

Informe 02 **Lab** de Máquinas: Mediciones y el desarme del MCI

Felipe Trujillo Preuss

Escuela de Ingeniería Mecánica

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

felipe.trujillo.p@mail.pucv.cl

25 de septiembre de 2020

1. Introducción

En este informe se ejecuta un reconocimiento de los principales componentes y piezas de un motor de combustión interna (MCI) y la diferenciación existente entre el Motor de encendido por chispa (MECH) y el Motor de encendido por compresión (MEC) a través de inspección visual en cortes transversales y conocimiento adquirido de cursos anteriores.

Se efectúa un balance característico entre un MCI y un motor eléctrico (ME) para evidenciar las virtudes o defectos de cada uno, estableciendo que su mezcla constituida en una hibridación permite obtener lo mejor de ambos mundos. Posteriormente se describen en extenso los anillos que posee un pistón, la ovalidad presente en el pistón, el rol que posee un eje de leva, eje cigüeñal, alternador, motor de arranque y embrague. Adicionalmente se describe en que consiste la rectificación de metales como medida para extender el ciclo de vida del motor.

Por último, se plantea la medición del motor Deutz F3L912 con el objetivo de comparar los valores indicados por el fabricante con los obtenidos en el laboratorio y determinar las causas atribuidas a dicho fenómeno de cálculo.

2. Comparación entre MECH y MEC

Las diferencias apreciables en ambos motores radican en el proceso de combustión que se lleva a cabo: el MECH requiere de bujías que con una chispa permiten la ignición de la mezcla aire-combustible en el proceso de compresión dentro del cilindro, en cambio, el MEC utiliza un inyector de combustible que expulsa un chorro en cantidad necesaria para la temperatura y presión altas dadas por el aire en un proceso de compresión similar. A partir de esta discordia, se evidencia la inclusión de un carburador en el MECH encargado de preparar la mezcla de aire-combustible y un distribuidor que suministra la corriente eléctrica hacia las bujías. Por parte del MEC, posee acoplada una bomba de inyección de combustible y componentes más especializados para el tratamiento del aceite lubricante.

A partir de estas diferencias esenciales originadas por la configuración arraigada a la combustión, surgen otros dispositivos en función a aquello, como puede ser una conexión por engrane entre el distribuidor y la bomba de aceite en el MECH, entre otros. Son estos dispositivos acoplados los que conforman al MEC como un motor de mayor peso y tamaño. Este tamaño está asociado a la relación biela-manivela, que involucra la relación entre el largo y el radio que forma este mecanismo. A su vez, se relaciona con la relación de compresión, la cual es bastante mayor para el MEC (de 12 a 23) con respecto al MECH (de 7 a 10).

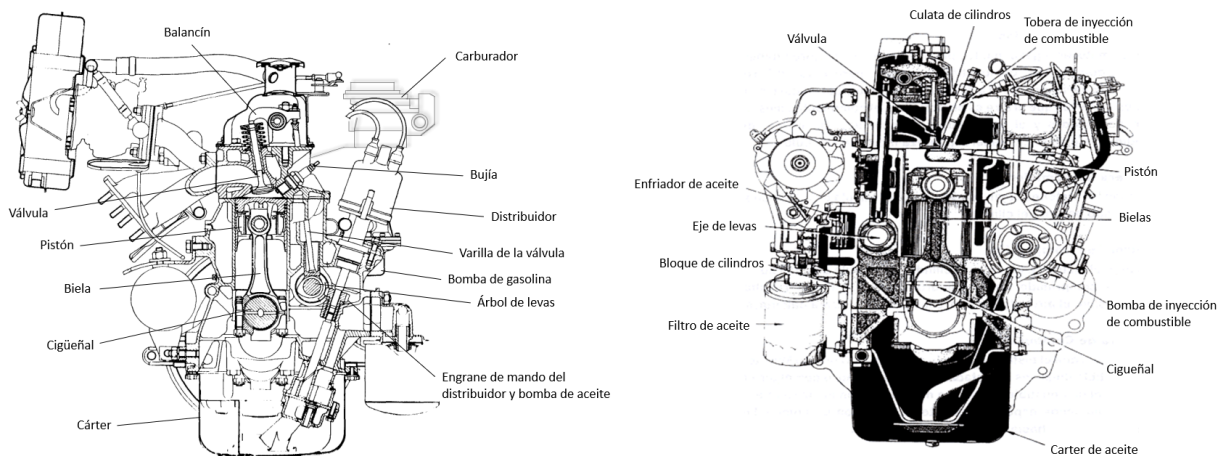


Figura 1: Corte transversal de un MECH (izquierda) y de un MEC (derecha)

