

Artículo técnico

Montaje de reglas de encóder para obtener el máximo rendimiento térmico

Debido a la expansión térmica, muchas piezas pueden alterar su longitud cuando cambia la temperatura de la máquina. Todas las reglas de encóder están sometidas a las mismas leyes térmicas que el resto de los componentes de la máquina: a medida que cambia la temperatura, se altera la longitud de la regla. Sería posible aceptar los posibles errores que surjan, o controlar el entorno de trabajo de la máquina, pero un solo grado Celsius de variación de temperatura podría provocar errores de medición de más de diez partes por millón (10 $\mu\text{m}/\text{m}$). Este artículo trata sobre cómo gestionar la expansión térmica. Incluye opciones sobre cómo calcular y compensar las tensiones inducidas por los cambios térmicos. También se explica cómo la diferencia de expansión térmica entre la regla y el sustrato puede impactar en el rendimiento general del sistema de encóder.

1 Sistemas de montaje térmico

Es posible calcular y compensar las tensiones inducidas por los cambios térmicos en la regla. Para ello, normalmente, se toma la temperatura y se aplican los coeficientes de expansión térmica (CET) para calcular los cambios de longitud de la regla y el sustrato. Estos datos pueden compensarse. La tensión térmica de la regla depende del modo de montaje, como se explica a continuación. Es importante obtener la temperatura exacta de la pieza correspondiente de la máquina y, si procede, medir también con precisión la pieza de trabajo, ya que un error en cualquiera de ellas podría alterar la compensación térmica.

Ejemplo 1: En una máquina construida en aluminio con un eje lineal de 1 m de longitud, que funciona a una temperatura entre 15 y 25 °C. El aluminio tiene un CET relativamente alto: aproximadamente 23 ppm/°C. El eje de 1 m se dilata y se contrae $\pm 115 \mu\text{m}$ ($1 \times 23 \times 10^{-6} \times 5 = 115 \times 10^{-6} \text{ m}$) en el rango de temperatura (± 5 °C).

La mayoría de las reglas de encóder están fabricadas en materiales como acero inoxidable, cuyo coeficiente de expansión térmica es distinto al aluminio. Si se instala un encóder de este tipo en el eje a 20 °C sin tener en cuenta los efectos térmicos, podría generarse una incertidumbre de posición considerable. En el ejemplo, un eje de aluminio de 1 m podría alcanzar un error de posición de 115 μm con un cambio de temperatura de 5 °C, dependiendo del sistema de montaje.

Por tanto, es necesario decidir si la regla debe fijarse firmemente al sustrato o dejarla flotante por encima de este.

1.1 Adaptable al sustrato

Si una máquina se dilata hasta 115 μm con el incremento de temperatura, sería conveniente llegar hasta la misma posición física de la máquina en todas las temperaturas, por ejemplo, cuando la pieza de trabajo está sujeta en zonas específicas de la máquina. En este caso, la regla debe ser elástica, capaz de adaptarse a la dilatación y contracción de la máquina.

Este sistema de montaje se denomina 'adaptable al sustrato', ya que este domina la regla, que se dilata y contrae al mismo nivel que el sustrato.

1.1.1 Selección de reglas adaptables al sustrato

Este tipo de reglas es muy apropiado para una serie de aplicaciones. Por ejemplo:

- Para aplicaciones en las que se prefiere utilizar el sistema de coordenadas de la máquina en vez de una posición absoluta, por ejemplo, para acceder a una pieza de trabajo colocada en una posición fija de la mesa de la máquina.
- Cuando el CET de la pieza de trabajo es muy similar al CET del sustrato de la máquina y ambos se mantienen a la misma temperatura, las dilataciones de la regla y la pieza de trabajo coinciden estrechamente. Por consiguiente, cualquier cambio del sustrato a una determinada temperatura, se compensa automáticamente con el cambio de longitud equivalente en la regla.
- Si el eje de la máquina es largo, la incertidumbre asociada a la regla no aumenta con la longitud, pero si lo hace considerablemente si la regla es flotante.
- Si el sustrato tiene baja conductividad y alta masa térmica (por ejemplo, una pieza gruesa de granito), las fluctuaciones a corto plazo de la temperatura del aire provocan cambios mínimos de temperatura y dilatación en el sustrato, por tanto, estos cambios a corto plazo podrían omitirse. No obstante, es importante recordar que sí deben tenerse en cuenta los cambios de temperatura a largo plazo. El control de temperatura a largo plazo es más difícil de conseguir, ya que la parte más importante es la temperatura promedio del sustrato. Por tanto, se recomienda realizar mediciones de longitud más directas, por ejemplo, la comparación con un estándar conocido.

