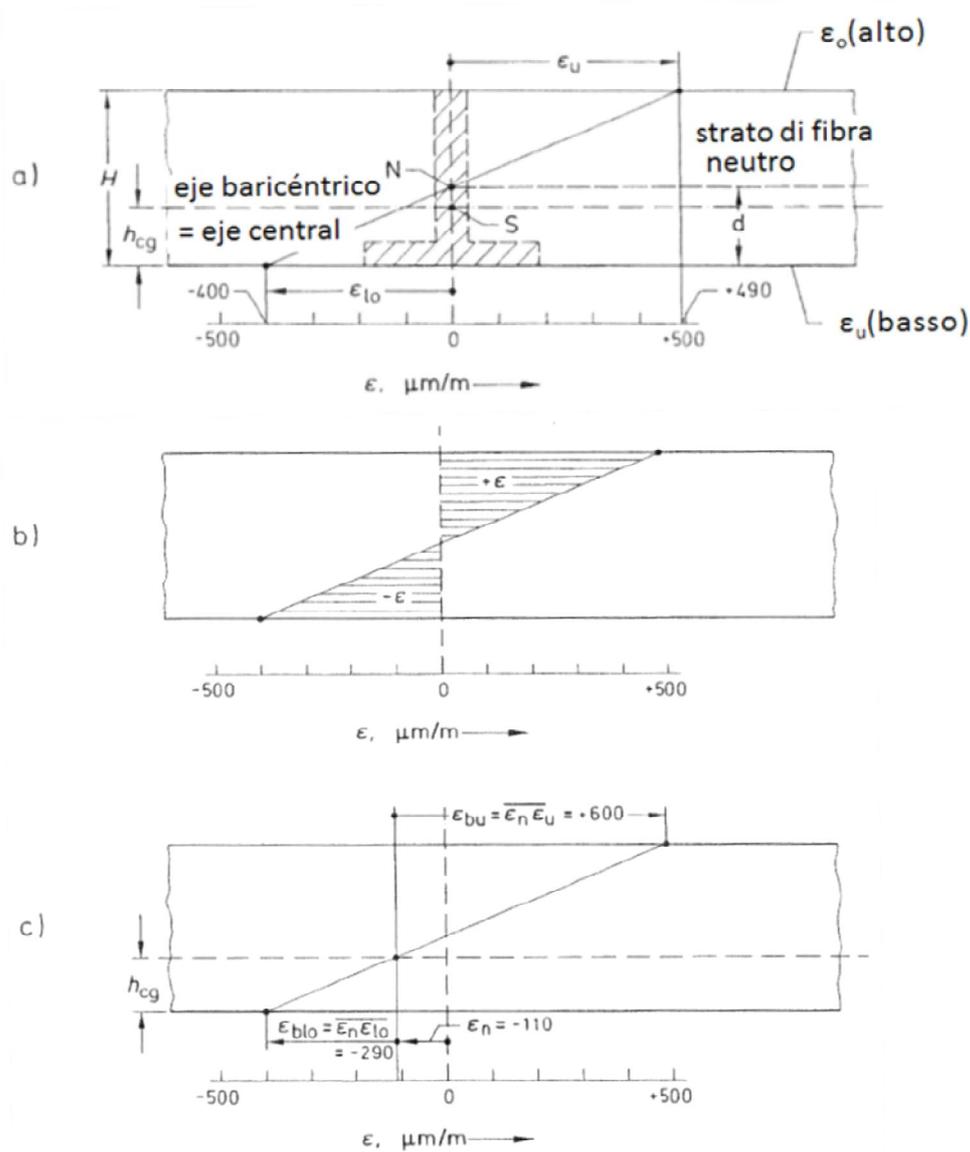


Figura 8.4-5: Solución gráfica para el ejemplo 1 (explicaciones en el texto)

Ejemplo 2:

Viga con una sección transversal en forma de T. (El principio empleado para resolver este problema se puede utilizar para a otras formas de sección transversal).

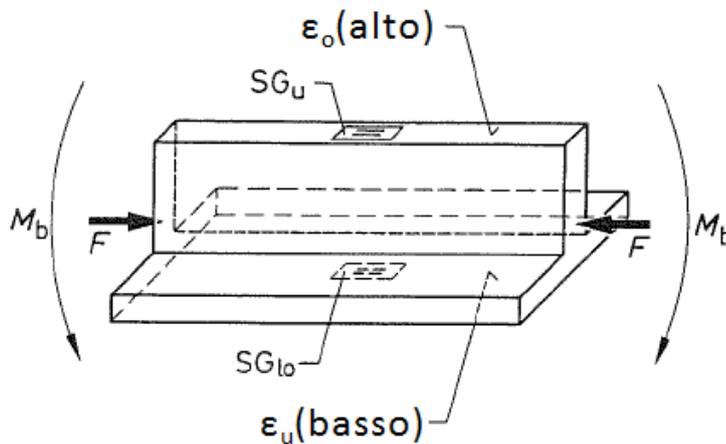


Figura 8.4-6: Croquis para el ejemplo 2

Material del objeto medido: A1-Cu-Mg 1; $E = 72100 \text{ N/mm}^2$

Mediciones:

Las deformaciones ϵ_o y ϵ_u se deben medir por separado.

Resultado de medición:

$$\epsilon_o = + 490 \text{ } \mu\text{m/m},$$

$$\epsilon_u = - 400 \text{ } \mu\text{m/m}.$$

A: Solución calculada

A partir de las deformaciones ϵ_o y ϵ_u se pueden calcular las tensiones obteniendo Para determinar los componentes de la deformación a través del cálculo se necesita la distancia e al centro de gravedad, véase la figura 8.4-7. Para perfiles típicos su valor está anotado en tablas; para otros perfiles distintos, se pueden encontrar las fórmulas para su

$$\begin{aligned} \sigma_o &= \epsilon_o \cdot E = 490 \cdot 10^{-6} \cdot 72100 = 35,3 \text{ N/mm}^2, \\ \sigma_u &= \epsilon_u \cdot E = - 400 \cdot 10^{-6} \cdot 72100 = - 28,8 \text{ N/mm}^2. \end{aligned}$$

cálculo en las publicaciones especializadas. Para el perfil del ejemplo 2 se obtiene:

$$e = \frac{1}{2} \cdot \frac{a \cdot H^2 + b \cdot c^2}{a \cdot H + b \cdot c} \quad (8.4-15)$$

Con las dimensiones del modelo según la figura 8.4-7 la distancia e es igual a

$$e = \frac{1}{2} \cdot \frac{2,5 \cdot 15^2 + 12,5 \cdot 2^2}{2,5 \cdot 15 + 12,5 \cdot 2} = 4,9 \text{ mm}.$$

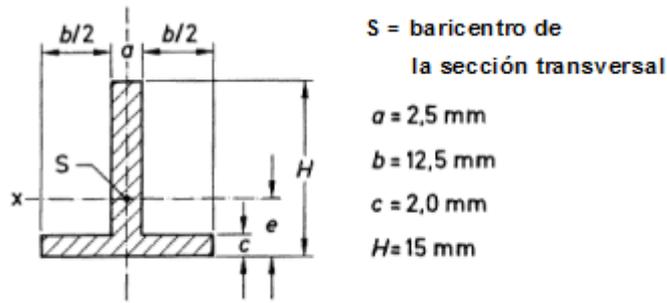


Figura 8.4-7: Croquis a escala de la sección transversal en forma de T

La tensión normal ε_n se calcula según la relación siguiente.

$$\varepsilon_n = \varepsilon_u + e \cdot \frac{\varepsilon_{ob} - \varepsilon_u}{H} \quad (8.4-16)$$

Para el ejemplo 2 se obtiene:

$$\varepsilon_n = -400 + 4,9 \cdot \frac{490 - (-400)}{15} = 4,9 \cdot \frac{890}{15} - 400 = -109 \mu\text{m/m}.$$

La fuerza normal F_n es igual a

$$\begin{aligned} F_n &= \varepsilon_n \cdot E \cdot A = \\ &= -109 \cdot 10^{-6} \cdot 72100 \text{ N/mm}^2 \cdot 64 \text{ mm}^2 = 503 \text{ N} \end{aligned} \quad (8.4-17)$$

Las deformaciones de flexión tienen magnitudes distintas para secciones transversales asimétricas:

$$\varepsilon_{blo} = \varepsilon_{lo} - \varepsilon_n = -400 - (-109) = -291 \mu\text{m/m}$$

$$\varepsilon_{bu} = \varepsilon_u - \varepsilon_n = 490 - (-109) = +599 \mu\text{m/m}$$

B: Solución gráfica

El procedimiento para resolver este problema es análogo al método para secciones transversales simétricas. En primer lugar se dibuja el contorno del objeto de ensayo sobre una hoja de papel milimetrado y a su lado una escala ε , véase la figura 8.4-8a.

En el croquis se dibuja el eje baricéntrico a una distancia e de la base del objeto; se trata de la línea que une los centros de gravedad de las superficies de las secciones transversales.

Se anotan los valores medidos de la deformación ε_o y ε_u sobre la escala ε y luego se proyectan sobre los bordes del croquis y se unen ambos puntos con una recta. El punto de intersección N entre dicha línea y la línea $\varepsilon = 0$ señala la distancia d entre el borde inferior de la ensayo de prueba y el plano neutro de flexión; su valor se puede medir en el croquis, véase la figura 8.4-8a.

Los campos sombreados a izquierda y derecha de la línea $\epsilon=0$ muestran la distribución de la deformación sobre la sección transversal de la muestra de ensayo, a la derecha las deformaciones positivas; a la izquierda las negativas, véase la figura 8.4-8b.

A continuación se marca el punto de intersección entre la recta que une $\epsilon_o \rightarrow \epsilon_u$ y el eje baricéntrico y se proyecta sobre la escala ϵ , véase la figura 8.4-8c. El valor señalado sobre la escala es la magnitud de la deformación normal ϵ_n , en el ejemplo es igual a $-110 \mu\text{m/m}$.