3. MCI (Motor a Combustión Interna) vs ME (Motor Eléctrico)

| Tabla N°1: Estado de ventaja (✓) o desventaja (X) de un MCI vs ME en 2020 | | |
|---|-----|----|
| Comportamiento ideal | MCI | ME |
| 1. Presenta menor cantidad de fallas y mantenimiento | X | ✓ |
| 2. Posee un mayor rendimiento a velocidades altas | ✓ | X |
| 3. Requiere una menor disipación de calor | X | ✓ |
| 4. Menor peso | ✓ | X |
| 5. Menor tiempo de carga de combustible | ✓ | X |
| 6. Mayor economía de combustible (- costo) | X | ✓ |
| 7. Mejor manejo de emisiones | X | ✓ |
| 8. Mejor eficiencia de transmisión (velocidad y torque) | X | ✓ |
| 9. Aceleración desde velocidad mínima | X | ✓ |
| 10. Fiabilidad (menor cantidad de partes móviles) | X | ✓ |
| 11. Estabilidad: provee torque positivo o negativo | X | ✓ |
| 12. Mayor densidad energética del combustible | ✓ | X |

< 1, 10 > El ME posee menor cantidad de partes móviles y su funcionamiento es más simple que un MCI, por ello requiere menor mantenimiento. No es necesario que tenga caja de cambios de múltiples etapas: una caja de un solo paso es suficiente para su propulsión. Ahora bien, aunque posea menor cantidad de partes, son complejas de intervenir debido a los elementos electrónicos que posee y se requiere de un especialista. El MCI exige cambios frecuentes de aceite o componentes de respuesta, los cuales no constituyen una inversión alta. Por otra parte, el ME requiere de una nueva batería cada cierta cantidad de años dependiendo del fabricante y esto si se establece como una inversión alta. En síntesis, conformando una mirada a largo plazo, el ME es ventajoso por sobre el MCI en cuanto a su menor número de fallas a lo largo de un ciclo de vida que puede ser mayor al del MCI.

< 2, 8 > La mayoría de los ME vienen con una caja de cambios para aumentar las RPM del eje motriz, que según su funcionamiento (velocidad y torque), poseen una eficiencia global entre 75 y 95 % [1]. Vale

decir, para la misma cantidad de potencia al volante, se utiliza menos energía de la batería de alto voltaje en comparación a otros motores. La eficiencia típica de transmisión de un MCI bordea entre los 18 y 24 %, entonces para la misma cantidad de potencia deben consumir hasta 4 veces más energía que un ME. Esto no desmerece que un MCI tiene un rendimiento superior a velocidades más altas, debido a una mayor potencia de salida una vez que el motor está en movimiento, justificado en la alta densidad energética del combustible.

< 3 > Un MCI genera un exceso de calor que requiere dispositivos como ventiladores, bombas de fluido refrigerante, entre otros. Si bien el ME también debe lidiar con la disipación de calor requiere de una cantidad menor de inversión en el acoplamiento de dispositivos, ya que la magnitud de ese calor de desecho es considerablemente menor.

< 4 > Las baterías utilizadas en un ME deben unirse en paquetes para proporcionar la energía necesaria y esto constituye un gran peso, por ejemplo, el paquete de baterías de ion-litio de un Tesla Roadster pesa unos 453,6 [kg] constituyendo un tercio del total del vehículo, reduciendo la autonomía y eficiencia del consumo. En cambio, un MCI puede contener la misma cantidad de energía disponible en un espacio más reducido, como puede ser un estanque de combustible líquido.

< 5,6 > El tiempo de recarga de la batería de un ME es uno de los mayores inconvenientes que posee: demora entre 30 minutos a 8 horas dependiendo del régimen de carga, en comparación un MCI demora en promedio alrededor de 5 minutos en cargar el estanque completo, radicando en una mejor disponibilidad y autonomía. Por otra parte, el costo de la energía eléctrica es menor.

< 7 > Los ME tienen cero emisiones de gases de escape. Dependiendo de la fuente de energía eléctrica, el impacto general de CO₂ que posee es el menor de todos los motores existentes. En cambio, los MCI están sujetos a limitaciones normativas en sus emisiones.

