

# Verificación y caracterización metrológica de máquinas de ensayos de rodadura a dos flancos para engranajes sinfín-corona

J. Santolaria Mazo<sup>(1)</sup>, M. Pueo Arteta<sup>(2)</sup>, R. Acero Cacho<sup>(2)</sup>, G. Aso Arjol<sup>(3)</sup>

(1) Dpto. de Ingeniería de Diseño y Fabricación. Universidad de Zaragoza  
jsmazo@unizar.es

(2) Centro Universitario de la Defensa. Zaragoza

(3) Echeverría Construcciones Mecánicas. Zaragoza

Para la verificación automática de engranajes existen diversos métodos asociados sobre todo al tipo de ensayo y máquina empleados. De todos ellos, los ensayos de rodadura se convierten en la forma más directa de comprobar la calidad de los engranajes desde el punto de vista de sus futuras condiciones de funcionamiento. Aunque a priori el ensayo de rodadura a un flanco aporte mayor información, el ensayo de rodadura a dos flancos está mucho más extendido por su menor coste, debido a su sencillez. En este artículo se presenta la calibración y caracterización metrológica experimental de una máquina de ensayos de rodadura a dos flancos para engranajes sinfín-corona, donde la corona es la rueda a comprobar y el sinfín es la rueda patrón. Se analizan y caracterizan las fuentes de error que afectan tanto al posicionamiento relativo de las ruedas como a la medida, y su propagación hasta los parámetros finales de ensayo. Se trata de instrumentos extremadamente sensibles a numerosas fuentes de error aún con ruedas de gran tamaño, por lo que este trabajo sienta las bases para la elaboración de un procedimiento estandarizado de verificación de este tipo de máquinas, inexistente en la actualidad.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los engranajes deben ser elementos precisos tanto en su fabricación como en sus condiciones de operación. Para la verificación automática de la calidad de un engranaje individual existen máquinas dedicadas, como los centros de medición de engranajes (CME), o máquinas de medir por coordenadas (MMC) con ciclos de medición dedicados, que verifican sus parámetros geométricos de paso, perfil de diente y hélice mediante palpado continuo. En el caso de parejas de engranajes, los ensayos más aceptados son los de rodadura, ya que se obtienen parámetros relacionados con sus futuras condiciones de operación.

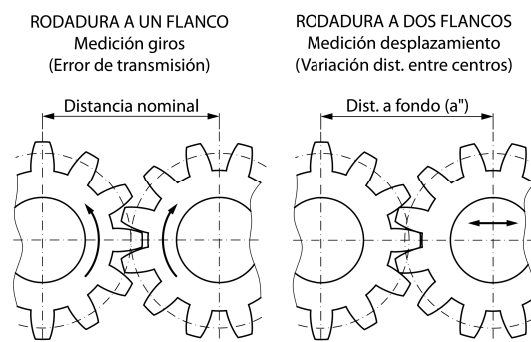


Figura 1. Esquema básico ensayos de rodadura

Los dos posibles ensayos de rodadura [1,2] existentes, denominados ensayo de rodadura a un flanco y a dos flancos (figura 1) o tangencial compuesto y radial compuesto

respectivamente, tienen diferencias en la disposición de las ruedas a medir, en los parámetros medidos y en la interpretación de los resultados. En el ensayo de rodadura a un flanco se evalúa el error de transmisión de dos engranajes que ruedan a la distancia nominal entre centros comparando el ángulo girado por cada una de las ruedas. En el caso del ensayo de rodadura a dos flancos se mide la variación de la distancia entre centros de dos engranajes mientras se obliga a los flancos derechos e izquierdos a que estén siempre en contacto durante toda la realización del ensayo.

A pesar de que el ensayo de rodadura a un flanco proporciona más información funcional sobre el engranaje que su homólogo, el ensayo de rodadura a dos flancos está mucho más extendido debido a su menor coste y a su aplicación directa a pie de máquina.