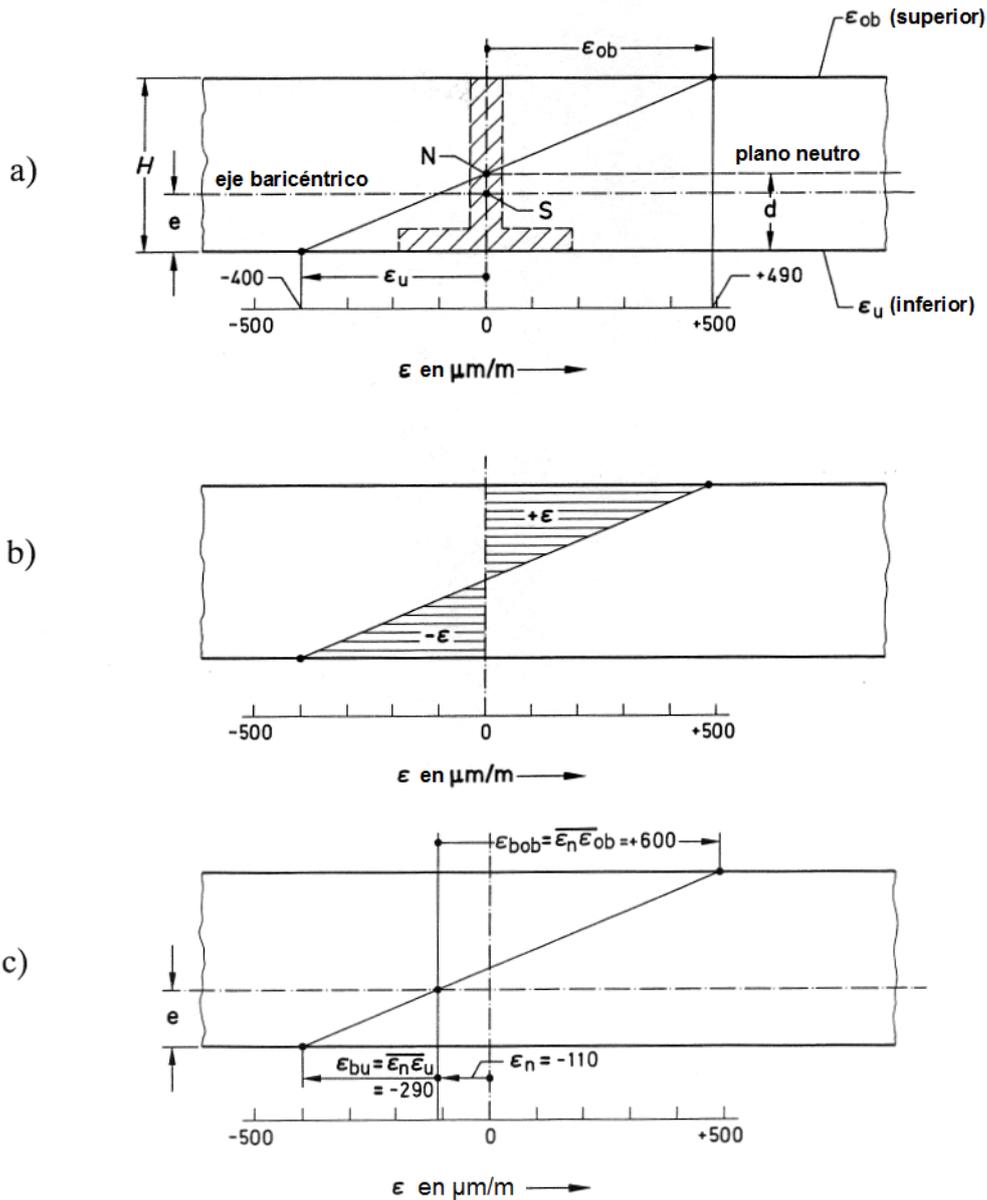


Figura 8.4-8: Solución gráfica para el ejemplo 2

Las deformaciones de flexión corresponden a las secciones

$$\begin{aligned}\overline{\varepsilon_o \varepsilon_n} &= \varepsilon_{bo} = 600 \mu\text{m/m}, \\ \overline{\varepsilon_n \varepsilon_u} &= \varepsilon_{bu} = -290 \mu\text{m/m}.\end{aligned}$$

También aquí la precisión al dibujar afecta directamente la precisión del resultado y depende de la selección de la escala.

8.4.4 La medición sobre un eje a torsión

Una medición sobre un eje a torsión puede tener varios objetivos:

1. La determinación de las tensiones normales y de cizallamiento para análisis de resistencia.
2. La determinación del momento de torsión efectivo M_t a partir del cual se puede calcular la potencia P transmitida para un eje en rotación.
3. La determinación del ángulo de deformación de cizallamiento γ o el ángulo de giro ϕ .

Para 1.

Un eje bajo una carga de torsión está expuesto a un estado biaxial de tensiones. Las tensiones normales principales se encuentran en un ángulo de $\pm 45^\circ$ respecto a los planos cilíndricos (las líneas que transcurren paralelas al eje longitudinal de la barra). Las deformaciones causadas por las tensiones normales se pueden medir con bandas extensométricas. Para ello las rosetas X, mostradas en la figura 3.2-9a son especialmente adecuadas, especialmente la forma de V con las rejillas de medición en un ángulo de $\pm 45^\circ$ respecto al eje de simetría. Los ejes de las rejillas deben coincidir con las direcciones principales de las tensiones, véase la figura 8.4-9.

Nota:

Sólo se obtiene un resultado correcto si se realiza una medición correcta. Los ejes de las rejillas tienen que coincidir con las direcciones principales de las tensiones. Una desviación de ángulo α resulta en un error f de medida igual a

$$f = (\cos 2\alpha - 1) \cdot 100\%. \quad (8.4-18)$$

Si se aplica una banda con un error direccional de $\alpha = 5^\circ$, el valor medido será un 1.6% demasiado pequeño. Si las bandas restantes en un circuito de medio puente o de puente completo se orientan correctamente el error se reduce a -0.8% en el caso de un circuito de medio puente y a -0.4% para un circuito de puente completo. Sin embargo hay que tener en cuenta que una colocación asimétrica de las bandas puede provocar errores adicionales más graves debido a la compensación deficiente en el caso de que ocurran tensiones normales y de flexión.

Las configuraciones adecuadas son los circuitos de medio puente y de puente completo. Para la transmisión de los valores medidos de ejes en rotación a través de anillos rozantes se tiene que emplear el circuito de puente completo ya que sino se pueden producir errores de medida importantes debidos a las resistencias de contacto variables. En el circuito de puente completo las resistencias variables que están situadas en las conexiones de alimentación 2 y 3 están conectadas en serie con la resistencia del puente y las resistencias de las conexiones 1 y 4 están conectadas en serie con la impedancia de entrada del amplificador. En ambos casos su influencia se reduce y resulta insignificante suponiendo que los anillos rozantes y las escobillas son de buena calidad (véase la sección 8.4.4.1).

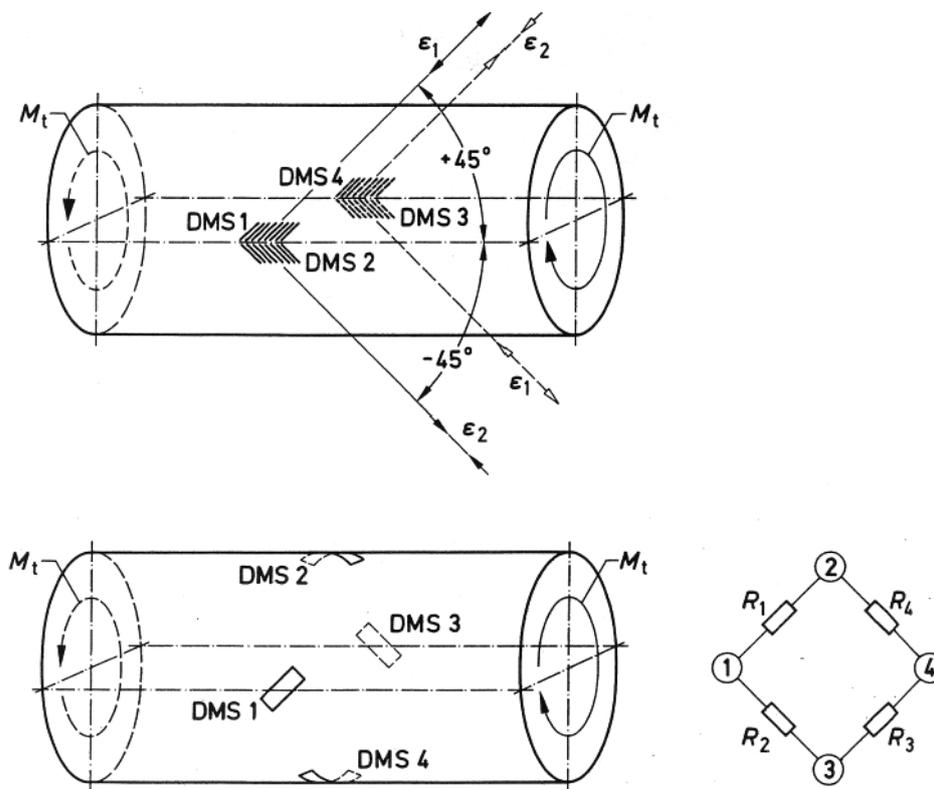


Figura 8.4-9: Eje a torsión con bandas aplicadas en las direcciones principales de las deformaciones ϵ_1 y ϵ_2 y sus posiciones dentro del puente
a) empleando rosetas X específicas
b) empleando bandas extensométricas individuales

El circuito de puente completo también es el que mejor para compensar las señales de interferencia de las cargas normales y de flexión superpuestas, si las bandas extensométricas se aplican tal y como muestran las figuras 8.4-9a y b.

Las tensiones normales principales σ_1, σ_2 se pueden calcular a partir de las deformaciones principales medidas ϵ_1, ϵ_2 según las fórmulas (8.2-1) y (8.2-2) para el estado biaxial de tensiones con direcciones principales conocidas; a continuación se repiten dichas ecuaciones:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_1 + \nu \cdot \varepsilon_2), \quad (8.2-1)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_2 + \nu \cdot \varepsilon_1). \quad (8.2-2)$$

Para el eje a torsión es válido lo siguiente:

$$|\varepsilon_1| = |\varepsilon_2|, \quad (8.4-19)$$

$$\varepsilon_2 = -\varepsilon_1. \quad (8.4-20)$$

Si se conectan las bandas como medio puente en las ramas del puente 1 y 2, se produce una inversión del signo de ε_2 , véanse el apartado 5 y las ecuaciones (5.2-5) y (5.2-7). El valor de deformación indicado ε_a es:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_1 - (-\varepsilon_2) = |\varepsilon_1| + |\varepsilon_2| = 2 \varepsilon. \quad (8.4-21)$$

Se obtiene un resultado correspondiente para el circuito de puente completo.

Por lo tanto se produce una inversión del signo de la expresión entre paréntesis respecto a las ecuaciones (8.2-1) y (8.2-2) en la ecuación siguiente:

Para el circuito de medio puente se obtiene:

$$\sigma_{1,2} = \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot (1 - \nu) \cdot \varepsilon_a. \quad (8.4-22)$$

Para el circuito de puente completo se obtiene:

$$\sigma_{1,2} = \pm \frac{1}{4} \cdot \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot (1 - \nu) \cdot \varepsilon_a. \quad (8.4-23)$$

La tensión de cizallamiento τ aumenta desde $\tau = 0$ en el centro hasta llegar a su valor máximo τ_{\max} en el perímetro.