1.2 Reglas flotantes

La regla puede montarse de forma que puede dilatarse o contraerse ampliamente independiente del sustrato: este sistema se denomina regla 'flotante'. En este caso, la regla flotante está dominada por el CET y la temperatura de la misma regla. En el Ejemplo 1, la máquina está fabricada en aluminio, que tiene un alto coeficiente de expansión térmica de ~23 ppm/°C. Una regla de acero inoxidable tiene un coeficiente de expansión más bajo, 10,1 ppm/°C, que reduce la dilatación a 50,5 µm por 5 °C, comparado con los 115 µm por 5 °C del sustrato de aluminio. El rendimiento puede mejorarse aún más con una regla de baja expansión y mediante compensación térmica.

La expansión de una regla flotante se controla mediante la temperatura de la regla. Las reglas flotantes suelen ser finas (<1,5 mm) y tienen una conductividad térmica relativamente alta. Por tanto, es posible asumir que la temperatura de la regla, como medida de fondo, es uniforme. Esto facilita la medición de temperatura pertinente y, por consiguiente, la compensación térmica precisa. Dado que una regla flotante es prácticamente independiente del sustrato, no es imprescindible conocer con exactitud la expansión del sustrato.

La compensación térmica de una regla flotante puede mejorarse mediante una regla de bajo CET. Puesto que las correcciones de compensación suelen ser reducidas, los errores de compensación resultantes de una medición de temperatura inexacta son también reducidos. Esto es especialmente beneficioso si existe incertidumbre en las mediciones de temperatura, o si se producen variaciones locales de temperatura en la máquina.

La expansión del sustrato afectará, al menos parcialmente, a la expansión neta de la regla en todos los posibles sistemas de montaje: la regla no se dilatará exactamente según lo indicado por su CET exclusivamente. La flexión de la regla alejada de la posición, que podría predecirse en una regla perfectamente flotante se denomina alteración, y debería minimizarse principalmente en la instalación de la regla flotante. Cabe señalar que esta alteración limita el CET efectivo mínimo que se puede obtener, aunque el material de la regla tenga un CET bajo. Renishaw dispone de dos sistemas esenciales de montaje de la regla flotante, diseñados para reducir al mínimo la alteración de la regla en distintas condiciones. Estos sistemas utilizan cinta autoadhesiva de montaje e impiden cualquier movimiento de la regla en el eje (denominado montaje mecánico) mediante abrazaderas para la regla recta y *FASTRACK™* para la regla de cinta de acero inoxidable. La siguiente sección trata más detalladamente la alteración de la regla alejada del comportamiento de una regla flotante perfecta.

2 Alteración de reglas flotantes

2.1 Alteración de la regla

Renishaw ha desarrollado y verificado experimentalmente modelos aritméticos de la alteración resultante de los dos sistemas de montaje: con cinta adhesiva o mecánico. Los propios modelos son demasiado complejos para presentarlos

aquí en su totalidad, y algunos resultados son no-lineales: por ejemplo, los extremos de la regla sufren la mayor parte de los errores de posición, y este no puede interpolarse sin más a la longitud de la regla. Las siguientes ecuaciones predicen el caso de alteración más desfavorable en el extremo de la regla.

2.1.1 Términos principales

Alteración error de posición en micras del extremo de la regla generado por el modo de montaje, que acopla parcialmente la expansión de la regla a la del sustrato.

Es la diferencia de longitud entre una regla teórica perfectamente flotante y la regla real. La alteración se mide generalmente en µm y en este documento se representa mediante *u*.

Dilatación relativa es el cambio relativo de expansión inducida térmicamente entre la regla y el sustrato por cambios de temperatura, como muestra la Figura 1. En este documento se representa mediante ρ y se mide en ppm. Se define como:

$$\text{Dilatación relativa} = \rho = \Delta T(CTE_{\text{sustrato}} - CTE_{\text{regla}})$$

Donde:

ΔT es el cambio de temperatura mas allá de cierta temperatura definida, generalmente, durante la instalación (20 °C)

CTE_{sustrato} es el coeficiente de expansión térmica del sustrato (ppm/°C)

CTE_{regla} es el coeficiente de expansión térmica de la regla (ppm/°C)

