CAPÍTULO VIII:
CALIBRACIÓN DE HERRAMIENTAS DINAMOMÉTRICAS MANUALES

8.1.-INTRODUCCIÓN.-

En el presente capítulo se presenta aquella información que se considera más relevante en lo que a la puesta en marcha del Sistema de Calibración de Llaves Dinamométricas se refiere.

Decir que en el momento de la redacción de la presente memoria todavía no se ha decidido, si a efectos internos del Laboratorio (Archivo de la Documentación del plan de calibración del Laboratorio) se incluirá dicho sistema como parte integrante del Laboratorio de Fuerza o bien constituirá una unidad independiente (Laboratorio de Momentos) debido a que en su seno solo alberga un tipo de servicio: la calibración de herramientas dinamométricas manuales, comúnmente denominadas como *llaves dinamométricas*.

En consecuencia, en el seno del trabajo de puesta en marcha del Laboratorio se ha elaborado un único procedimiento, denominado como:

- *PEAM XX: Calibración de Llaves Dinamométricas*.

Y una Hoja de Cálculo en Microsoft Excel que realiza todos los cálculos en base a las prescripciones contempladas en dicho procedimiento, denominada como:

- *HC Llaves Dinamométricas* .

8.2.-MAGNITUD MOMENTO.-

Como sabemos, un momento o par se define como el producto de una fuerza tangencial por la distancia entre su punto de aplicación y un centro de rotación. Su unidad en el sistema de internacional de unidades (SI) es el Newton por metro (N·m).

Lamentablemente es frecuente el uso de otras unidades distintas a las del Sistema Internacional, en las herramientas dinamométricas manuales, como son el Kilogramo-fuerza por metro (Kgf m) o el pie por libra (ft lb).

La medida de pares tiene especial interés en el caso de los aprietes tornillo-tuerca, ya que es el par de apriete el que origina la tensión a la que finalmente se verán sometidos el tornillo y la tuerca y, en trabajos de precisión o de seguridad debe ser calculado para impedir que ambas piezas se aflojen, ya que si el valor de dicho par de apriete es inferior al necesario podría soltarse la tuerca por el simple efecto de las vibraciones. De la misma forma si dicho valor es superior al necesario se estaría sobrecargando el tornillo pudiendo incluso a llegar hasta la rotura.

8.3.-HERRAMIENTAS DINAMOMÉTRICAS MANUALES.-

Es por esto por lo que en los talleres de montaje es frecuente encontrarse con herramientas dinamométricas manuales cuya función es controlar el par de apriete proporcionado a una unión tuerca-tornillo en base a las especificaciones de montaje.

Existen multitud de llaves dinamométricas en cuanto a su tipología y principio de medida sin embargo decir que la primera gran clasificación es dividirlas en llaves dinamométricas de disparo y de lectura directa:

- Llaves dinamométricas de Disparo: En ellas se fija previamente el par que se desea aplicar de forma que cuando se alcanza el mismo emite una señal ya sea sonora, lumínica o ambas.
- Llaves dinamométricas de Lectura Directa: Estas llaves indican en todo momento el par de apriete que se está ejerciendo a través de un dispositivo indicador, ya sea analógico o digital.

Una clasificación y descripción más amplia puede observarse en la norma UNE-EN 26789, clasificación que se ha seguido en el procedimiento *PEAM XX: Calibración de llaves dinamométricas* elaborado por el alumno, a la hora de codificar las llaves, tan sólo proporcionamos el esquema de tres de llaves clasificadas en base a dicho criterio:

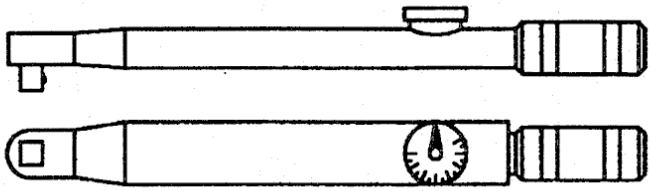

Figura 37.1: Llave dinamométrica de Lectura directa
De caja rígida y escala graduada analógica
Tipo 1 Modelo B