## 2. ENSAYO RODADURA A DOS FLANCOS

Aunque puede realizarse entre ruedas de producción con otras implicaciones, el principio básico del ensayo de rodadura a dos flancos consiste en emparejar la rueda a comprobar con una rueda conjugada patrón de mayor calidad, de al menos tres grados y que actúa además como rueda conductora durante el ensayo [1,2], pudiéndose achacar así las desviaciones al engranaje a verificar. En estas condiciones, se aplica una fuerza en dirección radial (figura 2) de tal modo que ambas ruedas se encuentren engranadas sin juego a una distancia entre centros menor que la nominal.

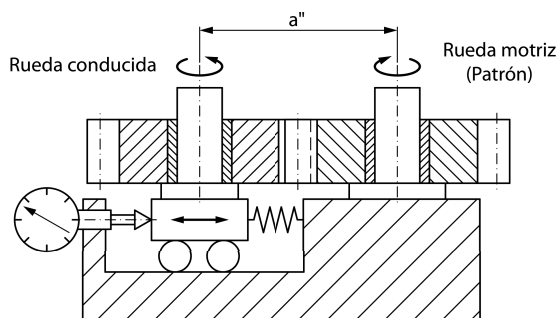


Figura 2. Ensayo rodadura a dos flancos

La columna sobre la que se aplica presión no debe estar bloqueada sino que debe ser capaz de realizar pequeños desplazamientos en dirección radial. Al rodar los engranajes sin juego, la excentricidad de la rueda a comprobar dará lugar a desplazamientos en esta dirección. Este movimiento corresponderá en primer lugar a cada uno de los engranes de la rueda a comprobar, es decir, cada vez que un diente entra en contacto con su conjugado y complete su línea de acción la columna tendrá un desplazamiento de ida y vuelta respectivamente. Este movimiento de vaivén, estará además modulado por la excentricidad de la rueda, normalmente debida al tallado excéntrico de sus dientes.

Durante el ensayo se miden y analizan las variaciones de la distancia entre centros ( $a''$ ) a lo largo de una vuelta completa de la rueda conducida determinando así el grado de calidad del engranaje. De esta manera se obtienen parámetros relacionados con la desviación de distancia entre centros, juego y excentricidad de rodadura conocidos genéricamente como errores compuestos de desviación radial.

## 3. PARÁMETROS DE RODADURA A DOS FLANCOS

Respecto a la distancia entre centros sin juego  $a''$ , representando el desplazamiento de la columna, se definen los siguientes parámetros [3] (figura 3) del ensayo a dos flancos:

- **Error compuesto radial (a dos flancos)  $F_i''$** : Es la diferencia entre el máximo y mínimo valor obtenido de las lecturas de variación de distancia entre centros.
- **Error compuesto radial diente a diente  $f_i''$** : Es la mayor variación de la distancia entre centros que se localiza dentro de un periodo correspondiente a un engrane, es decir, a un paso.

- **Error compuesto radial de baja frecuencia ó  $Fr''$** : Es la diferencia entre el máximo y el mínimo valor de la componente de baja frecuencia de  $Fi''$ . Este parámetro proviene de la descomposición del resultado en sus componentes de alta y baja frecuencia mediante la transformada de Fourier.
- **Error compuesto radial diente a diente de alta frecuencia u onda corta  $fk''$** : Es la componente de alta frecuencia del resultado del ensayo de rodadura a dos flancos. Aunque en concepto es un parámetro distinto a  $fi''$ , en la práctica son valores casi coincidentes por lo normalmente no se suele hacer distinción entre ellos.

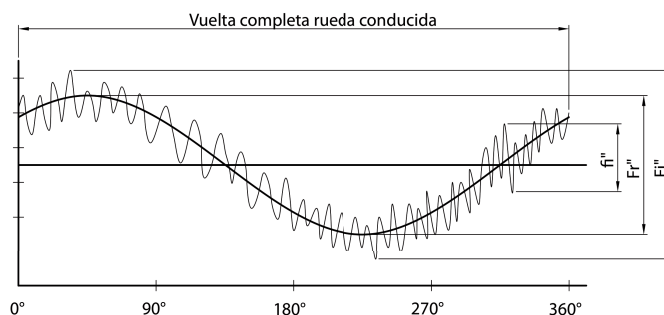


Figura 3. Parámetros de ensayos de rodadura de engranajes a dos flancos

Al realizar el ensayo de rodadura a dos flancos se obtiene una gráfica de tipo senoidal compuesta por una componente de baja frecuencia debida a la excentricidad y otra componente de alta frecuencia que representa la calidad [4] del tallado del engranaje. Para obtener estos resultados por separado se descomponen los datos obtenidos mediante la Transformada de Fourier (figura 4) determinando qué parte corresponde a excentricidad y cuál es la que corresponde al tallado del diente.