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= 2 \varepsilon_{45^\circ} \cdot G & (8.4-24) \\ &= \varepsilon_a \cdot G \quad \text{para medio puente} \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot G \quad \text{para puente completo.} \end{aligned}$$

ε_a = el valor indicado en los circuitos de medio puente y de puente completo

G = módulo cortante (véanse los apartado 2.3.2, ecuación. 2.3-2).

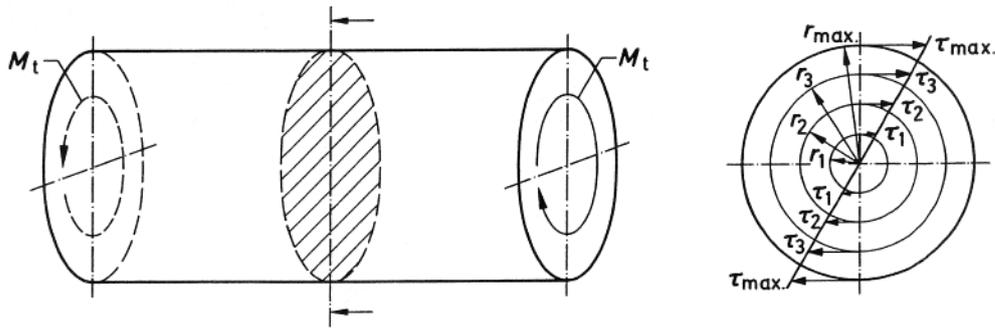


Figura 8.4-10: Distribución de la tensión de torsión a través de la sección transversal de un eje a torsión

Para 2.

El momento de torsión M_t se calcula a partir de las tensiones máximas de cizallamiento τ_{\max} calculadas según la ecuación (8.4-24) y el módulo resistente (elástico) a torsión (polar) W_p del eje con la ecuación siguiente:

$$M_t = \tau_{\max} \cdot W_p = 2 \varepsilon_{45^\circ} \cdot G \cdot W_p. \quad (8.4-25)$$

Para el circuito de medio puente se obtiene:

$$M_t = \varepsilon_a \cdot G \cdot W_p. \quad (8.4-26)$$

Para el circuito de puente completo:

$$M_t = \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot G \cdot W_p. \quad (8.4-27)$$

Con τ y G en N/m^2 y W_p en m^3 , la unidad de M_t es Nm.

El módulo resistente polar W_p depende de la forma de la sección transversal del eje en torsión. Las fórmulas para calcularlo se encuentran en los libros de tablas.

Para un eje cilíndrico es válida la ecuación siguiente:

$$W_p = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \approx 0,2 d^3. \quad (8.4-28)$$

La potencia P transmitida por el eje en rotación se calcula con:

$$P = \omega \cdot M_t = \frac{2 \pi \cdot n}{60} \cdot M_t = 0,105 \cdot n \cdot M_t = \frac{n \cdot M_t}{9,55}. \quad (8.4-29)$$

Con M_t en Nm y la velocidad n en 1/min la unidad de P es igual a $Nm/s = W$.

Para la transferencia de la señal medido un eje en rotación véase el apartado 8.4.4.1.

Para 3.

La figura 8.4-11 muestra el ángulo de deformación por cizallamiento γ y el ángulo de torsión φ del eje a torsión.

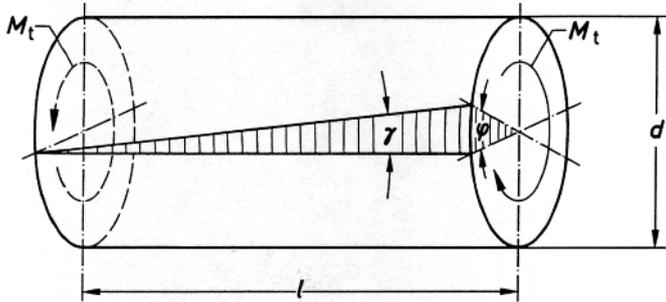


Figura 8.4-11: El ángulo de deformación por cizallamiento γ y el ángulo de torsión φ

El ángulo de deformación por cizallamiento γ se calcula con

$$\gamma = \frac{\tau_{\max}}{G} \quad (8.4-30)$$

Y el ángulo de torsión φ con:

$$\varphi = 2 \cdot \frac{l}{d} \cdot \gamma = 4 \varepsilon_{45^\circ} \cdot \frac{l}{d}; \quad (8.4-31)$$

Para el medio puente

$$\varphi = 2 \varepsilon_a \cdot \frac{l}{d}, \quad (8.4-32)$$

Para el puente completo

$$\varphi = \varepsilon_a \cdot \frac{l}{d}. \quad (8.4-33)$$

8.4.4.1 La transmisión de la señal medida en un eje en rotación

Hay varios métodos para transmitir la señal medida en un eje en rotación.

Para una velocidad de rotación baja con pocas revoluciones del objeto medido un cable capaz de enrollarse y desenrollarse puede ser la solución más simple.

Esta solución se puede emplear para todos los tipos de circuito (también para el circuito de cuarto de puente pero teniendo en cuenta las restricciones mencionadas en los apartados 7.1.1 y 7.2.1).

Una segunda posibilidad es la transmisión de la tensión de alimentación del puente y de la señal medida a través de grupos de anillos rozantes. Solamente resultan adecuadas las versiones de alta calidad ya que se requiere que la resistencia de contacto entre el anillo rozante y el escobilla sea extremadamente pequeña, que su desgaste sea mínimo incluso a altas velocidades y que las tensiones térmicas sean muy pequeñas.

HBM suministra este tipo de instrumentación en forma de conjuntos de anillos rozantes para instalar en ejes con rotación de distintos tamaños con dos grupos de escobillas para su montaje por separado. El conjunto contiene 5 anillos rozantes, 4 de los cuales sirven para conectar las bandas. El quinto proporciona una conexión a tierra con el eje de rotación para prevenir interferencias. También se suministran conjuntos de anillos rozantes para su montaje en el extremo libre de un eje con 6 o 12 anillos, véase la figura 8.4-12. Las hojas de datos contienen informaciones sobre la velocidad de rotación permitida y otros datos técnicos.

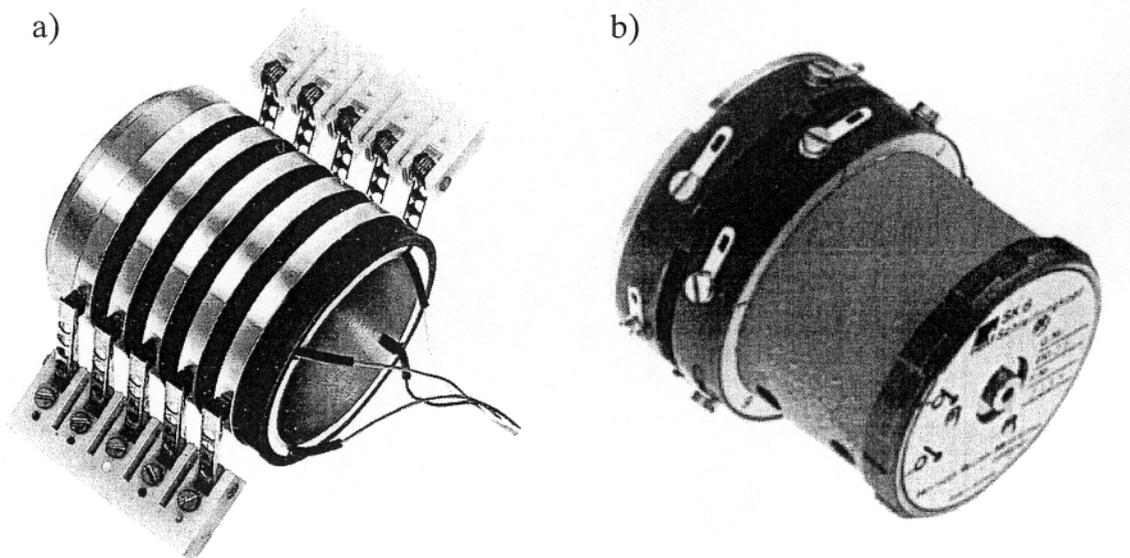


Figura 8.4-12: Conjunto de anillos rozantes

- a) conjunto de anillos rozantes SK5 con 2 grupos de escobillas SK5/ZB
- b) conjunto de anillos rozantes SK6

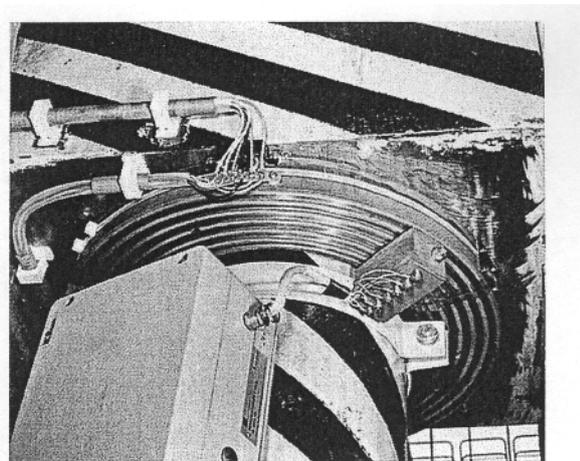
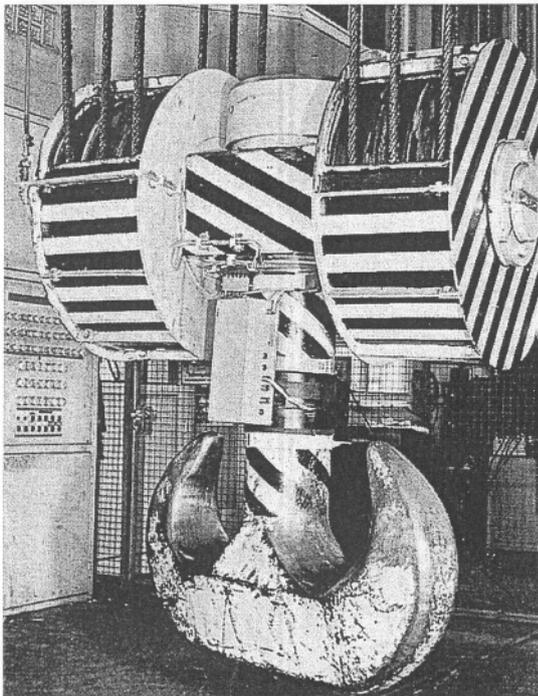
La aparición de ciertas variaciones de la resistencia de contacto (ruido de contacto) es inevitable aunque se empleen los mejores materiales de contacto para los transmisores de anillos rozantes. HBM indica una resistencia de contacto entre el anillo y la escobilla de $40 \text{ m}\Omega$ con variaciones de $< 2 \text{ m}\Omega$. Mientras que la resistencia de contacto es relativamente insignificante, las variaciones de su valor se reproducen en la señal medida. Considerando que la variación de la resistencia de una banda de 120Ω a causa de

una deformación de $1000 \mu\text{m/m}$ es de aproximadamente $240 \text{ m}\Omega$, la variación de la señal medida es de aproximadamente un $1,7 \% = 17 \mu\text{m/m}$ si se transmite a través de dos anillos rozantes utilizando un circuito de cuarto de puente. La parte constante de la resistencia de contacto de $2 \times 40 \text{ m}\Omega$ produce una reducción aparente de la sensibilidad de la banda de tan sólo un $0,06\%$.