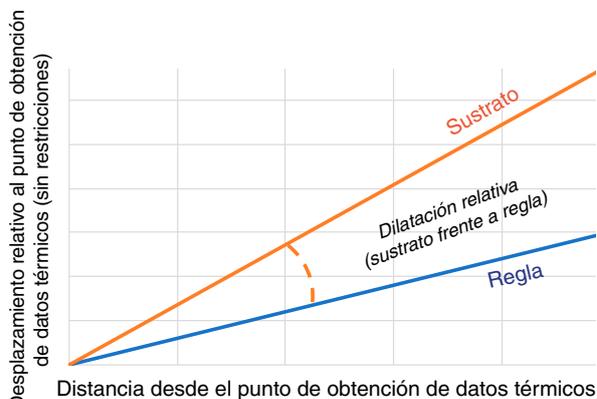


Figura 1. Dilatación relativa entre la regla y el sustrato

Longitud libre es la distancia entre el anclaje de la regla y el sustrato, es decir, el punto de obtención de datos térmicos (véase la sección 3.1) y el extremo libre más alejado de la regla. Normalmente, el punto de obtención de datos térmicos se encuentra en el centro de la regla, y la longitud libre sería la mitad de la longitud total de esta. En este documento, la longitud libre se representa mediante *z* y se mide en m.

Diferencia de expansión es la diferencia de expansión térmica de la regla y el sustrato entre el punto de obtención de datos térmicos y el extremo libre más alejado: se calcula como $z\rho$.

2.1.2 Ecuaciones

Parámetros

En las ecuaciones siguientes se utilizan los parámetros siguientes.

E = Constante elástica de la regla (Pa)

A = Área de la sección transversal de la regla (m^2)

L = Longitud total de la regla (m)

z = Longitud libre de la regla (m)

es decir, en una regla con un punto de obtención de datos central $z = L/2$

u = Alteración (μm)

ρ = Dilatación relativa (ppm)

q = Resistencia friccional por longitud de unidad debido al montaje mecánico (Nm^{-1})

k = Elasticidad transversal de la cinta por longitud de unidad debido al montaje con cinta adhesiva (Nm^{-2})

Reglas con montaje mecánico:

En una regla montada mecánicamente (sujeta con abrazaderas y *FASTRACK*) la alteración de la regla (u) puede estimarse mediante:

$$u = \frac{qz^2}{2EA}$$

Esta relación es correcta siempre que la alteración relativa sea superior al valor del umbral facilitado por:

$$\rho \geq \frac{qz}{EA}$$

Esta condición se cumple en la mayoría de las condiciones reales. Una consecuencia importante de esto es que la alteración es generalmente independiente de la alteración relativa.

También se puede observar que la alteración depende del cuadrado de la longitud libre.

Reglas montadas con cinta adhesiva:

En reglas montadas con cinta adhesiva, la alteración de la regla es aproximadamente:

$$u = \frac{\rho kz^3}{3EA}$$

Se diferencia de las reglas con montaje mecánico en dos puntos significativos: aquí, la alteración depende de la dilatación relativa del cubo de la longitud libre, en vez del cuadrado de la longitud.

Condición de limitación:

Los dos métodos de montaje alternativo generan limitaciones teóricamente idénticas si:

$$z\rho = \frac{3q}{2k}$$

Cuando una aplicación tiene valores menores de dilatación y no son discordantes (dilatación relativa de longitudes libres) con este valor crítico, el montaje con cinta adhesiva produce menos limitaciones que el montaje mecánico. En diferencias de expansión mayores, ocurre a la inversa.

El punto límite depende únicamente de q y k , y una vez conocido puede evaluarse la diferencia de expansión para todas las configuraciones de la regla.

Este punto límite de diferencia de expansión, puede utilizarse para determinar en qué condiciones generan menos limitaciones las reglas con montaje mecánico o con cinta adhesiva. La diferencia de expansión límite de la familia de reglas de cinta RTL es de 20 μm y de 500 μm para las reglas rectas REL / RSL.

Gráficos de dilatación de limitación / relativa

Los gráficos siguientes muestran un resumen del efecto de los sistemas de montaje en el desplazamiento de los extremos de la regla. Mediante estos gráficos, es posible predecir cómo afecta el sistema de montaje elegido a la metrología de un sistema. Los gráficos muestran pares de curvas de limitación / dilatación relativa para montajes con cinta adhesiva o mecánico con reglas de distintas longitudes.

El sistema de montaje que genera las menores limitaciones (mejor rendimiento) se resalta mediante líneas sólidas.