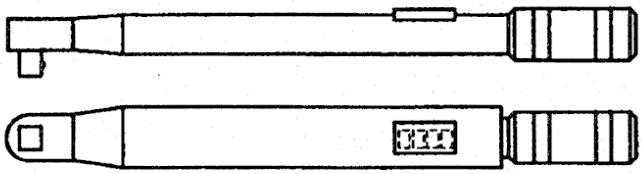

Figura 37.2 : Llave dinamométrica de Lectura directa
De caja rígida con indicaciones digitales
Tipo 1 Modelo C

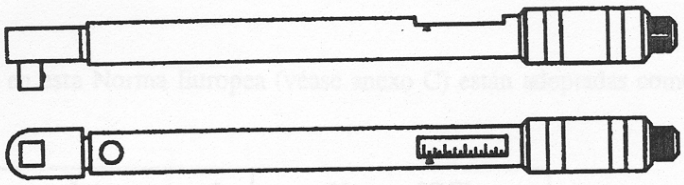

Figura 37.3 : Llave dinamométrica de disparo
Regulable y con escala graduada
Tipo 2 Modelo A

En este sentido, decir que el procedimiento elaborado *PEAM XX: Calibración de llaves dinamométricas* contempla la calibración de todos los tipos de llaves dinamométricas comentados, así como la calibración de un tipo de llave dinamométrica especial: *Las llaves dinamométricas en indicación de ángulo de giro; s*e tratan estas de un tipo de llaves dinamométricas cuyo funcionamiento es el siguiente:

Los valores de par de aplicación y ángulo de giro deseados, se introducen directamente en la llave, al alcanzar el valor de par ajustado cambia el display automáticamente a indicación angular y posteriormente cuando alcanza el ángulo de giro ajustado se emite una señal acústica y / o óptica.

Figura 38: Llave dinamométrica de indicación de ángulo

Este funcionamiento se justifica en el hecho de que, en algunas uniones, se especifica que tras un par determinado se debe girar el tornillo un ángulo concreto para alcanzar el grado de ajuste deseado. Este tipo de especificaciones se suelen dar en la industria aeronáutica por ejemplo, donde se requiere una gran precisión y control.

8.4.-SISTEMA DE CALIBRACIÓN DE LLAVES DINAMOMÉTRICAS. -

Para la calibración de estas llaves dinamométricas el laboratorio cuenta con los siguientes equipos:

- Banco de ensayo de calibración de llaves dinamométricas: Se trata del soporte donde se conectan las llaves dinamométricas a calibrar así como alguno de los cuatro transductores patrones de par a escoger en consonancia con el alcance de la llave a calibrar. Dispone de un volante con maneral para la aplicación del par de forma que la llave a calibrar se encuentra en todo momento inmóvil en su posición de fijación mientras gira una plataforma sobre la que el transductor de par correspondiente se fija y con la que este gira solidariamente.
- Transductores de par patrones: El Laboratorio dispone de un total de 4 transductores de par patrones con alcances máximos distribuidos a lo largo del rango de trabajo del sistema, concretamente de 50, 200, 500 y 1500 N.m. Se trata de transductores basados en galgas extensiométricas cuyo principio físico se trató en el apartado 4.5, por tanto, la medida del par de torsión transmitido por un eje se realiza pegando sobre el mismo 4 bandas extensiométricas, las cuales forman las cuatro ramas de un puente de Wheatstone, con la particularidad que dichas bandas están, en el caso de los torcómetros, colocadas sobre 2 planos oblicuos normales entre sí y que forman ángulos de 45º con la sección recta, tal y como se muestra la figura.