Estas relaciones son bastante más favorables si se emplea un circuito de medio puente. En este caso las resistencias de contacto están conectadas en serie con la resistencia de medio puente. De esta forma, para una banda de 120Ω la reducción aparente de la sensibilidad de la banda es solamente del $0,03\%$ debido a la caída de la tensión de alimentación en los puntos de contacto. Para bandas de mayor resistencia el valor es aun menor. La resistencia de contacto del tercer anillo rozante y de la trayectoria de la señal no tiene influencia sobre la medición.

Debido a las ventajas respecto a la compensación de los efectos de interferencia, es aconsejable emplear el circuito de puente completo siempre que sea posible. En [8-7, 8-8] se describen varios ejemplos del uso de la transmisión a través de anillos rozantes para mediciones con bandas extensométricas.

En los componentes considerablemente sobredimensionados solo se producen pequeñas deformaciones. Por eso hay riesgo de que las señales medidas sean enmascaradas en mayor o menor medida por ruido eléctrico u otras señales de interferencia.



▲
b)
◀ a)

Figura 8.4-13:

Ejemplo de montaje de un amplificador sobre una pieza móvil y la transmisión de la señal amplificada a través de anillos rozantes (imágenes tomadas de [8-9]).

- a) **Vista de conjunto de un gancho de grúa de 120 toneladas provisto de bandas extensométricas y un amplificador de medición industrial.**
- b) **Primer plano de los anillos rozantes y las escobillas para la transmisión de la tensión de alimentación, la señal medida amplificada y una señal de control.**

En este caso se debe considerar el montaje del amplificador o de un preamplificador sobre la pieza en rotación y la transferencia de la señal amplificada a través de los anillos rozantes, véase la figura 8.4-13.

La transmisión sin contacto de señales medidas aporta ventajas significativas ya que no hay desgaste y es altamente inmune contra los efectos de interferencia. Dependiendo del diseño del sistema la alimentación del circuito de bandas extensométricas se puede realizar a través de baterías o a través de la transferencia inductiva, sin contacto de energía eléctrica.

El desacoplamiento de la señal medida modulada en frecuencia se puede realizar capacitiva o inductivamente, dependiendo de la aplicación. La transformación de los pulsos de frecuencia a una tensión continua proporcional al valor medido se realiza en unidades periféricas. La figura 8.4-14 muestra ejemplos de dos tipos de transmisores sin contacto para mediciones.

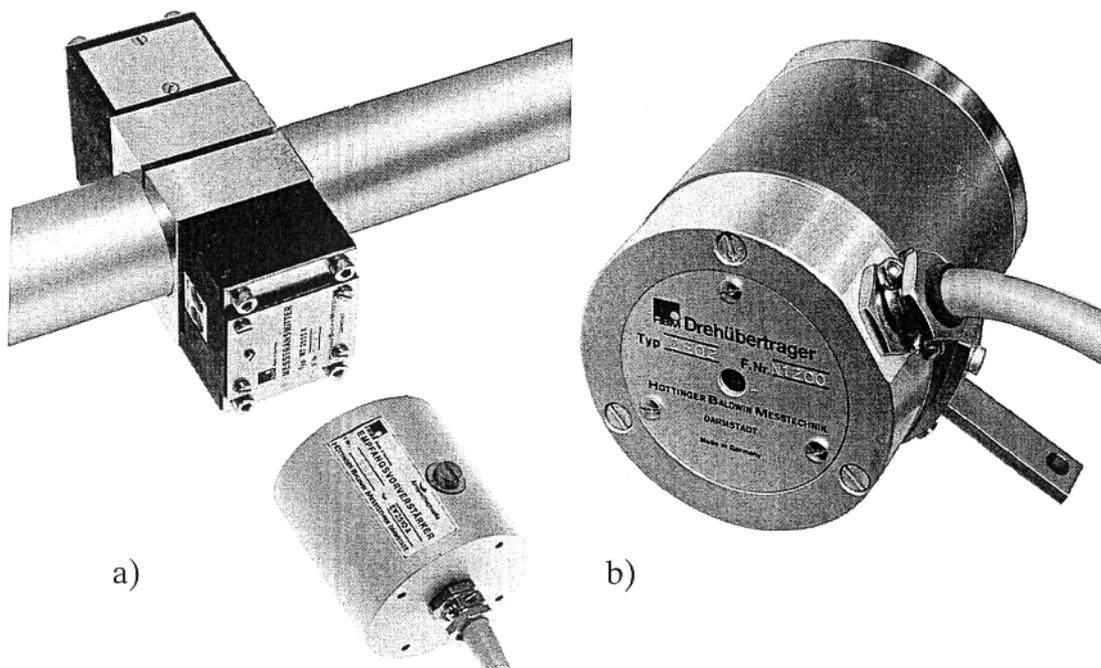


Figura 8.4-14: Transmisores sin contacto de medidas.

- a) Sistema para el montaje sobre una barra con contenedor para la batería y transmisor de medidas con pre-amplificador receptor periférico
- b) Transmisor rotativo para el montaje en el extremo de una barra

La evolución de una medición de par a una medición de potencia sólo añade algo de complejidad por la determinación de la velocidad de rotación. Aparte del tacogenerador, que suministra una tensión proporcional al número de revoluciones, se pueden emplear sistemas sin contacto ópticos o magnéticos para la medición de la velocidad de rotación. La figura 8.4-15 muestra ejemplos de estos dos últimos métodos.

Multiplicando la tensión proporcional al par y la tensión proporcional a la velocidad de rotación en un amplificador de multiplicación se obtiene una señal proporcional a la potencia.

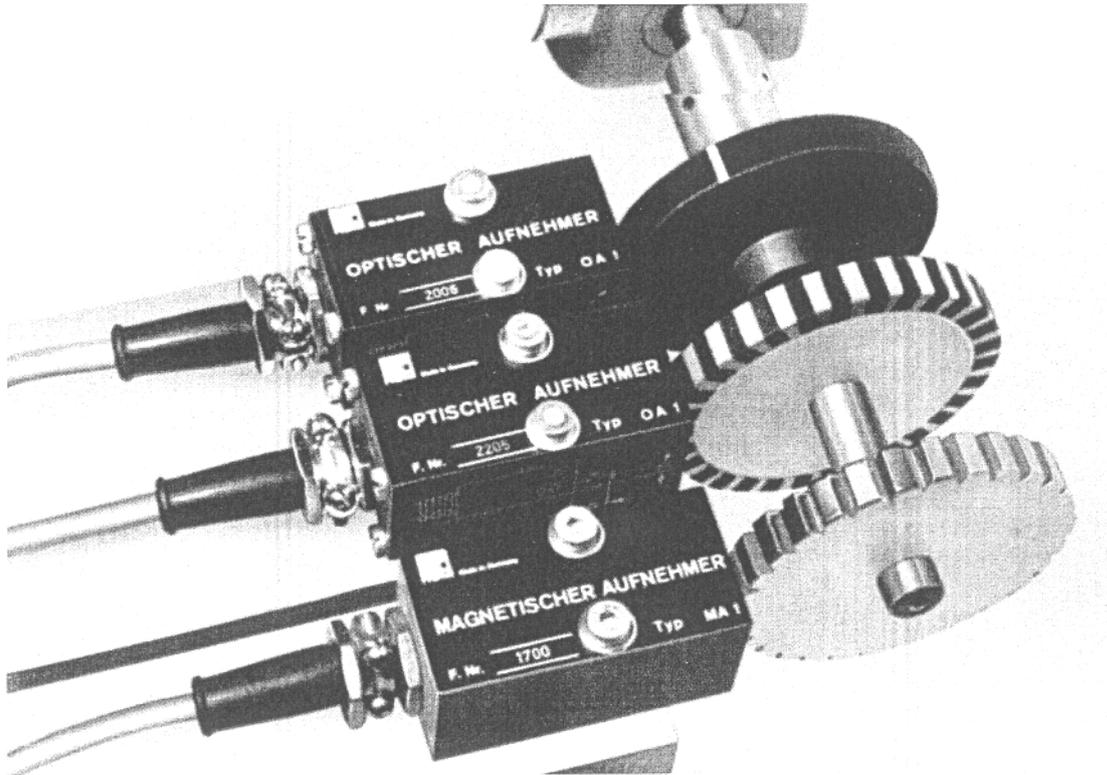


Figura 8.4-15: Sistemas de transductores para la adquisición sin contacto de la velocidad de piezas en rotación

8.4.5 La medición sobre un eje a torsión con la superposición de una fuerza normal y un momento de flexión

Hay dos objetivos distintos:

1. La determinación de las componentes de carga por separado.
2. La determinación de la tensión máxima en el material.

Ambas son posibles, pero requieren distintas aplicaciones de bandas extensométricas.

Para 1.

Se debe medir cada componente de carga por separado. En el caso de que sea necesario medir las componentes simultáneamente porque sus interrelaciones dinámicas son importantes, se necesita un canal para cada una.

Las señales medidas se pueden registrar sincrónicamente p.ej. con un registrador multicanal.

Torsión con una carga normal superpuesta.

La medición por separado de cada componente de carga requiere:

Bandas extensométricas aplicadas según el apartado 8.4.4, figura 8.4-9, para la medición de la torsión.

Bandas extensométricas aplicadas según el apartado 8.4.1, figura 8.4-1. para la medición de la carga normal.

Los problemas de este tipo ocurren por ejemplo en los ejes de la hélice de un barco. La experiencia muestra que las deformaciones son más bien pequeñas y que por ese motivo se debería emplear siempre el circuito de puente completo ya que asegura una mejor supresión de las interferencias.

Torsión con una carga de flexión superpuesta.

En este caso también se pueden medir de manera similar ambos componentes por separado. La medición de la torsión requiere de nuevo una aplicación de la banda según el apartado 8.4.4, figura 8.4-9.