< 9 > Un ME síncrono de imanes permanentes es capaz de entregar el máximo torque a velocidad cero, lo que se traduce en muy buenas capacidades de aceleración. Un MCI no puede entregar el par máximo desde la velocidad mínima (ralentí) y requiere de mayor tiempo para ello debido a la dinámica del motor relacionada a la inercia.

< 11 > Para un ME acoplado a tracción en las cuatro ruedas (AWD), la estabilidad es mejorada debido a su control en el torque. En comparación a un MCI, un ME tiene una respuesta de par motor más rápida y también puede proporcionar un par negativo. El MCI acoplado a un sistema de control electrónico de estabilidad (ESC) sólo es capaz de reducir la cantidad de torque entregado por el motor en un tiempo de respuesta considerable.

< 12 > Actualmente, la densidad energética de la gasolina convencional es aproximadamente 100 veces mayor que la de una batería de litio [2] y aunque la mejorada eficiencia en la transmisión compensa en cierta medida esta limitación en un ME, aún es evidente la desventaja que posee en comparación al MCI. Esto posee un impacto directo en la autonomía del vehículo, de hecho, en ambientes de baja temperatura se degrada la energía contenida en una batería y es requerido el uso de dispositivos calefacción, entre otras limitantes.

4. Anillos en un pistón MCI

Los anillos del pistón poseen tres funciones principales: sellar la cámara de combustión, transferir calor desde el pistón hacia las paredes del cilindro y controlar el flujo de aceite [3]. A partir de ello, convencionalmente se implementan tres anillos: dos de compresión y uno para el aceite. El anillo superior de compresión sella el espacio entre el pistón y el cilindro para retener la presión del gas y minimizar el escape. El segundo anillo, a veces llamado rascador de aceite, controla la cantidad de aceite en el revestimiento por encima de él para que el anillo superior esté lubricado adecuadamente. El anillo inferior controla el flujo de aceite bruto, ya que hay mucho aceite debajo de este anillo, a diferencia del rascador que realiza el control fino del aceite que queda en la camisa a medida que el pistón y sus anillos se mueven hacia abajo del cilindro. La parte posterior de la ranura del anillo de control de aceite tiene orificios para que el exceso de aceite pueda regresar al cárter.

Se emplean muchos diseños en los anillos de compresión, las diferencias entre ellos se encuentran en las formas de su sección transversal y su aplicabilidad de tratamientos superficiales resistentes al desgaste. Los anillos de compresión superiores (1ero y 2do) generalmente están hechos de hierro fundido nodular, con una excelente resistencia a la corrosión y al calor debido a su estructura, son de sección rectangular con bordes interior y exterior achaflanado para evitar que se peguen en la ranura, también reducen el ancho radial de la parte

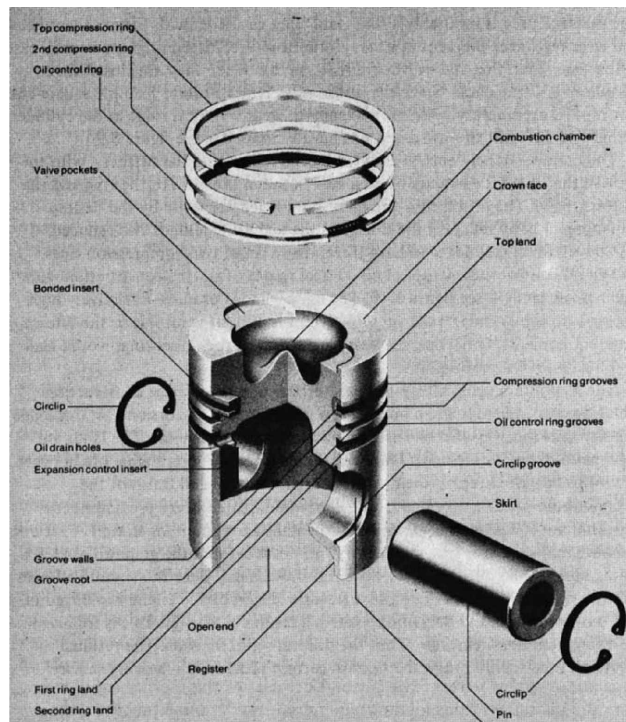


Figura 2: Ensamblaje de anillos en un pistón GKN Engine Parts Division [3]

superior y hace que su rigidez en esta parte superior sea menor que en la inferior. Adicionalmente posee una superficie de trabajo en forma de barril que puede acomodar la rotación del pistón. Los recubrimientos resistentes al desgaste corresponden a una capa de cromo duro con nitruro o una incrustación de molibdeno [4]. Generalmente se aplican a la superficie exterior.