Los gráficos de la Figura 2 permiten identificar qué sistema de montaje genera menos limitaciones para una dilatación concreta.

Por ejemplo, si una pieza de 1 m de regla RTL ($CTE \approx 10 \text{ ppm}/^\circ C$) se monta sobre un sustrato de aluminio ($CTE \approx 23 \text{ ppm}/^\circ C$) con un punto de obtención de datos central y se calienta 5 $^\circ C$, se genera una dilatación relativa de $(23 - 10, 1) \times 5 \approx 65 \text{ ppm}$.

En el gráfico de la Figura 2a, se observa que la limitación se reduce con el montaje *FASTRACK* ($\sim 0,18 \mu m$) comparado con el montaje con cinta adhesiva ($\sim 0,28 \mu m$).

El área de la parte superior del gráfico, encima de la línea negra, indica que la cinta adhesiva puede fallar debido a la diferencia de expansión excesiva entre la regla y el sustrato.

Observe que estos gráficos están basados en la longitud total de la regla, L , y se presupone que está anclada centralmente o no tiene ningún anclaje, p. ej. $z = L/2$. En los demás casos, donde se conoce la longitud z (anclaje hasta el extremo libre), solo tiene que usar el valor $L = 2z$ de los gráficos.

Averiguar el efecto de la fricción en un montaje mecánico es incierto: los gráficos proporcionan una orientación de diseño prudente, que no debe utilizarse para una compensación de errores concreta.