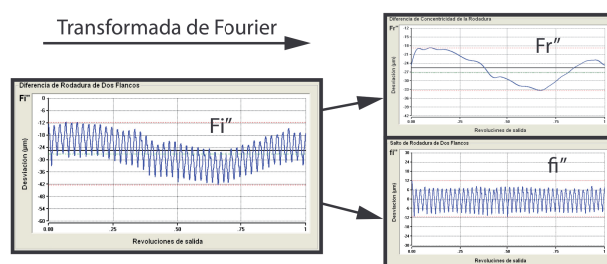


Figura 4. Descomposición según la Transformada de Fourier

#### 4. MAQUINA DE ENSAYOS DE RODADURA A DOS FLANCOS PARA SINFÍN CORONA

En este trabajo se presenta la calibración y caracterización metrológica experimental de una máquina de ensayos de rodadura a dos flancos para engranajes sinfin-corona, donde la corona es la rueda a comprobar y el sinfín es la rueda patrón. Existen múltiples disposiciones de este tipo de máquinas, por lo que en este apartado se describe la empleada (figura 5) en la calibración y caracterización metrológica del apartado 6 tras haberla sometido a un retrofit donde se han sustituido sus instrumentos de medida por otros nuevos.

Sobre la guía mecanizada de una bancada (a) de acero fundido, desliza el carro porta-sinfín (b) cuyo posicionamiento a la distancia nominal entre centros se realiza de forma manual mediante volante y husillo (c), según la lectura visualizada en pantalla del encoder lineal (d) unido a dicho carro. Sobre él y montado entre puntos se sitúa un sinfín patrón (e) que actúa de rueda motriz y es accionada y controlada mediante un servomotor (f).

Al otro lado de la bancada se sitúa la columna (g) donde va alojada la corona a verificar y mediante un palpador lineal (h) se registran todas las variaciones sufridas de la distancia entre centros entre sinfín y corona. Esta columna dispone de un sistema elástico (i) cuya

posición de bloqueo (columna retirada) marca el “cero” máquina, y cuya posición de desbloqueo garantiza de una forma continua el contacto entre ambos flancos durante todo el ensayo.

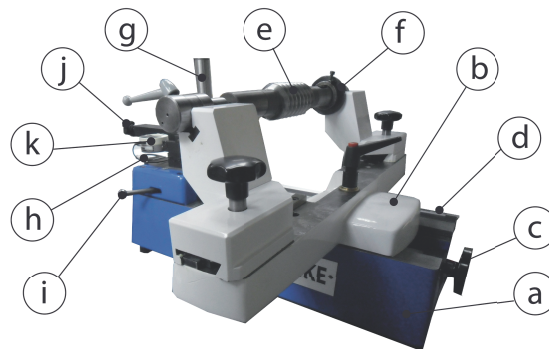


Figura 5. Máquina de ensayos de rodadura a dos flancos para sinfín corona

Sobre la columna se incluye también un sistema de regulación de altura (j) para realizar el ensayo en el punto óptimo. Esta posición se vigila a través de un reloj comparador digital (k) cuya lectura viene dada a través de un sistema de palancas que hay que calibrar.

## 5. FUENTES DE ERROR

Los instrumentos de medida y por lo tanto fuentes de error que aparecen en la máquina en la que se han realizado los ensayos afectan tanto al posicionamiento relativo de las ruedas como a la medida y su propagación hasta los parámetros finales de ensayo:

- **Encoder lineal encapsulado:** este instrumento determina la posición fija del sinfín en el momento del ensayo. Para poder realizar ensayos de diferentes engranajes esta posición es regulable y siempre está referenciada al “cero” máquina.
- **Palpador lineal:** es el elemento que registra el movimiento de vaivén de la columna y por lo tanto la variación de la distancia entre centros sin juego  $a$ ”. Además en la posición de columna retirada se encuentra el “cero” máquina para el ensayo.
- **Reloj comparador:** registra la posición en altura de la corona con respecto al sinfín.