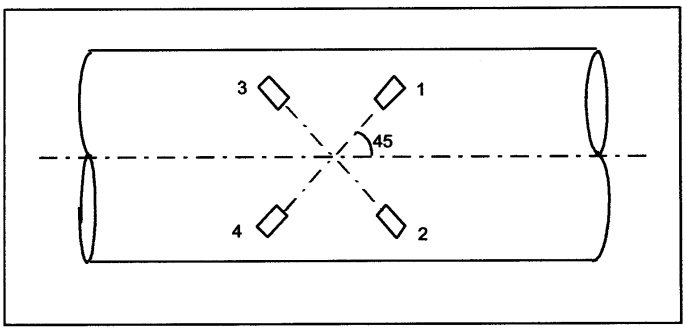

Figura 39: Esquema de la medida de pares de torsión mediante galgas

La calibración de estos transductores de par patrones se realiza en un laboratorio de referencia, y como posteriormente se abordará, se ha necesitado de un análisis previo de dichos resultados.

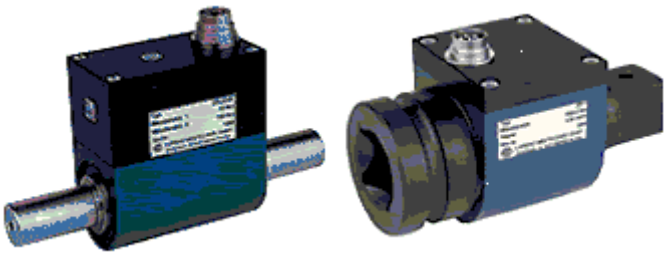

Figura 40 : Transductores de par patrones.

- Unidad de tratamiento y visualización: La señal de esos transductores de par, será tratada en un dispositivo de amplificación, tratamiento e indicación de la misma, y será la señal que será tomada como señal patrón en las calibraciones.

Es decir, los elementos que forma parte de este sistema para la calibración de la indicación de par en las herramientas dinamométricas manuales se corresponden con lo que se definió como estructura básica de una cadena de medida (figura 8) en la que el tratamiento y la visualización de la señal se realizan en un único dispositivo y se dispone de un juego de 4 elementos transductores que se acoplan en el sistema en función de las necesidades, tal y como se muestra en la siguiente figura:

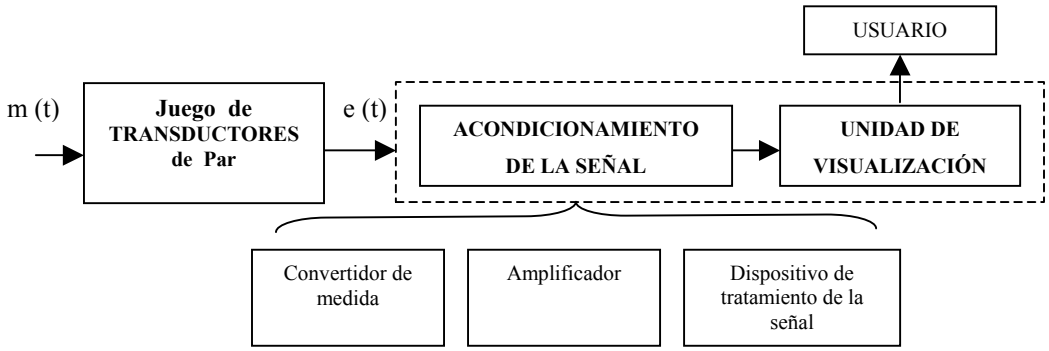

Figura 41:.Esquema del sistema de calibración de llaves dinamométricas

8.5.-ANÁLISIS DE LOS TRANSDUCTORES DE PAR PATRONES.

8.5.1.- Resultados de la calibración externa.-

Como decimos los 4 transductores de par se encuentran calibrados cada uno de ellos de forma conjunta con el dispositivo indicador, por un laboratorio externo, de forma que la utilización de los mismos está condicionada por dicha calibración y como es lógico, se han de tener en cuenta los puntos de calibración, las incertidumbres y las correcciones proporcionados en sus certificados, es decir se hizo necesario un análisis previo de los resultados proporcionados por el laboratorio de referencia.