Gráfico de dilatación relativa / alteración de la gama de reglas de cinta RTL

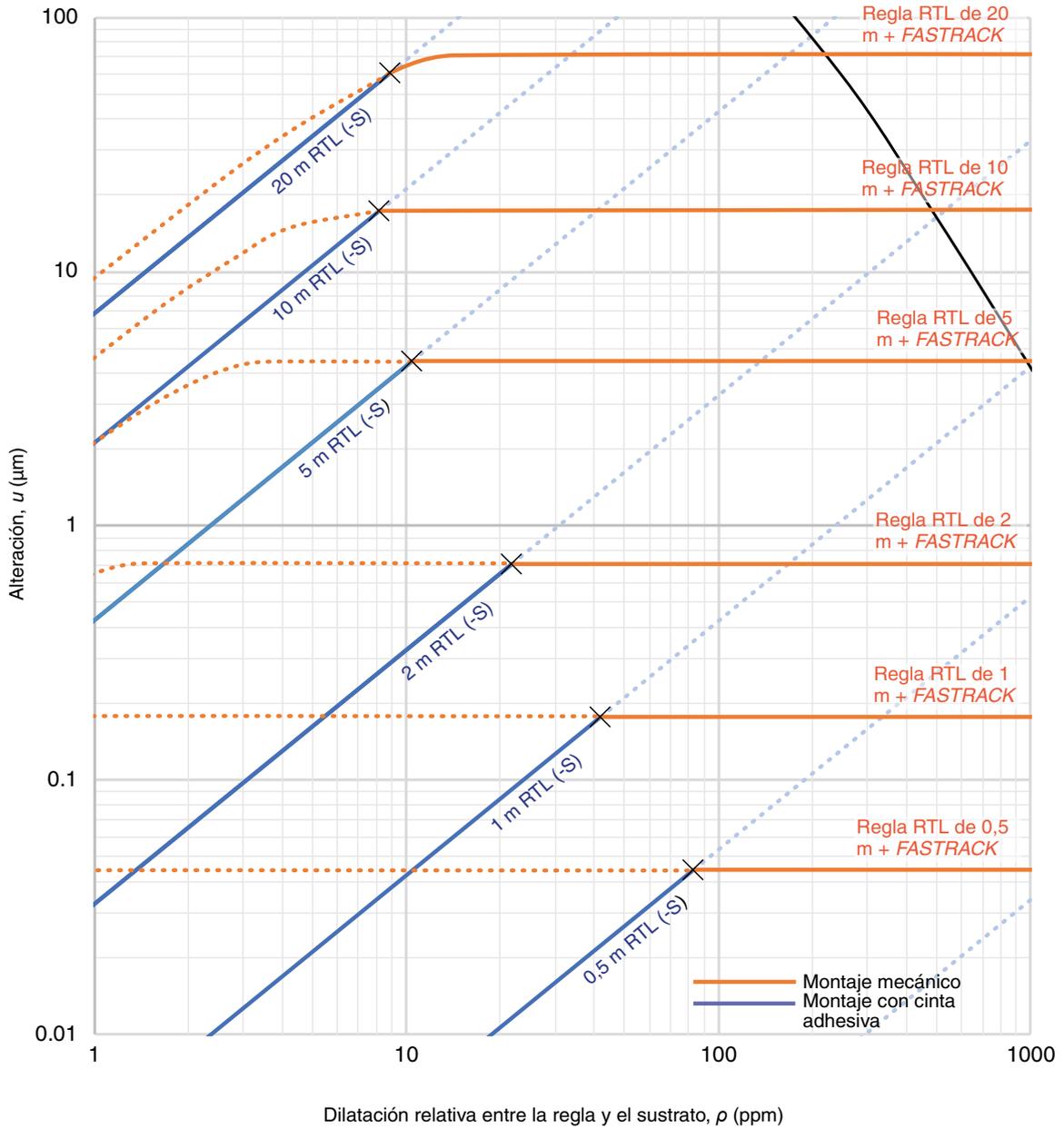


Figura 2a. Alteración resultante de una dilatación relativa conocida, para diferentes longitudes y sistemas de montaje de la gama de reglas RTL. En estos gráficos se presupone el uso de un anclaje central o ninguno.