En los tres casos hay que hacer una corrección experimental de las lecturas de dichos instrumentos midiendo y comparando diversos puntos con una MMC. Con esto se consigue eliminar las diferencias entre las posiciones reales y las lecturas debidas al error de coseno, por falta de paralelismo entre la dirección del instrumento y la del desplazamiento real (figura 6). Además en estas correcciones están incluidas otras fuentes de error como los diversos juegos existentes debido a las partes móviles y desmontables de la máquina.

En cualquier caso, se trata de instrumentos extremadamente sensibles a numerosas fuentes de error aún con ruedas de gran tamaño, por lo que este trabajo sienta las bases para la elaboración de un procedimiento estandarizado de verificación de este tipo de máquinas inexistente en la actualidad.

## 6. ENSAYOS Y RESULTADOS

Utilizando procedimientos habituales en calibración de máquinas de medir por coordenadas y máquinas herramienta [5,6] y siguiendo las recomendaciones para la verificación de máquinas de ensayos de rodadura a dos flancos [7], se alinean punto y contrapunto, se comprueba planitud y concentricidad del casquillo porta-coronas, y el paralelismo del eje del sinfín con la cara de referencia de la corona. A continuación se calibra la máquina corrigiendo las fuentes de error indicadas en el apartado anterior para después, y experimentalmente, caracterizar metrológicamente dicha máquina determinando su grado de repetibilidad.

### 6.1. Calibración

La calibración de la máquina se ha realizado utilizando un cilindro patrón en la posición del sinfín y el casquillo donde directamente se alojan las coronas a ensayar, cuyas superficies rectificadas tienen una rugosidad máxima de  $0,4 \mu\text{m}$ , es decir son de una calidad superficial N5. Tras medir dichos cilindros en la zona de contacto se obtiene como resultado:

- **Diámetro cilindro patrón sinfín:**  $41,8114 \pm 0,0003 \text{ mm}$
- **Diámetro casquillo corona:**  $74,9970 \pm 0,0001 \text{ mm}$

Por lo que la distancia entre centros cuando ambos elementos están en contacto es de:

$$D_{\text{centros}} = \frac{D_{\text{sinfín}} + D_{\text{corona}}}{2} = 58,4042 \quad (1)$$

Este valor (1) es fundamental para la calibración de la máquina. Partiendo del “cero” máquina, es decir con la columna en posición de bloqueo, se libera dando una nueva lectura. En ese momento se desplaza el sinfín hasta que haya contacto entre ambos de tal manera que ese es el punto de “Calibración Automática” (figura 6). En esta posición la distancia entre centros es de 58,4042 y la distancia del sinfín al origen la suma de este valor más la lectura corregida del palpador lineal ( $K_p$ ).

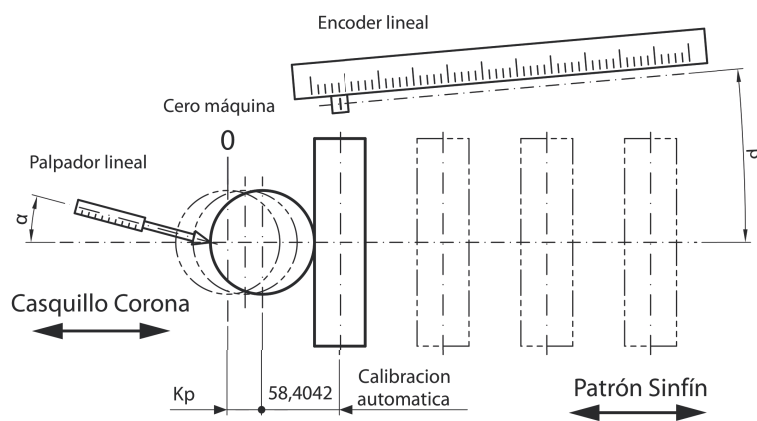


Figura 6. Esquema calibración

A partir del punto de calibración, se pueden determinar experimentalmente la corrección de las lecturas de los instrumentos de medida. Por un lado, partiendo de este punto y de manera incremental se va separando poco a poco el patrón sinfín de la columna, de 25 en 25 mm, comparando el valor de la lectura del encoder con el valor medido del sinfín en la MMC (figura 7). Esta corrección es importante porque determina el grado de precisión de la distancia entre centros a la hora de preparar la medida nominal antes de realizar un ensayo.