Tal y como se expone en el procedimiento específico *PEAM XX: Calibración de Llaves dinamométricas, el rango de trabajo de cada transductor se ve disminuido en aquellos valores de par que, en primera instancia, puedan ser calibrados por dos transductores de par, de forma que se escojan aquellos puntos que den una menor incertidumbre debida al ajuste por el método de los mínimos cuadrados*.

Para justificar esta decisión, primeramente proporcionamos los resultados de la calibración de los transductores de par realizados, como decimos, en un laboratorio externo:

Transductor patrón de par de 0 Nm a 50 Nm

Momento Patrón (Nm)	Corrección (Nm)	Incertidumbre para el cálculo (Nm)	k	Incertidumbre Expandida (Nm)
8,583	0,005	0,011	2	0,022
17,399	-0,032	0,025	2	0,05
26,217	-0,053	0,035	2	0,07
35,033	-0,084	0,045	2	0,09
48,259	-0,133	0,060	2	0,12

Transductor patrón de par de 0 Nm a 200 Nm

Momento Patrón (Nm)	Corrección (Nm)	Incertidumbre para el cálculo (Nm)	k	Incertidumbre Expandida (Nm)
33,943	-0,004	0,039	2,28	0,09
53,543	-0,040	0,070	2	0,14
82,942	-0,073	0,089	2,37	0,21
131,941	-0,236	0,165	2	0,33
188,78	-0,374	0,240	2	0,48

Transductor patrón de par de 0 Nm a 500 Nm

Momento Patrón (Nm)	Corrección (Nm)	Incertidumbre para el cálculo (Nm)	k	Incertidumbre Expandida (Nm)
53,543	0,22	0,061	2,28	0,14
131,941	-0,46	0,145	2,28	0,33
229,939	-0,53	0,282	2,13	0,6
327,937	-1,01	0,410	2	0,82
474,933	-1,68	0,600	2	1,2

Transductor patrón de par de 0 Nm a 1500 Nm

Momento Patrón (Nm)	Corrección (Nm)	Incertidumbre para el cálculo (Nm)	k	Incertidumbre Expandida (Nm)
151,66	0,2	0,151	2,65	0,4
372,16	-0,44	0,469	2,13	1
739,65	-0,55	1,000	2	2
1107,14	-0,4	1,500	2	3
1401,13	-0,16	2,000	2	4

De la simple observación de estos resultados, se pueden realizar dos observaciones:

- La primera de ellas es que para tratarse de equipos patrones, el nº de puntos de calibración es escaso, lo recomendable según la experiencia acumulada por el alumno durante su periodo de prácticas, es que los equipos patrones (cualquiera que sea su tipología) se encuentren calibrados en al menos 8 puntos de cara a facilitar el cálculo del polinomio de ajuste para poder corregir sus indicaciones en cualquier punto dentro de su rango de medida y que el error introducido por este no aumente la incertidumbre de manera excesiva.
- La segunda es que por motivos ajenos al Laboratorio el primero de los 5 puntos en los que se encuentra calibrado cada transductor patrón de par se desvía de lo que es la pauta de comportamiento del equipo en los 4 puntos siguientes.

8.5.2.-Incertidumbre debida al ajuste de los valores de corrección.-

En efecto, si se calcula la curva de ajuste Momentos-Corrección (usando para ello el método de los mínimos cuadrados) utilizando los 5 puntos calibrados, se observa que el error del ajuste es superior al error que se obtiene eliminando el primero de ellos.

Para analizar esta afirmación debemos saber que, obviamente, el valor de la señal indicada por el módulo indicador debe ser corregida con el valor de la corrección correspondiente al valor de par de cada transductor, para obtener el valor patrón durante las calibraciones de las llaves dinamométricas, es decir:

$$M_{p,i} = M_{ind,i} + C_{p,i}$$

Donde:

- $M_{p,i}$: es el momento patrón, valor de referencia en las calibraciones de llaves dinamométricas en el punto ensayado *"i"*
- $M_{ind,i}$: es el momento indicado por el dispositivo de visualización y tratamiento de la señal, en el punto ensayado *"i"*
- C_{pi} : es la corrección del patrón para cada carga "*i"* indicada en el certificado de calibración correspondiente.