Gráfico de dilatación relativa / alteración de las reglas rectas REL y RSL

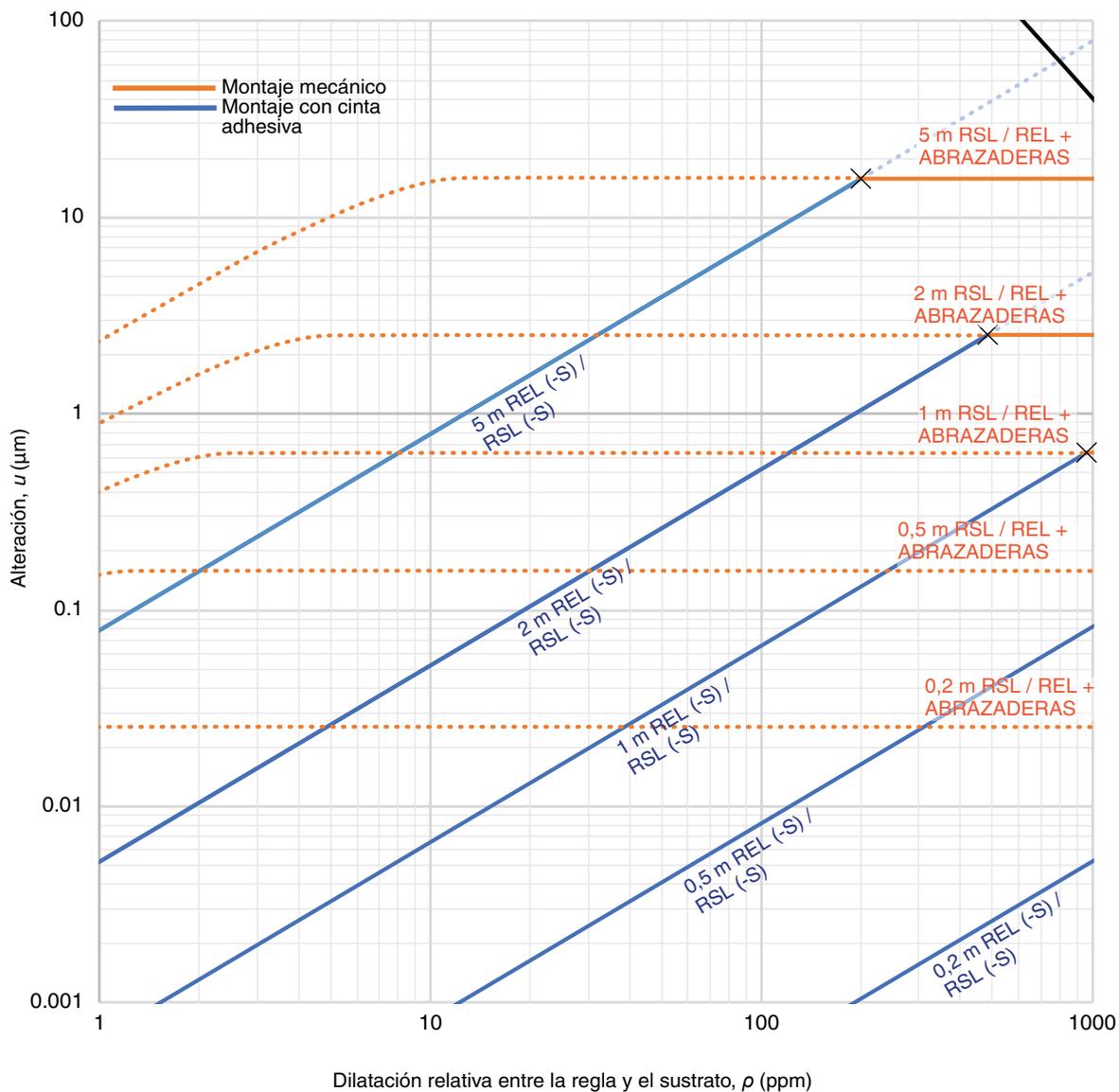


Figura 2b. Alteración resultante de una dilatación relativa conocida, para diferentes longitudes y sistemas de montaje de la gama de reglas RSL / REL. En estos gráficos se presupone el uso de un anclaje central o ninguno.

2.2 Histéresis

Es posible que la limitación de una regla montada mecánicamente se vea afectada por este historial térmico. Por ejemplo, imagine una regla montada mecánicamente con cero CET fijada a un sustrato con CET distinto de cero. El sistema se ha calentado. En principio, la regla se adapta aproximadamente al sustrato, ya que las tensiones térmicas son insuficientes para superar la fricción del sistema de montaje. El calentamiento inicial genera la dilatación de la regla según el CET del sustrato (*paso 1* en la Figura 3).

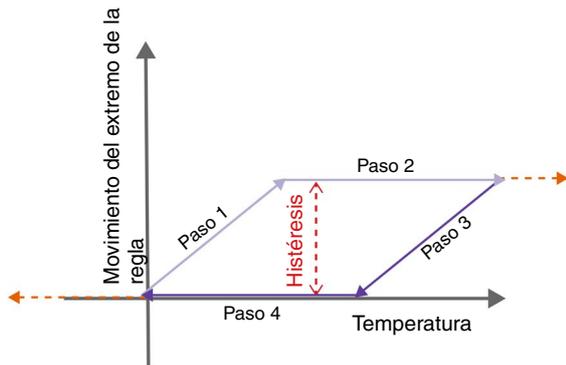


Figura 3. Movimiento del extremo de una pieza de regla según cambia la temperatura. En este caso, la regla está montada mecánicamente, tiene cero CET y el sustrato tiene CET positivo.

Finalmente, las tensiones inducidas son tan altas que hacen que la regla se deslice sobre el sustrato y, a continuación, se dilate según su propio CET (en este caso, cero) (*paso 2*).

Cuando baja la temperatura, ocurre a la inversa, por lo que la regla tiene que enfriarse para superar la fricción de montaje y deslizarse sobre el sustrato (*pasos 3 y 4*). Puede deducirse, entonces, que la posición de la regla depende del historial del sistema: denominado histéresis de montaje. La histéresis de montaje provoca cierta incertidumbre en la expansión de la regla. La magnitud de este efecto es igual a la limitación máxima en las reglas con montaje mecánico. Generalmente, las reglas montadas con cinta adhesiva no experimentan histéresis de montaje porque no existe fricción mecánica.

3 Otras consideraciones de montaje de regla

3.1 Punto de obtención de datos

Para usar una regla flotante, se recomienda utilizar un punto de obtención de datos térmicos. Se trata de un único punto en el que la regla se fija rígidamente al sustrato de forma que no se pueden separar.

Generalmente, se recomienda que el punto de obtención de datos térmicos se sitúe a la mitad de la longitud de la regla, ya que se reduce la longitud libre y, por tanto, la limitación total de esta.

Como se explica en la sección 2.1.2, la limitación en el extremo de la regla depende de la longitud libre al cuadrado para el montaje mecánico de la regla, y en la longitud libre al cubo para montaje con cinta adhesiva.

Es posible montar la regla Renishaw sin un punto de obtención de datos. No obstante, no se recomienda utilizarlo por una serie de razones. Si no se utiliza un punto de obtención de datos, no es posible conocer el punto en el que la regla no se mueve con relación al sustrato. Los datos simétricos podrían indicar que este punto se encuentra a la mitad de la longitud de la regla, pero no ocurre así si existen gradientes térmicos, o una variación en el montaje o las propiedades del sustrato a lo largo de la regla. Además, el punto de obtención de datos térmicos permite evitar los movimientos de la regla, si el eje está sometido a aceleración.