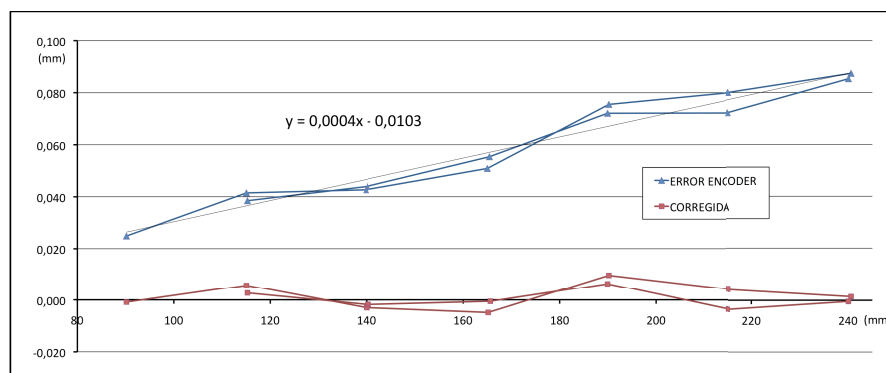


Figura 7. Medición y corrección encoder lineal (error distancia entre centros nominal)

Por otro lado, y también a partir del punto de Calibración Automática se va desplazando poco a poco el sinfín, de 0,4 en 0,4 mm, en dirección a la columna sin perder el contacto y prestando especial interés en la zona donde se aproxima al “cero” de máquina donde los desplazamientos se realizan de 0,2 en 0,2 mm. En este caso se compara el valor de lectura del palpador lineal con la posición del casquillo de la corona medido en la MMC (figura 8).

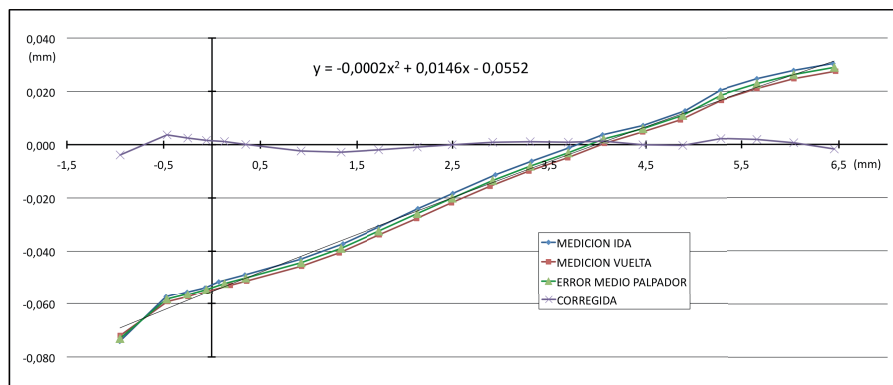


Figura 8. Medición y corrección palpador lineal (error distancia entre centros a fondo)

La corrección de la posición de altura del plano medio del dentado de la corona es independiente de las otras dos correcciones aunque se procede de una manera muy similar comparando las lecturas del reloj con las de la MMC (figura9). En este caso también se realiza pequeños desplazamientos, de 0,02 en 0,02 mm, en la dirección del eje de la corona (vertical) tanto hacia arriba como hacia abajo a partir de la posición nominal en altura en un rango total de unos 0,7 mm.