Con respecto al anillo aceitero, generalmente consiste en dos piezas de hierro fundido o acero perfilado y un resorte helicoidal que actúa alrededor de toda la circunferencia para mantener la presión y el contacto.

El esfuerzo presente en todos los anillos del pistón los mantiene contra la pared del cilindro y las deformaciones del diámetro interior del cilindro requieren una alta adaptabilidad del anillo. La presión del gas detrás de los anillos de compresión aumenta esta fuerza radial. Todos estos factores contribuyen a la fricción del conjunto del pistón. Las presiones de gas detrás del segundo anillo son sustancialmente más bajas que detrás del primer anillo ya que las presiones de gas detrás de los anillos están función de la carga del motor. Por ello los tres anillos contribuyen significativamente a la fricción del conjunto conformado por el pistón. El anillo de control de aceite, debido a su diseño de dos carriles y un mayor esfuerzo sometido, puede funcionar parcialmente bajo lubricación límite y contribuir aproximadamente al doble de fricción en comparación a la fricción de cada anillo de compresión. La presión media efectiva de fricción del paquete de anillos está en el rango de 4 a 12 [kPa].

Los anillos pueden fallar si la presión de combustión del gas producido en el interior de la cámara es superior al habitual o si el aceite se encuentra contaminado. El indicador más común es el paso de gas al cárter o debajo del área del pistón.

5. Ovalidad en un MCI

Cuando el motor comienza a moverse, la biela no se mueve solo hacia arriba y hacia abajo, sino que debido a una ligera rotación se mueve simultáneamente hacia los lados [5]. Esta acción de la biela y el movimiento del cigüeñal producen fuerzas de carga sobre el pistón a lo largo del plano de la biela en línea con la rotación. Para permitir que el pistón se mueva libremente con esta fuerza lateral, no puede ser perfectamente redondo o se atascaría en el orificio del cilindro. La ovalidad permite que funcione perfectamente considerando estas limitaciones, definida como la desviación ligera de la sección transversal de un círculo perfecto. De hecho, si

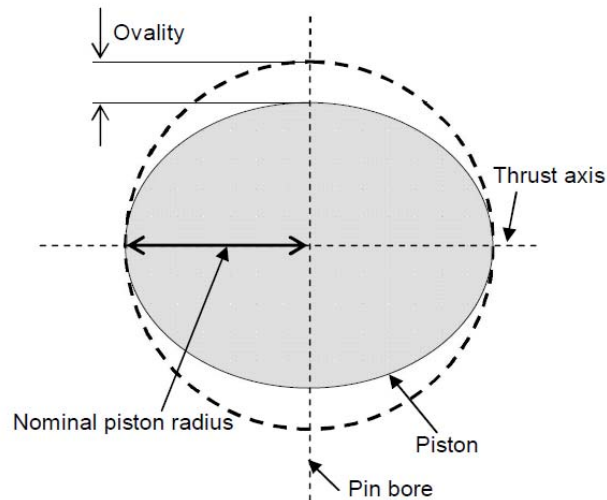


Figura 3: Ovalidad de un pistón [6]

se hace rodar un pistón sobre una superficie plana, se observa que el pistón sube y baja con un movimiento alterno, como si una rueda tuviera un punto plano.

Muy poca ovalidad puede hacer que el pistón entre en contacto con la pared del cilindro más cercana al extremo del pasador del pistón, mientras que demasiada ovalidad puede hacer que el pistón se apoye demasiado contra la pared del cilindro a lo largo del plano formado con la biela. Demasiada carga a lo largo del eje de empuje puede resultar en un gran desgaste cuando el pistón rompe la barrera de la película de aceite y hace contacto directo con la pared del cilindro.

6. Elementos de un MCI: Eje leva, Eje cigüeñal, alternador, motor de arranque o partida, embrague.

El árbol de levas es el encargado de abrir y cerrar las válvulas. En los motores de cuatro tiempos, los árboles de levas giran a la mitad de la velocidad del cigüeñal, vale decir, son accionados por el cigüeñal. Los elevadores mecánicos o hidráulicos se deslizan en el bloque y se mueven o ruedan sobre la leva. Dependiendo de la ubicación de la válvula y del árbol de levas, se requieren miembros adicionales para transmitir el movimiento del empujador o elevador al vástago de la válvula. Por ejemplo, en motores de válvulas con el árbol de levas en la parte lateral, se utilizan una varilla de empuje y un balancín. Una tendencia en los motores automotrices de alta velocidad es montar el árbol de levas sobre la cabeza con las levas actuando directamente o mediante un seguidor pivotante en la válvula.