El componente de flexión se puede medir con un montaje de las bandas según el apartado 8.4.2, figura 8.4-2 pero es necesario conocer la dirección del momento de flexión y del plano de flexión. Si se desconoce la dirección del plano de flexión se puede determinar mediante mediciones de investigación con bandas separadas colocadas axialmente cada 90° grados sobre una circunferencia o mediante un procedimiento auxiliar, como la técnica de laca frágil [8-4], el procedimiento resinas birrefringentes (fotoelasticidad) u otros recubrimientos especiales de cerámica. Estos últimos requieren una temperatura de secado en horno de 550 °C.

Para 2.

Las tensiones resultantes en un objeto sobre el que actúa una carga con diferentes componentes únicamente se puede determinar mediante el procedimiento para el análisis del estado biaxial de tensiones con direcciones principales desconocidas según el apartado 8.2.2.

Para una torsión con una carga normal superpuesta el lugar de la medición es indiferente porque ambas cargas actúan uniformemente sobre la sección transversal. Este no es el caso para una torsión con una flexión superpuesta. La carga de flexión pasa de un mínimo negativo a un máximo positivo mientras cruza la sección transversal. Los puntos de carga máxima se encuentran si se conoce la dirección del plano de flexión. Es necesario realizar mediciones en varios lugares cada 90° sobre la circunferencia o bien emplear uno de los métodos auxiliares mencionados anteriormente.

8.4.6 Mediciones sobre una barra de cizallamiento

De forma similar a la barra de torsión, donde pueden ocurrir tensiones de cizallamiento a la vez que un momento de par, en una barra de cizallamiento las tensiones de cizallamiento pueden ocurrir en relación con un momento de flexión. Este fenómeno se está ilustrado en el ejemplo de la figura 8.4-16.

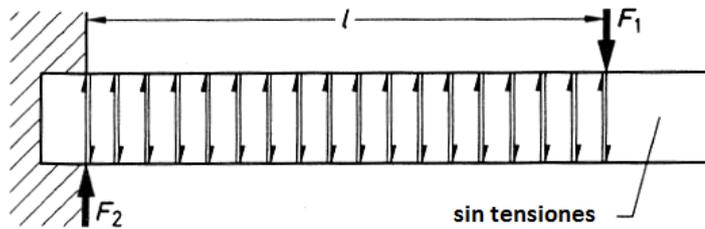


Figura 8.4-16: La formación de tensiones de cizallamiento en una viga voladiza

Se aplica una fuerza F_1 sobre la viga, que está fijada de un lado, a la distancia l del punto de fijación. La fuerza de reacción F_2 , de la misma magnitud actúa en sentido contrario. Se produce una pareja de fuerzas tal y como muestra la figura 2.2-2. El hecho de que los puntos de aplicación de las fuerzas estén separados por una gran distancia no tiene importancia para las tensiones de cizallamiento que se producen. En cada sección transversal entre ambos puntos de aplicación surgen tensiones de cizallamiento. Las tensiones normales σ_1 , σ_2 que surgen junto a las tensiones de cizallamiento τ transcurren en un ángulo de 45° respecto al plano de cizallamiento igual que para la barra de torsión, véase la figura 8.4-17a. Al mismo tiempo la fuerza F multiplicada por la distancia l provoca un momento de flexión. Por lo tanto las tensiones de flexión se superponen a las tensiones normales. Por eso el valor angular de $\pm 45^\circ$ solamente es exacto en el nivel neutral donde las fuerzas de flexión son iguales a cero. El sistema de coordenadas se gira hacia los bordes, de forma que las tensiones limítrofes (puras tensiones de flexión) transcurren paralelas a los bordes, véase la figura 8.4-17b. Por eso es importante colocar la banda lo más cerca posible del plano neutral.

Las tensiones de cizallamiento τ y los ángulos de cizallamiento γ no se pueden medir con bandas extensométricas, pero se pueden calcular a partir de las tensiones medidas en un ángulo de 45° . La siguiente relación es válida:

$$\varepsilon_{45^\circ} = \frac{\tau}{2G} = \frac{1}{2} \gamma. \quad (8.4-34)$$

Y con esto se obtiene:

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \gamma \cdot G = 2 \varepsilon_{45^\circ} \cdot G & (8.4-35) \\ &= \varepsilon_a \cdot G \quad \text{para medio puente,} \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon_a \cdot G \quad \text{para puente completo.} \end{aligned}$$

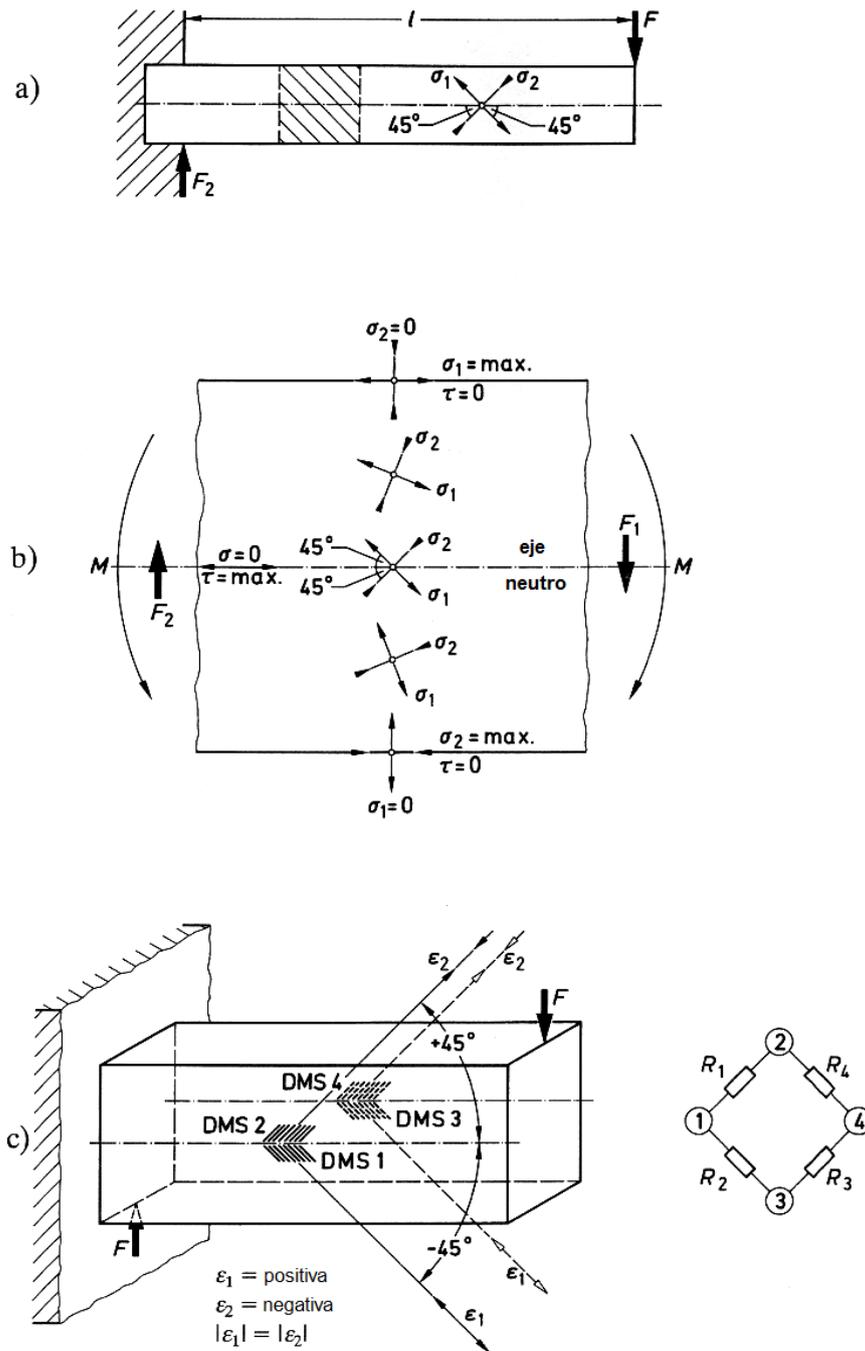


Figura 8.4-17: Estados de las tensiones y deformaciones en la viga con de cizallamiento

- Direcciones de las tensiones normales principales σ_1, σ_2 a nivel del plano neutro
- Direcciones de las tensiones normales principales σ_1, σ_2 y de las tensiones de cizallamiento τ a los distintos niveles de la sección transversal para una superposición de cargas de cizallamiento y de flexión.
- Colocación de las bandas para la medición de los valores máximos de deformación ϵ_{45° y su colocación en el puente

$$\gamma = 2 \varepsilon_{45^\circ}. \quad (8.4-36)$$

La distribución de las tensiones de cizallamiento a lo largo de la sección transversal no es lineal. Para una sección transversal rectangular la distribución es aproximadamente tal y como muestra la figura 8.4-18 .

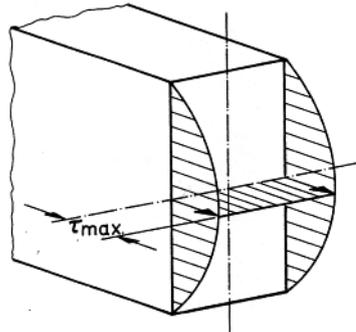


Figura 8.4-18: Distribución de la tensión de cizallamiento para una sección transversal rectangular

Las deformaciones/tensiones de flexión superpuestas se pueden determinar según el método descrito en el apartado 8.4.2. Para ello es necesario colocar bandas adicionales de la manera descrita en dicho apartado.

A partir de la deformación ε_{45° medida se puede determinar la fuerza F . Se aplica la relación siguiente:

$$F = \frac{2 \varepsilon_{45^\circ} \cdot G \cdot A}{c_A}, \quad (8.4-37)$$

que se deriva de:

$$\tau_{\max} = \frac{F}{A} \cdot c_A = \gamma \cdot G = 2 \varepsilon_{45^\circ} \cdot G. \quad (8.4-38)$$

El factor de forma c_A depende de la forma de la sección transversal de la viga. Para secciones transversales rectangulares con $b/h \leq 1/2$, $c_A = 3/2$; para una sección transversal circular $c_A = 4/3$ y para una sección transversal en anular $c_A = 2$. Para otras secciones transversales c_A se puede calcular según las fórmulas dadas en la literatura específica.

Si se quiere emplear la viga con de cizallamiento exclusivamente para medir la fuerza, se recomienda un perfil con un módulo resistente a flexión máximo para una superficie de sección transversal mínima, por ej. en forma de I. Comparado con una forma rectangular sus ventajas son:

- Las deformaciones ε_{45° aumentan.
- Las deformaciones de flexión se reducen.
- La distribución de las tensiones de cizallamiento en la región de la banda es más uniforme.
- La señal medida es independiente del punto de aplicación de la fuerza (al contrario que la viga en flexión).

La figura 8.4-19 muestra un ejemplo. En la variante b) se traslada el punto de aplicación de la fuerza más allá del punto de medición mediante un brazo acodado.