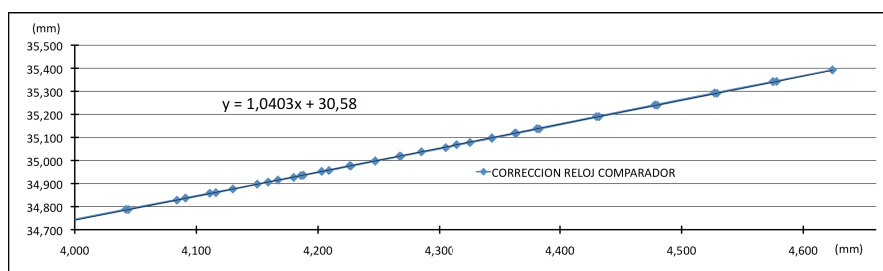


Figura 9. Medición y corrección reloj comparador (error de altura)

## 6.2. Caracterización metrológica

Actualmente existen normas que marcan los valores de tolerancias para evaluar la calidad de un engranaje [3,4]. En lo que se refiere a las normas tanto de ejecución de ensayos como de verificación de máquinas de rodadura solo existen como recomendaciones [1,2,7]. Sin embargo, no existe ningún procedimiento estándar de calibración para este tipo de máquinas, por lo que tampoco existen laboratorios acreditados capacitados para calibrar este tipo de dispositivos. Por ello se hace una primera propuesta para ir sentando poco a poco las bases de cara a un futuro procedimiento estándar.

Se propone repetir varias veces un ensayo tipo e ir modificando uno a uno los diferentes parámetros que puedan afectar al resultado. De esta manera se conocerá la influencia de cada uno de ellos sobre la repetibilidad de la máquina.

El procedimiento del ensayo tipo es el siguiente:

1. Montaje de la corona a verificar sobre la columna en su posición de bloqueo (retirada).
2. Aproximación del carro porta-sinfín hasta la medida nominal entre centros.
3. Desbloqueo de columna, con movimiento libre de vaivén, asegurando un engrane sin juego con ambos flancos en contacto donde la distancia entre centros es menor que la nominal.

4. Regulación de altura hasta la posición óptima del ensayo, donde la distancia real entre centros es mínima.
5. Comienzo ensayo.
6. Obtención de resultados de una vuelta completa de la corona a velocidad de régimen.

Comenzando por el ensayo tipo descrito se procede a la siguiente secuencia:

- **Ensayo básico:** se repite 10 veces el mismo ensayo sin cambiar ningún parámetro, ni posiciones de sinfín, ni de corona y ni de altura. Cada repetición se comienza desde el mismo punto (mismo diente) a la misma velocidad y sentido para evaluar siempre la misma rodadura (tabla 1).

<b>Ensayo básico</b>			
<b>Sinfín patrón</b>	Dp=50 Z=2 entradas	<b>Corona</b>	Dp=230 Z=55 dientes
<b>Dist. centros</b>	140	<b>Mod. normal</b>	4,1245
<b>Ang. presión</b>	20°	<b>Ang. hélice</b>	9,496
<b>Velocidad</b>	20 rpm	<b>Sentido</b>	Horario
<b>Ensayo</b>	<b>Fi" (µm)</b>	<b>Fr" (µm)</b>	<b>fi" (µm)</b>
1	67,7	38,7	31,7
...	...	...	...
10	65,7	38,6	31,0
<b>Media</b>	66,5	38,5	31,6
<b>Recorrido</b>	2,4	0,5	1,3
<b>Desv. Típica</b>	0,72	0,19	0,44

Tabla 1. Tabla ejemplo con los valores experimentales obtenidos en el Ensayo Básico

- **Retirar columna:** se repite 10 veces el ensayo básico pero retirando exclusivamente la columna a su posición de bloqueo para dejarla libre a continuación, en cada una de las repeticiones (tabla 2). El resto de parámetros no se modifican.
- **Desplazar carro portasinfin:** se repite 10 veces el ensayo básico pero desplazando exclusivamente el carro portasinfin separándolo del contacto con la corona, en cada una de las repeticiones (tabla 2). El resto de parámetros no se modifican.
- **Desplazar ambos:** se repite 10 veces el ensayo básico combinando los dos ensayos anteriores, es decir retirando la columna y además desplazando el carro portasinfin, dejando ambos en el mismo sitio antes de comenzar la siguiente repetición (tabla 2). El resto de parámetros no se modifican.
- **Variar altura:** se repite 10 veces el ensayo básico modificando la altura de la corona y volviéndola a dejar en la misma posición antes de cada repetición (tabla 2). El resto de parámetros no se modifican.
- **Desmontar corona:** se repite 10 veces el ensayo básico desmontando y montando la corona cada vez. El resto de parámetros no se modifican (tabla 2).
- **Desmontaje sinfín:** se repite 10 veces el ensayo básico desmontado y montando cada vez el sinfín patrón (tabla 2). El resto de parámetros no se modifican.
- **Reinicio máquina:** se repite 10 veces el ensayo básico reiniciando la máquina en cada una de las repeticiones (tabla 2).