El eje cigüeñal es la parte del motor que transforma el movimiento lineal alternativo del pistón en rotativo. Para convertir ese movimiento el cigüeñal posee superficies de apoyo llamados muñones escalonados cuyos ejes están descentrados, a los que se unen los extremos de las bielas de cada cilindro. Generalmente, se conecta a un volante para reducir las pulsaciones del ciclo y a un amortiguador de vibraciones en el extremo opuesto.

El alternador genera energía para alimentar el sistema eléctrico y cargar la batería. La salida de un alternador es corriente alterna (CA) generada mediante inducción electromagnética. Debe ser capaz de hacer frente a cargas eléctricas variables y ajustes en su tasa de carga dictadas por la unidad de control del motor (ECU). Un alternador está conformado por una polea que recibe la fuerza mecánica del MCI a través de una correa de transmisión normalmente en V, un rotor que produce el campo magnético, un regulador de tensión y amperaje, un estator que contiene el bobinado trifásico y un puente rectificador de diodos que transforma la CA en CC.

El motor de arranque eléctrico es el encargado de hacer girar al cigüeñal hasta que el proceso de combustión se haga cargo de su movimiento continuo. Cuando se activa el encendido, se envía energía al motor de arranque eléctrico que produce un engrane a la corona dentada en el volante. Este volante está atornillado al cigüeñal del motor y se logra efectuar el giro de partida. Una vez que el motor está en marcha, el motor gira por su

propia potencia. Este motor esta compuesto por un rotor encargado de dar movimiento al piñón que engrana el volante, unas escobillas que transmiten la corriente, el piñón accionado por un relé al girar la llave de contacto y un estator.

El embrague es un dispositivo de acoplamiento que conecta al MCI con la caja de cambios y transmite el par motor. Sus principales funciones radican en que permite la interrupción de energía entre el motor y la caja de cambios cuando hay detención o cambios de marcha, provee de un acoplamiento progresivo durante el arranque o después del cambio de marcha y mantiene la conexión sin deslizamientos. Es necesario el desacoplamiento del motor con la caja de cambios cuando se cambia una marcha, para evitar que la velocidad del motor descienda por debajo del ralenti. Si no se realiza la desconexión de la caja de cambios, el motor se detiene. El conjunto de un embrague de fricción está constituido por un disco, una maza de presión unida al volante de inercia y un collarín de empuje encargado de separar o unir el disco al volante por la acción de la maza de presión.

En una fase de desembragado, el disco queda suelto y libre de la fuerza ejercida por la maza o plato de presión, cortando la transmisión del motor a la caja de cambios, por lo que se puede seleccionar una nueva velocidad. En cambio, la acción de embragado conecta la transmisión hacia la caja de cambios y el disco queda presionado contra el volante de inercia a través de la maza de presión.

7. Rectificación en un MCI

A medida que avanza el ciclo de vida del motor, las partes correspondientes al block, el cigüeñal y los cojinetes que le sostienen, las bielas y los pistones sufren desgaste excesivo. Esto se debe a que conforman las zonas donde hay mayor fricción. Hasta cierto punto, es recomendable aplicar una rectificación al motor, consistente en el mecanizado de las piezas mencionadas hasta igualar las superficies de contacto y darles un acabado que decremente el rozamiento y favorezca la lubricación de las partes en movimiento. Es un proceso largo pero factible que involucra etapas como el desmontaje, limpieza, rectificado, pulido hasta la tolerancia especificada por el fabricante, alineamientos y corrección de holgura.

8. Medición camisa cilindro

| Tabla N°2: Mediciones camisa cilindro | | | | |
|---------------------------------------|----------|--------------|--------------|------------|
| Diámetro | Posición | Valor medido | Valor manual | Diferencia |
| Superior A [mm] | 0° | 100,05 | 100,05 | 0,00 |
| | 120° | 100,04 | 100,05 | 0,01 |
| | 240° | 100,04 | 100,05 | 0,01 |
| Intermedio B [mm] | 0° | 100,03 | 100,03 | 0,00 |
| | 120° | 100,02 | 100,03 | 0,01 |
| | 240° | 100,03 | 100,03 | 0,00 |
| Inferior C [mm] | 0° | 100,02 | 100,03 | 0,01 |
| | 120° | 100,03 | 100,03 | 0,00 |
| | 240° | 100,03 | 100,03 | 0,00 |

La medición de la camisa se efectúa mediante un micrómetro de interiores calibrado (instrumento de contacto) con una precisión de 0.01 mm y se realiza en varios puntos: posiciones de asiento superior e inferior, como también de izquierda a derecha. Para comprender los errores que arrastra la medición, primero se debe comprender el nivel de desgaste generado en la camisa y posteriormente identificar los errores asociados a las condiciones en que se opera el instrumento de medición.