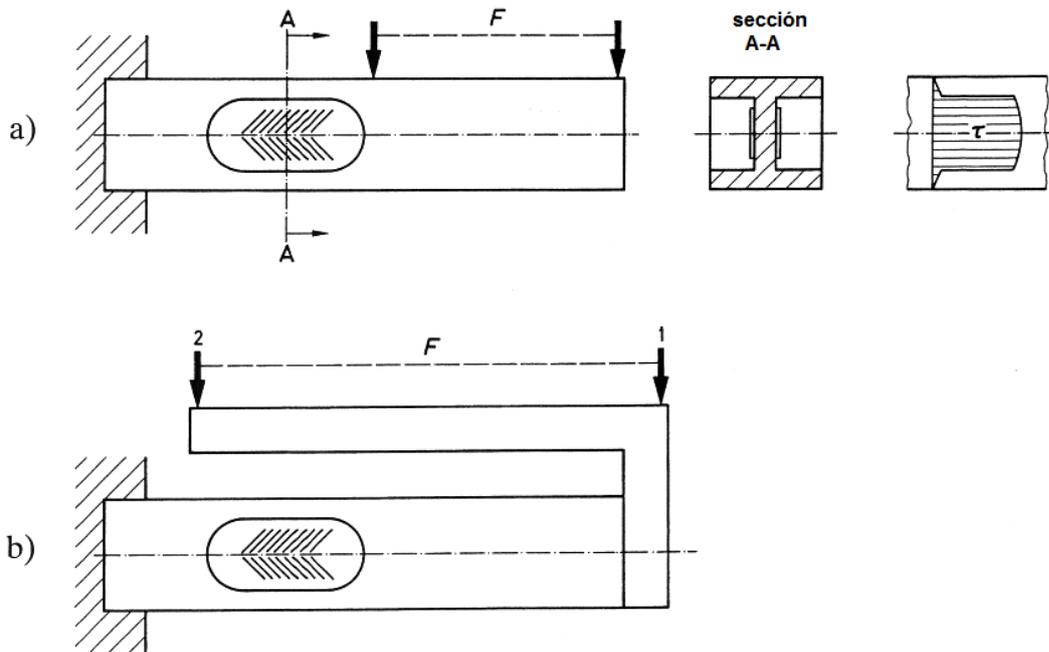


Figura 8.4-19: Sección en forma de I para la medición de la fuerza y de la distribución de las tensiones de cizallamiento en la viga

La colocación de las bandas se realiza según la figura 8.4-17c en circuito de puente completo. La correspondencia entre la señal medida ε_a y la fuerza F se realiza mediante la calibración con una fuerza de magnitud conocida

8.4.7 La medición de las tensiones térmicas

Las tensiones térmicas ocurren en componentes cuando se impide la expansión o contracción causada por los cambios de temperatura. Las tensiones térmicas son tensiones normales. Un ejemplo típico de un objeto en el que ocurren tensiones térmicas a gran escala son los carriles soldados (sin juntas) de las vías férreas. El ejemplo siguiente explica como se producen las tensiones térmicas.

Se calienta un tubo de acero de una longitud $l = 2\text{m}$ de 15°C a 35°C , con lo cual $\Delta\theta = 20\text{K}$. El coeficiente de expansión lineal del acero es $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ m}/(\text{m} \cdot \text{K})$. La variación de longitud Δl se obtiene:

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta\theta = 2\text{m} \cdot 12 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}/\text{m}}{\text{K}} \cdot 20\text{K} = 480 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 480 \mu\text{m}.$$

Referido una longitud de 1m da a una deformación de

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{480 \mu\text{m}}{2 \text{ m}} = 240 \mu\text{m}/\text{m}.$$

Para compensar esta deformación se requiere una fuerza que devuelva al tubo a su longitud original. De esta forma se produce una tensión longitudinal (en este caso negativa) en tubo. Se produce la misma tensión si se sujeta el tubo mediante fuerzas externas para que mantenga su longitud original. La tensión longitudinal σ es igual a

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = -240 \mu\text{m}/\text{m} \cdot 206 \text{ N}/\text{mm}^2 \approx -50 \text{ N}/\text{mm}^2.$$

La fuerza de compresión resultante F depende de la sección transversal A del tubo. En un tubo con un diámetro externo de 50mm y un grosor de 3mm la sección transversal se puede calcular a partir del diámetro medio D multiplicado por el grosor s

$$A = (D - s) \cdot \pi \cdot s = (50 - 3) \cdot \pi \cdot 3 = 443 \text{ mm}^2.$$

$$F = \sigma \cdot A = -50 \text{ N}/\text{mm}^2 \cdot 443 \text{ mm}^2 = -22150 \text{ N}.$$

El ejemplo muestra como una pequeña variación relativa de la temperatura puede producir tensiones y fuerzas importantes.

La colocación de las bandas sobre el objeto a medir depende del objetivo de la medición. Los apartados 8.4.1 hasta 8.4.3 contienen informaciones al respecto para objetos en forma de barra; el apartado 8.2.2 para objetos planos. Las bandas autocompensadas térmicamente resultan más adecuadas. En muchos casos una medición simultánea de la temperatura aporta informaciones adicionales [8-5, 8-6].

El problema ahora es: como se pueden medir las deformaciones restringidas con bandas extensométricas?

Los apartados siguientes describen varios métodos cuya efectividad depende de las condiciones que afectan al punto de medición.

Los problemas específicos que surgen durante la determinación de las tensiones térmicas con bandas extensométricas en modelos de resina epoxi están descritos en [8-10].

8.4.7.1 La comparación entre las mediciones sobre objetos libres y objetos restringidos

Sólo se puede realizar la comparación si se puede liberar el objeto bajo investigación de la carga antes o después de la medición con la carga y si se puede realizar una medición de referencia en el mismo rango de temperatura. De este modo se pueden encontrar y eliminar errores causados por la respuesta a la temperatura. Este método se explicará a partir de un experimento modelo.

Un tubo de aluminio cuya expansión térmica no está impedida tiene dos bandas extensométricas montadas en lados opuestos y además un sensor de temperatura resistivo de tipo Pt 100 para la medición de temperatura. Las bandas están conectadas en un puente de $\frac{2}{4}$ o puente diagonal para duplicar el valor medido ϵ_1 y para la compensación de una posible flexión. Con el circuito en puente de $\frac{2}{4}$ es $\epsilon_1 = \frac{1}{2} \epsilon_a$.

El tubo se calienta desde temperatura ambiente hasta alcanzar los 45°C. El valor medido resultante $\epsilon = \frac{1}{2} \epsilon_a = -100 \mu\text{m/m}$ se produce debido a la mal ajuste de la banda al coeficiente de expansión térmica del tubo de aluminio (respuesta a la temperatura), véase la figura 8.4-20a.

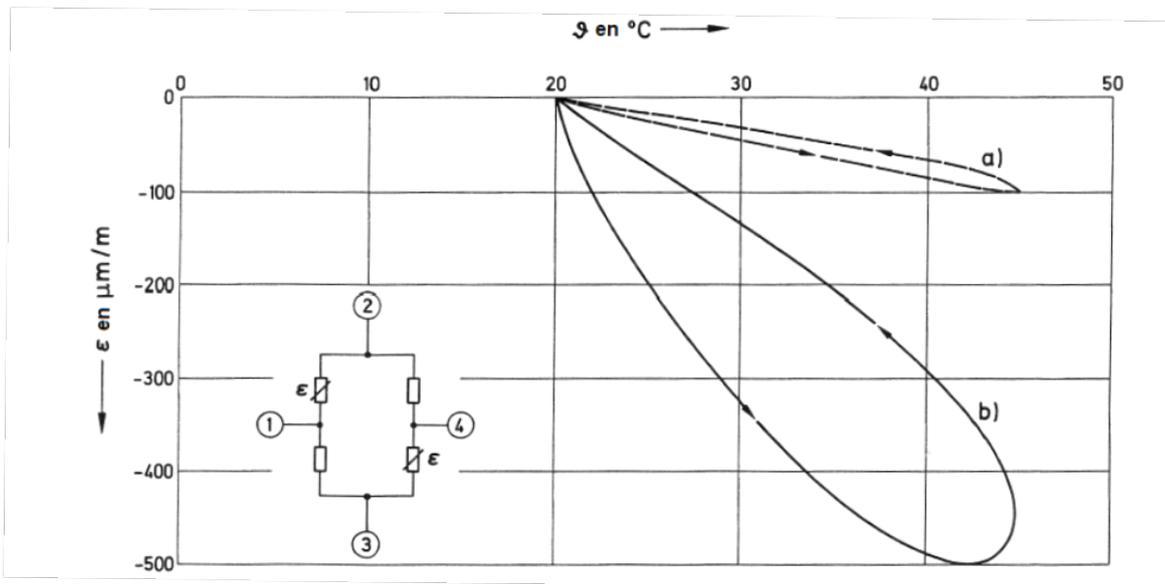


Figura 8.4-20: El resultado de un experimento modelo para la determinación de las tensiones térmicas

a) Señal del tubo en expansión libre (medición de referencia)

b) Señal del tubo restringido (medición con carga)

Para el circuito en puente de $\frac{2}{4}$ se aplica la relación $\epsilon = \frac{1}{2} \epsilon_a$.

Después de su enfriamiento, el tubo se fija en ambos extremos con unas mordazas, que impiden su expansión térmica. Durante el recalentamiento del tubo se mide un valor de $\epsilon = \frac{1}{2} \epsilon_a = -500 \mu\text{m/m}$ (medición con carga) aunque la longitud del tubo se mantiene constante, véase la figura 8.4-20b.

La diferencia de $-400 \mu\text{m/m}$ corresponde a la expansión térmica restringida. (El gran ciclo de histeresis lo causa el enfriamiento no uniforme del tubo bajo tensión. Debido a la gran masa de las mordazas, los extremos del tubo se enfrían mucho más rápido que la parte central, donde se mide la temperatura. Mientras que la temperatura se indica sólo para dicho punto, la deformación indicada representa la integral de la deformación a lo largo de todo el tubo).

Sin la medición de referencia se produciría un error del 20%.

8.4.7.2 La medición con una pieza de compensación

El método más simple para la compensación de errores debidos a la respuesta a la temperatura consiste en emplear una pieza separada del material del componente como pieza de compensación. En una medición sobre vías de ferrocarril puede ser un trozo de carril suelto, libre de tensión. Este tipo de compensación de la respuesta a la temperatura está descrito en el apartado 7.1. La ventaja es que se obtiene el resultado correcto con una sola medición ya que no se necesita una medición de referencia.