Por ejemplo:

En el caso hipotético que en un punto de calibración, la señal indicada[14] *por el dispositivo de visualización fuera de 131,941 N.m (utilizando como patrón el transductor de 0 Nm a 200 Nm) el valor que debe ser utilizado como señal patrón sería:*

$$M_{p,i} = M_{ind,i} + C_{p,i} = 131{,}941\ Nm + (-0{,}236\ Nm) = 131{,}705\ Nm$$

Sin embargo, como decimos, este es un caso hipotético, pues lo normal es que el valor indicado no coincidirá con ninguno de los puntos en los que cada transductor patrón se encuentra calibrado. En este sentido, era práctica habitual del laboratorio el utilizar la corrección indicada en el certificado para el valor más próximo del intervalo de valores a los que pertenecía el valor M_{ind}, es decir si este valor indicado era, por ejemplo, 145 Nm se utilizaba el valor de corrección $C_{p,i}$=*-0,236 Nm* por ser este el valor de corrección correspondiente al punto más cercano de los dos puntos extremos del intervalo de puntos calibrados a los que pertenece [131,941;188,780].

Esta forma de escoger la corrección del patrón se sustituye ahora, puesto que la corrección indicada en el certificado de calibración del instrumento de medida no es más que la cuantificación del *comportamiento* del mismo, lo lógico es utilizar un valor de corrección intermedio a los correspondientes valores extremos de momentos del intervalo

[14] En realidad tal y como se puede apreciar en el *PEAM XX: Calibración de Llaves Dinamométricas* se trata de la media de las 10 repeticiones efectuadas en un punto de calibración

de puntos calibrados a los que pertenece, de forma que el valor utilizado para la corrección será el proporcionado por un polinomio de ajuste, calculado por el método de los mínimos cuadrados, de la forma:

$$C_a = A + B*M + C*M^2 + D*M^3$$

Donde:

- M: son los valores de momento para los que se pretende ajustar la corrección.
- C_a: es la corrección ajustada proporcionada por el polinomio de ajuste.
- A ,B, C y D: son los coeficientes del polinomio de ajuste que variarán en función del transductor patrón.

Existirán pues un total de 4 curvas de ajuste, una por cada transductor patrón de par. Este hecho provoca que tenga que ser considerada una nueva incertidumbre, que deberá ser añadida a la incertidumbre indicada en el certificado de calibración de cada transductor patrón, se trata de la incertidumbre debida al error que se comete al realizar esta interpolación.

Este error se calcula, para cada valor de momento, de la siguiente forma:

$$e_{a,i} = \left| C_{certif,i} - C_{ajuste,i} \right|$$

donde:

- $e_{a,i}$: Error absoluto de la curva de ajuste en cada fuerza calibrada "*i*".
- $C_{certif,i}$: Valor de corrección para cada carga *"i"* calibrada del certificado de calibración de cada transductor de par.
- $C_{ajuste,i}$: Valor de corrección ajustado por el polinomio de ajuste.

La incertidumbre típica derivada del ajuste (u_a), se calculará considerando que dicho error constituye el semi-intervalo de variación máxima, asignándole una distribución de probabilidad rectangular, la más apropiada para estos casos, tal y como se explicó en el apartado *3.4.2.2: Evaluación "tipo B" de la incertidumbre típica"*.

$$u_a = \frac{e_{a,i}}{\sqrt{3}}$$

8.5.3.-Reducción de los rangos de trabajo de los transductores de par.-

Con estas premisas se realizó un análisis, en el que se observó que, a excepción del transductor de menor alcance (50 Nm), la eliminación del primero de los 5 puntos en los que cada transductor se encontraba calibrado, para el cálculo del polinomio, disminuía el error del ajuste considerablemente, y por consecuencia la incertidumbre

asociada al mismo. Ante este hecho, el alumno decide disminuir el rango de trabajo de los tres transductores restantes eliminando dicho punto ya que:

- Se trata de puntos pertenecientes a la zona de solape existente entre dos transductores con alcances consecutivos, con lo que no se disminuye el rango de trabajo global del sistema, pues cuando en una calibración se requieran mediciones en esos puntos, se podrá utilizar el transductor de menor alcance.
- La anterior circunstancia puede provocar que durante la calibración de una llave dinamométrica, sea necesario el uso de más de un transductor patrón, sin embargo, este hecho no plantea excesivas dificultades, pues la sustitución del transductor patrón no implica inconvenientes que injustifiquen esa decisión, debido al escaso tiempo necesario y la facilidad de montaje que presentan.

A continuación, proporcionamos, los resultados de este análisis para el caso del transductor de 500 N·m:

Momento Patrón (Nm)	Corrección (Nm)	C_a	e_a	**Incertidumbre de corrección u_a (N·m)**	Incertidumbre para el cálculo u (Nm)	%[15]
53,543	0,22	0,180692	0,0393	0,022694402	0,061	36,9595
131,941	-0,46	-0,338305	0,1216	0,070260163	0,145	48,5434
229,939	-0,53	-0,681446	0,1514	0,087437645	0,282	31,0404
327,937	-1,01	-0,928874	0,0811	0,046837762	0,410	11,4238
474,933	-1,68	-1,692083	0,0120	0,006976679	0,600	1,1628
$C_a = 0{,}735204-0{,}0121995*M+0{,}0000369005*M^2-0{,}0000000462693*M^3$						

Tabla 1: resultados del ajuste con 5 puntos

Como se observa, existe un error muy grande en el rango de 130 y 230 N·m, de hecho la incertidumbre debida a la corrección (u_a) representa un tanto por ciento muy elevado de la incertidumbre típica indicada en el certificado (incertidumbre para el cálculo).

Si eliminamos el valor de 53,543 N·m del rango de trabajo de dicho transductor observamos que dicha incertidumbre es mucho más baja y el ajuste dado por el polinomio es por tanto mas eficiente:

[15] Los valores de esta columna representan el % que representa u_a con respecto a la incertidumbre propia del patrón.

Momento Patrón (Nm)	Corrección (Nm)	C_a	e_a	**Incertidumbre de corrección u_a(N·m)**	Incertidumbre para el cálculo u (Nm)	%
131,941	-0,46	-0,45999	-8,15E-06	0,000005	0,145	0,0033
229,939	-0,53	-0,52999	-1,24E-05	0,000007	0,282	0,0025
327,937	-1,01	-1,00998	-1,68E-05	0,000010	0,410	0,0024
474,933	-1,68	-1,67998	-2,40E-05	0,000014	0,600	0,0023
$C_a = -1{,}67281+0{,}0168874*M-0{,}000067069*M^2+0{,}0000000662826*M^3$						

Tabla 2: resultados del ajuste con 4 puntos

Los resultados completos, referentes a los 4 transductores se incluyen en la hoja de cálculo: *HC Llaves dinamométricas*.

El resultado final de este análisis es como decimos, la reducción particular del rango de trabajo de cada uno de los transductores de par, sin que quede mermado el rango de trabajo global del sistema, teniendo en cuenta que estos resultados, tan sólo son válidos para los datos suministrados en los certificados de calibración de los transductores patrones. Cuando se proceda a la recalibración de los mismos, será necesario volver a realizar el mismo análisis con los nuevos valores proporcionados, teniendo en cuenta que en determinados casos, se permitirá el cálculo de dicho polinomio con un total de "n-1" puntos de calibración, siempre y cuando concurran las ya mencionadas dos siguientes circunstancias:

1. Que la eliminación de alguno de los puntos disminuya la incertidumbre debida al ajuste por el método de los mínimos cuadrados.
2. Que el punto eliminado se encuentre en la zona de solapamiento entre dos transductores con alcances máximos consecutivos.