<b>Retirar columna</b>			
<b>Media</b>	62,1	37,8	31,8
<b>Recorrido</b>	3,7	2,6	0,8
<b>Desv. Típica</b>	1,26	0,85	0,34
<b>Desplazar carro portasinfin</b>			
<b>Media</b>	62,1	37,5	32,3
<b>Recorrido</b>	2,0	2,3	1,3
<b>Desv. Típica</b>	0,68	0,73	0,42

<b>Desplazar ambos</b>			
<b>Media</b>	62,6	38,4	32,2
<b>Recorrido</b>	2,2	2,4	0,9
<b>Desv. Típica</b>	0,85	0,89	0,38
<b>Variar altura</b>			
<b>Media</b>	68,6	36,4	32,1
<b>Recorrido</b>	2,3	2,0	0,9
<b>Desv. Típica</b>	1,06	0,85	0,41
<b>Desmontar corona</b>			
<b>Media</b>	70,3	42,4	33,5
<b>Recorrido</b>	11,7	12,1	2,1
<b>Desv. Típica</b>	4,18	4,1	0,79
<b>Desmontar sinfin</b>			
<b>Media</b>	70,6	39,5	34,7
<b>Recorrido</b>	10,6	9,5	4,3
<b>Desv. Típica</b>	4,25	3,8	1,44
<b>Reinicio máquina</b>			
<b>Media</b>	63,0	38,6	32,9
<b>Recorrido</b>	1,3	2,8	1,0
<b>Desv. Típica</b>	0,47	0,88	0,35

Tabla 2. Resumen ensayos

## 7. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado la calibración y caracterización metrológica experimental de una máquina de ensayos de rodadura a dos flancos para engranajes sinfin-corona tras haberle realizado un retrofit, donde se han analizado las diversas fuentes de error que afectan tanto al posicionamiento relativo de las ruedas como a la medida y su propagación hasta los parámetros finales de ensayo.

Se comprueba que los ensayos estáticos tienen un alto grado de repetibilidad aunque debido al número tan elevado de influencias existen oscilaciones en los resultados. Además el orden de magnitud que se maneja es tan pequeño (micrómetros) que por ello es crítico determinar la incertidumbre global de la máquina ya que cualquier pequeña variación podría significar un salto de una calidad a otra verificando el mismo engranaje.

Al no existir un procedimiento estandarizado de verificación de este tipo de máquinas tampoco existen laboratorios acreditados para calibrar estos dispositivos. Esto implica la necesidad de desarrollar un procedimiento de calibración trazable y eficiente que permita a un laboratorio establecer la incertidumbre de medida, tan crítica por otro lado, de un determinado equipo con referencia a patrones nacionales.

## 8. REFERENCIAS

- [1] AGMA 915-1-A02 *Inspection Practices - Part 1: Cylindrical Gears - Tangential Measurements.*
- [2] AGMA 915-2-A05 *Inspection Practices - Part 2: Cylindrical Gears - Radial Measurements.*
- [3] ISO 1328, *Cylindrical gears - ISO system of accuracy. Part 1, 1995-02 / Part 2, 1997-08.*
- [4] DIN 3963 *Tolerances for cylindrical gear teeth-Tolerances for working deviations.*
- [5] W. Knapp. *Measurement uncertainty and machine tool testing*, Annals of the CIRP, vol. 51 n° 1 (2002), 459-462.
- [6] H. Kunzmann, E. Trapet, F. Wäldele. *An uniform concept for Calibration, Acceptance Test, and Periodic Coordinate Measuring Machines Using Reference Objects*, Annals of the CIRP, vol. 39 n° 1 (1990), 561-564.
- [7] AGMA 935-A05 *Recommendations Relative to the Evaluation of Radial Composite Gear Double Flank Testers.*