8.4.7.3 Determinación de la respuesta a la temperatura por separado o a posteriori

Cuando no es posible realizar la medición de referencia sobre el objeto real, se puede realizar sobre una pieza separada del mismo material. Pero en tal caso se requiere la relación entre la medición de la deformación y la temperatura, es decir que la temperatura se tiene que medir en la pieza de comparación y en el objeto a medir cerca de la banda extensométrica.

Si el objeto lo permite se puede separar la banda y todo el material debajo de ella del objeto a medir tras la medición con carga de modo similar al método mostrado en la figura 3.2-10. La banda no se debe dañar durante el proceso. La medición de referencia (medición de la respuesta a la temperatura) se puede realizar posteriormente según el método explicado en el párrafo anterior.

Dependiendo de si se esperan tensiones térmicas uniaxiales o biaxiales se deben emplear bandas lineales o rosetas R. La evaluación de la medición se realiza de acuerdo con los apartados 8.1 y 8.2.2.

9 La precisión de medida

Las bandas extensométricas se suministran como un producto acabado pero no representan un instrumento de medición acabado. Esta aparente contradicción es el resultado del hecho de que la banda solamente es capaz de medir tras la correcta instalación por parte del usuario. En este sentido las indicaciones del fabricante respecto a la precisión de la banda están ligadas a las condiciones correspondientes. Por este motivo, y para que el usuario también obtenga buenos resultados de medida en todos los apartados relevantes se hace referencia a las fuentes de error posibles y se describen detalladamente las medidas para su compensación y corrección.

Se sabe del ámbito de los transductores que las bandas extensométricas son capaces de realizar medidas extraordinariamente precisas. Las células de carga para el uso en equipos sujetos a un calibrado oficial encabezan la lista con un error permisible de menos de 0,02 %. La constante de tiempo para la sensibilidad nominal es mejor que $1 \cdot 10^{-4}$ /año. Esta precisión extrema sólo se puede alcanzar y mantener con transductores para los cuales el punto de medición está herméticamente encapsulado. Los nuevos diseños de transductores de fuerza para la comparación internacional de equipos estándar de medición de fuerza han supuesto una mejora importante de la precisión [9-1].

Bajo las condiciones relevantes para el análisis experimental de tensiones y para los ámbitos de aplicación similares la precisión que se puede alcanzar se reduce rápidamente a valores de porcentaje convencionales. No obstante hay que tener en cuenta que los distintos elementos de la cadena de medida, incluido el objeto a medir contribuyen al error de medida.

En este contexto sólo hay que pensar en las asimetrías eléctricas del puente, en las asimetrías mecánicas del objeto a medir (p.ej. debido a las tolerancias de fabricación o la distorsión de la sección transversal causada por cargas mecánicas o a la anisotropía de las características elásticas), en los errores de orientación de la banda etc.

Por eso cada medición debe ir acompañada de una cuidadosa consideración de los errores involucrados: antes de la medición, para encontrar y, si es posible, corregir fuentes de error significativas; después de la medición para obtener una estimación concreta del orden de magnitud del error remanente.

La nueva filosofía sustituye el término “error de medida” por „incertidumbre de medida“. En [9-2] se trata el tema de esta sección detalladamente.

9.1 Las causas de los errores de medida

Todo resultado de una medición estará afectado por errores si hay imperfecciones en

- el objeto a medir
- el equipo de medición (incluyendo los dispositivos de indicación)
- el método de medición
- debido a influencias ambientales
- debido a influencias personales del observador.
- debido a variaciones temporales de todas las fuentes de error mencionadas anteriormente.

Todo valor de medición se desvía en cierta medida del valor real de la variable medida debido a estas influencias. El resultado de medición en si es insuficiente si no se indica el grado de error que contiene. Se tienen que indicar los límites entre los cuales está el valor real de la variable medida.

Se diferencia entre:

- a) errores graves,
- b) desviaciones aleatorias,
- c) desviaciones sistemáticas.

Para a):

Los errores graves ocurren p.ej. debido a

- la elección de un método de medición o evaluación inadecuado
- la aplicación incorrecta de los transductores (p.ej. montaje incorrecto)
- errores en el circuito
- el manejo incorrecto del equipo de medición
- equivocaciones al leer o registrar el valor medido.
- errores de procedimiento
- no considerar una fuente de error.

No hay posibilidad de corrección para los errores graves. O se detectan y se eliminan a tiempo o se reflejan completamente en el resultado de la medición. A veces un resultado improbable puede indicar que se ha introducido un error grave pero también puede pasar que un resultado improbable sea correcto y las expectativas estén equivocadas

Para b):

Las desviaciones aleatorias se producen a causa de influencias cuya presencia depende de la casualidad. Entre ellas se encuentran todas las variaciones que no se pueden medir y sobre las que no se puede influir durante la medición:

- en el objeto a medir (envejecimiento)
- en el entorno (temperatura, humedad, presión, campos eléctricos o magnéticos, radiaciones)

- en el equipo de carga (rozamiento, desgaste, juego en los brazos de palanca)
- en los instrumentos de medición (envejecimiento, variación de la tensión de alimentación, influencias del entorno)
- en el observador (fatiga, impedimentos debido a influencias externas).

Las distintas influencias no se pueden separar y no siguen ninguna regla aparente. Las desviaciones aleatorias varían su magnitud y su signo matemático (\pm) de forma aleatoria. Solo se pueden evaluar repitiendo la medición varias veces.

Para c):

Las variaciones sistemáticas son causadas principalmente por

- imperfecciones en el objeto a medir
- imperfecciones en el método de medición
- imperfecciones en el equipo de medición

pero también pueden ser causadas por

- influencias del entorno
- características del observador.

Las variaciones sistemáticas tienen cierta magnitud y cierto signo (o $+$ o $-$).

Fundamentalmente es posible evaluarlas a través una comparación con mediciones realizadas mediante equipos o métodos de alta precisión. Una desviación sistemática puede depender del principio de medición empleado (p.ej. la conexión de un transductor con una curva característica no lineal a un amplificador de característica lineal). Las variaciones sistemáticas evaluables deben ser corregidas. La corrección K tiene el signo opuesto a la desviación.

9.2 El calculo del grado de desviación aleatoria para una serie de medidas

Empleando métodos estadísticos las desviaciones aleatorias pueden estimarse numéricamente y la estimación resulta más fiable cuanto mayor sea el número de mediciones realizadas, es decir que se pueden establecer límites fuera de los cuales una medida es poco probable.

9.2.1 Requerimientos para la medición

Las condiciones de la medición influyen sobre la distribución de los valores medidos. Se hace una diferenciación entre los dos casos extremos de los requerimientos para un experimento práctico:

Condiciones repetitivas:

Un observador repite la medición con los mismos instrumentos y bajo las mismas condiciones operativas. Bajo condiciones repetitivas no se pueden reconocer los errores sistemáticos.

Condiciones comparativas:

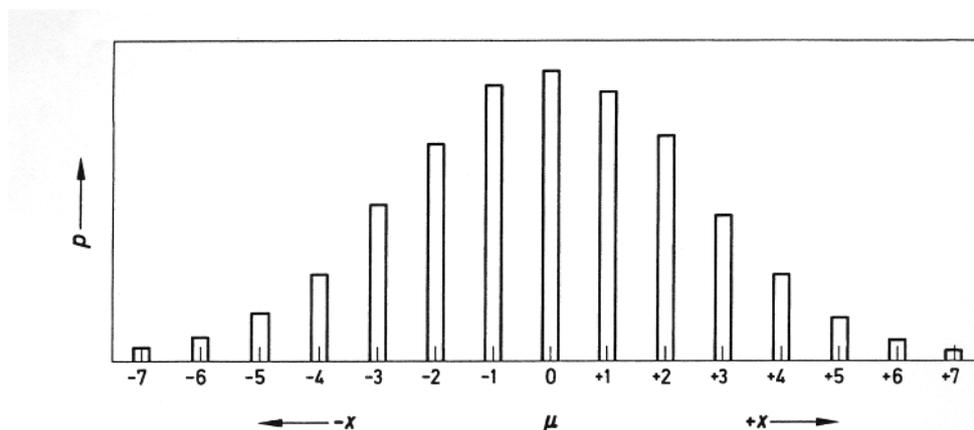
Distintos observadores realizan mediciones en distintos laboratorios con distintos instrumentos de medición del mismo tipo. En este caso la desviación típica es mayor que bajo condiciones repetitivas.

9.2.1.1 La distribución gaussiana

Para la evaluación estadística de una medición se asume una distribución normal de la variable investigada. Se puede asumir una distribución normal para todas aquellas dispersiones de la variable medida puramente aleatorias; no se puede tomar ninguna preselección o medida que pueda ocasionar desviación unilateral o favorecer un intervalo concreto de la región de dispersión. Esto significa que todas las mediciones se deben realizar en condiciones repetitivas o como mínimo en condiciones comparativas.

A partir de un gran número de mediciones individuales realizadas de esta forma (p.ej. 1000) se calcula el valor medio aritmético según la ecuación (9.2-1), apartado 9.2.2. Se calcula la diferencia entre cada una de las medidas y el valor medio. Se observara que hay muchas medidas cuyo valor es igual al valor medio, un gran número de medidas cuyo valor esta muy cercano al valor medio y cada vez menos medidas cuyo valor se aleja positiva o negativamente del valor medio.

Si se grafican las cantidades p encontradas para cada valor de diferencia en un histograma (diagrama de columnas), se obtiene un gráfico de distribución característico, véase la figura 9.2-1.



x = desviación del valor medio μ (la esperanza)

p = número de medidas dentro de un grupo

Figura 9.2-1: Histograma de la distribución de los valores de desviación de una serie de medidas

Bajo condiciones ideales y con una representación de divisiones infinitamente pequeñas se obtiene una distribución normal, también conocida como distribución de Gauss por su descubridor, véase la figura 9.2-2.

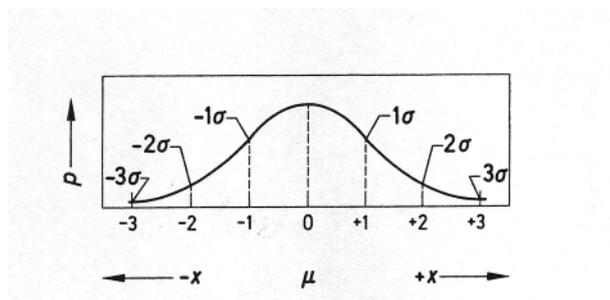


Figura 9.2-2: Densidad de frecuencia p de la distribución de Gauss (campana de Gauss)

En el diagrama de Gauss, las áreas de intervalos bajo la curva equivalen al porcentaje de valores individuales respecto al número total de valores de medición, la población.

Los puntos de inflexión de la curva están señalados en la figura 9.2-2 como -1σ y $+1\sigma$. El parámetro σ sobre el eje de abscisa se denomina desviación típica (en la figura 9.2-2 $1\sigma = 1x$) de la población.