Confirmación del rendimiento de la instalación:

Montaje con abrazaderas y FASTRACK

En las reglas con montaje mecánico, la calidad de la instalación puede afectar a la resistencia de fricción y, por tanto, podría generarse una limitación. Antes de la instalación, verifique que el sustrato está limpio, sobre una superficie recta, sin restos de líquidos o salpicaduras, y limpie la zona varias veces con un paño seco que no suelte pelusa.

Para usar una regla montada con FASTRACK o con abrazaderas, es importante comprobar la fuerza de deslizamiento del eje antes de aplicar la toma de datos a la regla. La comparación de la fuerza de deslizamiento con la prevista para la instalación ($\leq 0,3 \text{ Nm}^{-1}$ para RTL y $\leq 25 \text{ Nm}^{-1}$ para la regla recta) indica si se puede alcanzar o no la alteración calculada. A veces se producen errores de instalación, pero no se detectan porque no se ha comprobado la fuerza de deslizamiento, y esto puede aumentar significativamente la alteración de la regla. La fricción y, por consiguiente, la alteración máxima, de las reglas rectas sujetas con abrazaderas puede reducirse utilizando menos abrazaderas para fijar la regla en su posición, como se recomienda en la guía de instalación.

3.1.1 Regla montada con cinta adhesiva: diferencia de expansión máxima

La diferencia de expansión máxima de las reglas montadas con cinta adhesiva no debe superar 1 mm, incluso durante el tránsito, como muestran las líneas negras en la parte superior derecha de las Figuras 2a y 2b. Pasado este punto, no se puede garantizar el rendimiento mecánico de la cinta adhesiva.

3.1.2 Reglas con adaptación al sustrato: RKL y RGS

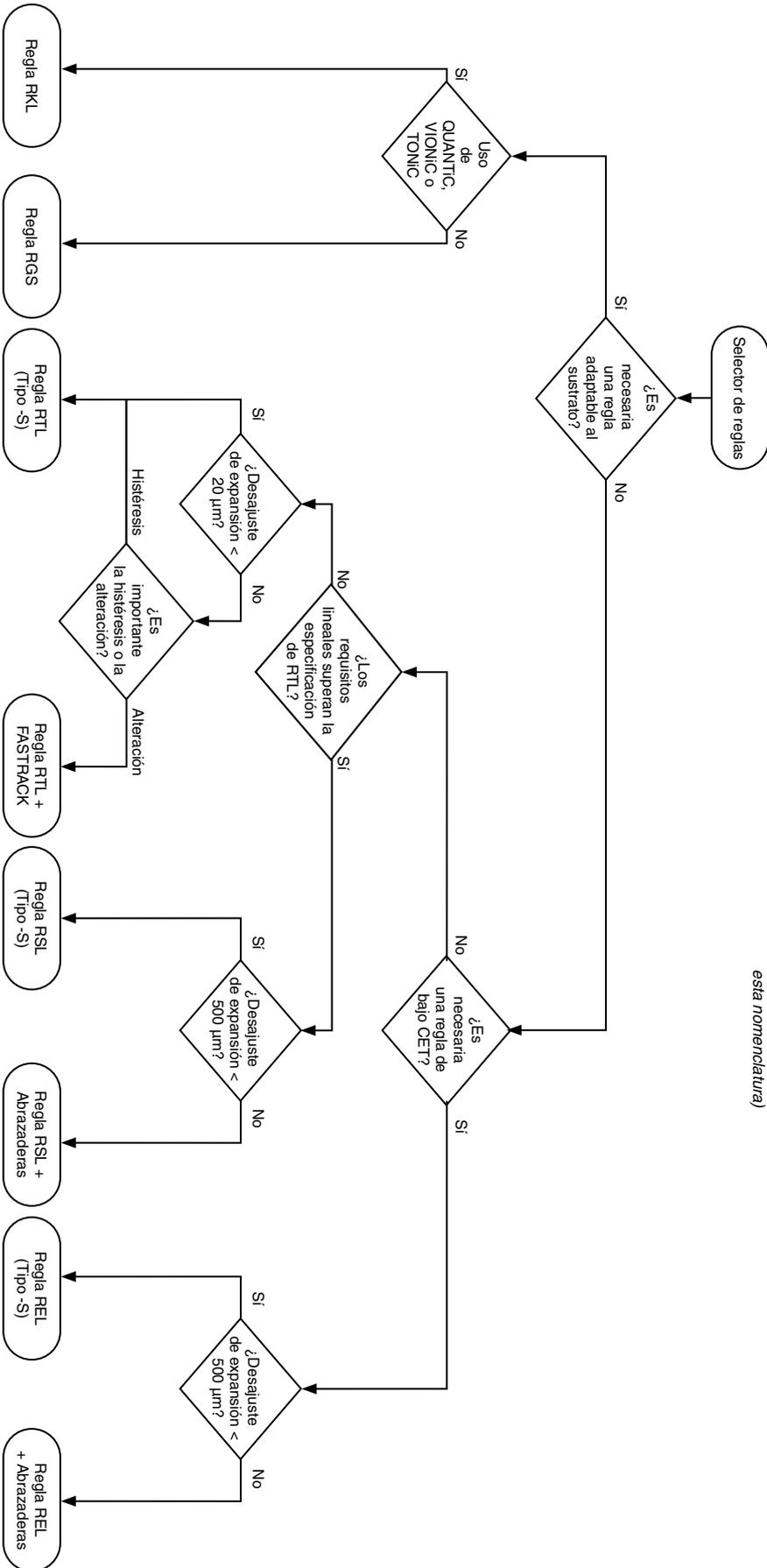
Cuando se utiliza una regla adaptable al sustrato RKL o RGS, es importante aplicar epoxy y usar abrazaderas para sujetar la regla rígidamente en dos puntos al sustrato. Este paso es necesario para asegurar la adaptación correcta de la regla al sustrato, ya que la cinta adhesiva no es suficiente.