Para la distribución normal (gaussiana) de unavariable medida, y con 1000 valores independientes hay

- 683 que están en la región $x \pm 1\sigma$ (68,3 %),
- 954 que están en la región $x \pm 2\sigma$ (95,4 %),
- 997 que están en la región $x \pm 3\sigma$ (99,7 %).

Los porcentajes equivalen a los niveles de confianza $(1-\alpha)$.

En la industria durante el control de calidad de fabricación generalmente se exige un nivel de confianza $(1-\alpha)$ de 95 %, y en algunos casos de 99 %.

En este caso para 1000 valores independientes hay

- 950 que están en la región $x \pm 1,96\sigma$, $1-\alpha = 95\%$,
- 990 que están en la región $x \pm 2,58\sigma$, $1-\alpha = 99\%$.

Si la dispersión de la variable medida es pequeña se obtiene una curva estrecha (figura 9.2-3a), si la dispersión es grande se obtiene una curva ancha (figura 9.2-3b).

A partir del valor de σ se puede conocer si una variable medida tiene una dispersión mayor o menor.

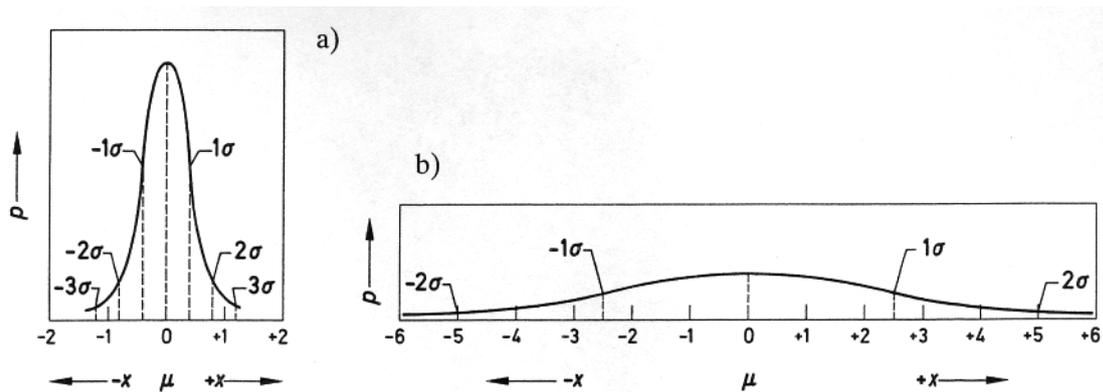


Figura 9.2-3: Densidad de frecuencia p de la distribución de Gauss
a) para una dispersión pequeña ($\sigma = 0,4x$)
b) para una dispersión grande ($\sigma = 2,5x$)

En la práctica no es posible repetir cada medición 1000 veces. Por eso (en lugar de calcular la desviación típica σ de la población) se calcula un valor aproximado para σ , la desviación típica s a partir de un número menor de mediciones mediante la ecuación (9.2-2), apartado 9.2.3

El valor s se acerca a σ conforme aumenta el número de mediciones individuales.

9.2.2 El valor medio aritmético

Si se miden n valores independientes $x_1 \dots x_i \dots x_n$ durante una serie de medidas bajo condiciones repetitivas o comparativas, generalmente el resultado es el valor medio aritmético de los n valores individuales, esto es la medida \bar{x} (se pronuncia “x barra”).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (9.2-1)$$

\bar{x} es una estimación de la esperanza μ .

9.2.3 La desviación típica (empírica) s y el coeficiente de variación v

El parámetro más importante para la evaluación cuantitativa de la dispersión aleatoria de n valores individuales de una serie de medidas respecto del valor medio \bar{x} es la suma del cuadrado de la desviación de cada observación; se denomina desviación típica (empírica) s .

$$\begin{aligned}
s &= + \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \\
&= + \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (9.2-2)
\end{aligned}$$

La desviación típica (empírica) s es una estimación de la desviación típica σ , véase el apartado 9.3.

El cuadrado de la desviación típica se denomina varianza s^2 o σ^2

En lugar de la desviación típica (empírica) s también se emplea el coeficiente de variación empírico v ,

v también se expresa en %. Para $x \neq 0$ se tiene:

$$v = \frac{s}{|\bar{x}|} = \frac{100 s}{|\bar{x}|} \% \quad (9.2-3)$$

El coeficiente de variación anteriormente se denominaba desviación típica “relativa s_r ”

9.2.4 Límites de confianza y intervalo de confianza de la esperanza μ

No se puede asumir que el valor medio \bar{x} es igual a la esperanza μ o al valor real x_w . Sin embargo es posible indicar un intervalo alrededor del valor medio \bar{x} , corregido de desviaciones sistemáticas, que contenga el valor de la esperanza con una probabilidad requerida $(1-\alpha)$. Los límites de este intervalo se denominan límites de confianza y la región en si se denomina intervalo de confianza de la esperanza; estos valores dependen del nivel de confianza $(1-\alpha)$. Se tiene que indicar el nivel de confianza seleccionado. Los límites de confianza simétricos respecto de la esperanza μ se calculan con:

$$\bar{x} + \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s \quad (\text{límite de confianza superior}), \quad (9.2-4)$$

$$\bar{x} - \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s \quad (\text{límite de confianza inferior}). \quad (9.2-5)$$

El factor t (distribución t de Student) depende del de confianza $(1-\alpha)$. En la tabla 9.2-1 se indican algunos valores numéricos para distintos de confianza.

| Número n de valores | Valores para t y t/\sqrt{n} (redondeados) | | | | | |
|------------------------|---|--------------|------|--------------|------|--------------|
| | Nivel de confianza $(1-\alpha)$ | | | | | |
| | 68,3 % | | 95 % | | 99 % | |
| | t | t/\sqrt{n} | t | t/\sqrt{n} | t | t/\sqrt{n} |
| 2 | 1,84 | 1,30 | 12,7 | 8,98 | 63,7 | 45,0 |
| 3 | 1,32 | 0,76 | 4,3 | 2,48 | 9,9 | 5,7 |
| 4 | 1,20 | 0,60 | 3,2 | 1,59 | 5,8 | 2,9 |
| 5 | 1,15 | 0,51 | 2,8 | 1,24 | 4,6 | 2,1 |
| 6 | 1,11 | 0,45 | 2,6 | 1,05 | 4,0 | 1,7 |
| 8 | 1,08 | 0,38 | 2,4 | 0,84 | 3,5 | 1,2 |
| 10 | 1,06 | 0,34 | 2,3 | 0,71 | 3,3 | 1,0 |
| 20 | 1,03 | 0,23 | 2,1 | 0,48 | 2,9 | 0,6 |
| 200 | 1,0 | 0,07 | 1,97 | 0,14 | 2,6 | 0,2 |

Tabla 9.2-1. Valores para t y t/\sqrt{n} para distintos valores del nivel de confianza $(1-\alpha)$

El aumento exagerado de t para pequeños valores de n , especialmente para altos niveles de confianza muestra que no se puede realizar ninguna evaluación estadística fiable si se tienen tan sólo dos mediciones, si s o σ no se conocen a raíz de mediciones anteriores.

Por otra parte no es rentable realizar un número demasiado elevado de mediciones. Generalmente n no debería ser superior a 10 ya que la reducción del límite de confianza no se corresponde con el esfuerzo realizado para un mayor número de repeticiones. Es mejor reducir la desviación típica s escogiendo un método de medición adecuado y realizando las mediciones con esmero. No obstante, se debería repetir cada medición 4 o 5 veces, ya que se obtiene la incertidumbre de medida con la fiabilidad requerida con un esfuerzo razonable.

9.2.5 La incertidumbre de medida u

El resultado de una serie de mediciones es el valor medio \bar{x} corregido de las variaciones sistemáticas conocidas, basado en un intervalo en el que se encuentra el valor real de la variable medida. La incertidumbre de medida u se define como el intervalo entre el valor medio corregido y los límites superior o inferior del intervalo.

Nota: No se debe denominar incertidumbre de medida a todo el intervalo entre el límite superior y el límite inferior [9-2]

La incertidumbre de medida u tiene dos componentes:

- el componente aleatorio u_z se refiere a las desviaciones aleatorias
- el componente sistemático u_s se refiere a las desviaciones sistemáticas desconocidas

La ecuación

$$u_z = \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s \quad (9.2-6)$$

es válida para una serie de medidas bajo condiciones repetitivas con desviación típica relativa σ_r desconocida.

El componente sistemático u_s generalmente sólo se puede estimar en base a una experiencia experimental adecuada (o a partir de las indicaciones del fabricante).

Se debe tener en cuenta lo siguiente respecto a los datos del fabricante:

Todos los instrumentos de medición tienen desviaciones sistemáticas, cuya magnitud varía dependiendo de las tolerancias inevitables de la fabricación para cada uno. Sería demasiado caro averiguar la desviación de cada ejemplar comparándolo con un patrón. Es suficiente indicar ciertos límites entre los cuales se encuentran las mayores desviaciones del valor deseado. Para los instrumentos de alta calidad los datos técnicos se indican en las hojas de datos junto con sus valores límite. El fabricante únicamente comprueba si las desviaciones se encuentran dentro de los límites garantizados. En este sentido los valores numéricos no son valores absolutos.

Se debe tener en cuenta que las desviaciones pueden afectar a las variables tanto aditiva como multiplicativamente, además pueden tener distintos signos, y se pueden compensar en mayor o menor medida. Por eso es aconsejable determinar un valor estimado para el componente sistemático u_s de la incertidumbre de medida para aquellas desviaciones sistemáticas que no se pueden determinar individualmente. Una posibilidad para tener en cuenta esto es calcular la suma geométrica de los valores individuales a_i

$$u_s = \pm \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2} \quad (9.2-7)$$

La incertidumbre de medida u se obtiene a través de la adición lineal de los componentes u_z y u_s :

$$u = u_z + u_s \quad (9.2-8)$$

Si ambos componentes son aproximadamente del mismo tamaño, se puede determinar u empleando la suma geométrica

$$u = \sqrt{u_z^2 + u_s^2} \quad (9.2-9)$$

9.2.6 El resultado de medición

El resultado y de una medición está compuesto por:

- el valor medio aritmético \bar{x} de una serie de mediciones
- la corrección K para las desviaciones sistemáticas
- la incertidumbre de medida u ,
- la indicación del nivel de confianza $(1-\alpha)$ elegido.

$$y = \bar{x} + K \pm u \text{ para } (1-\alpha) = \dots \%. \quad (9.2-10)$$

Nota:

Los detalles del apartado 9 están basados en [9-2]. Solamente se consideraron los párrafos relevantes para la medición con bandas extensométricas. En la norma se pueden encontrar informaciones adicionales.