Guía de selección de la regla

El procedimiento siguiente le ayuda a elegir la regla y la opción de montaje más apropiadas para cada aplicación.

4 Otras consideraciones de montaje de regla

El procedimiento siguiente le ayuda a elegir la regla y la opción de montaje más apropiadas para cada aplicación.



Tipos de reglas:
 RTL es una regla de cinta de acero inoxidable flotante
 RKL es una regla de acero inoxidable adaptable al sustrato
 REL es una regla recta de acero inoxidable de baja expansión flotante
 RSL es una regla recta de acero inoxidable flotante
 RGS es una regla de cinta de acero inoxidable adaptable al sustrato
 -S indica que la regla se ha montado con cinta adhesiva por las dos caras
 (Nota: todas las reglas RKL y RGS se montan con cinta adhesiva, por lo que no usan esta nomenclatura)

Para determinar si necesita una regla adaptable al sustrato o de bajo CET, consulte las secciones 2.2 y 2.3. A veces, es más conveniente usar cinta adhesiva de montaje en vez de montaje mecánico, aunque este último ofrezca menos alteración. La razón es que la cinta de montaje no genera histéresis, que puede ser importante para algunas aplicaciones.

5 Glosario

Terminología	Definición
Montaje con cinta adhesiva	Regla fijada en su posición mediante cinta adhesiva por las dos caras en toda la longitud.
CTE	Coeficiente de expansión térmica (CET); la variación de tamaño de un objeto debido a los cambios de temperatura. Normalmente, se representa en partes por millón por grado Celsius, o ppm/°C.
Dilatación	Cambio de longitud de un componente dividido entre su longitud original.
Dilatación relativa	Diferencia de dilatación entre un sustrato y la regla montada sobre este.
Alteración	Error de posición del extremo de la regla generado por el sistema de montaje. Diferencia de longitud entre la regla flotante ideal y la posición real del extremo de la regla.
Diferencia de expansión	La diferencia entre la expansión térmica de la regla y el sustrato entre el punto de obtención de datos térmicos y el extremo libre más alejado.
Flotante	Sistema en el que la expansión térmica de la regla se controla mediante las propiedades de la regla, que debe ser prácticamente independiente del sustrato.
Longitud libre	Distancia entre el punto de obtención de datos térmicos de una regla flotante y el extremo más alejado de esta desde este punto. Si no se emplea un punto de obtención de datos térmicos, se presupone que este se encuentra en el centro del eje.
Histéresis de montaje	Diferencia de expansión neta de la regla, a una misma temperatura, durante la aproximación a esta temperatura desde otra más alta o más baja.
Adaptable	Sistema en el que la expansión térmica de la regla se controla mediante la expansión del sustrato.
Montaje mecánico	Regla sujeta en su posición mediante guías mecánicas. Estas son <i>FASTRACK</i> para la regla de cinta o abrazaderas y sujeciones para la regla recta.
Punto de obtención de datos térmicos	Punto en el que la regla flotante está firmemente sujeta al sustrato. No pueden separarse, por lo que la expansión de la regla relativa al sustrato se centra en este punto.