El desgaste puede producirse por fricción, corrosión, abrasión y adhesión. La fricción se debe al contacto de la superficie de los anillos con la superficie de la camisa, produciendo rayados. En cuanto al desgaste por corrosión se debe a la formación de ácidos derivados del azufre y el desgaste por abrasión se produce debido a la formación de partículas durante la combustión, ambos provocan protuberancias milimétricas que van decrementando la uniformidad de la superficie de la camisa. La adhesión se entiende como la formación de soldadura local entre las partículas de los anillos y la superficie de la camisa que producen un efecto de raspado. Se destaca que el desgaste no se produce de manera uniforme y distribuida por toda la superficie de la camisa. Por lo tanto, el desgaste es mayor en la parte superior, ya que la combustión inicia en ese lugar.

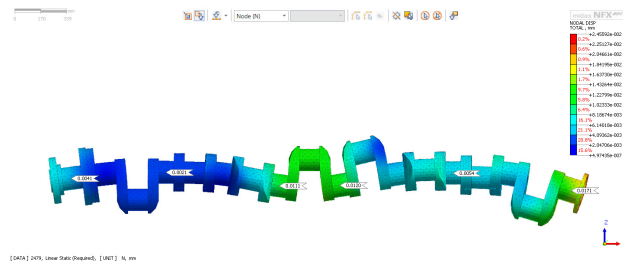


Figura 4: Deflexión de un cigüeñal soportado en cuatro apoyos principales [7]

En síntesis, el hecho de se genere desgaste en la camisa produce diferencias con respecto a la medida indicada por el catálogo.

Con respecto a las condiciones de operación del instrumento, la temperatura de la camisa y el micrómetro debe ser la misma en el momento de medir. En el caso de que el micrómetro exceda la temperatura de la camisa, o viceversa, las lecturas deben corregirse multiplicando el valor por el factor de corrección y restando el valor obtenido de la lectura medida. Por lo tanto, si existió un gradiente de temperatura entre ambos elementos, evidentemente afectó la medición, generando una diferencia en magnitud apreciable.

9. Medición cigüeñal

| Tabla N°3: Mediciones en cigüeñal | | | |
|-----------------------------------|--------------|--------------|------------|
| Medición | Valor medido | Valor manual | Diferencia |
| Diámetro Muñón biela 0° [mm] | 59,94 | 59,94 | 0,00 |
| Diámetro Muñón bancada 0° [mm] | 69,96 | 69,97 | 0,01 |
| Diámetro Muñón biela 90° [mm] | 59,95 | 59,94 | 0,01 |
| Diámetro Muñón bancada 90° [mm] | 69,97 | 69,97 | 0,00 |
| Ancho Muñón biela 0° [mm] | 37,02 | 37,02 | 0,00 |
| Ancho Muñón bancada 0° [mm] | 36,99 | 37,00 | 0,01 |
| Ancho Muñón biela 90° [mm] | 37,01 | 37,02 | 0,01 |
| Ancho Muñón bancada 90° [mm] | 36,99 | 37,00 | 0,01 |

La medición del cigüeñal se efectúa, al igual que en la camisa, mediante un micrómetro de interiores calibrado (instrumento de contacto) con una precisión de 0.01 mm. Se realiza apoyando el cigüeñal con sus muñones exteriores en soportes prismáticos.

La presencia de diferencias en las mediciones efectuadas en el ensayo con respecto a las indicadas por el fabricante, radican en la existencia de deformación en la condición geométrica del cigüeñal [7]. Vale decir, hay dislocaciones en múltiples puntos situados a lo largo del eje del cigüeñal como resultado de la deformación elástica y deflexión producto de su propio peso. La causa principal es el uso de soportes rígidos para el cigüeñal. Por lo tanto, al cambiarlos por soportes flexibles se ompensa la deflexión vertical y horizontal debido a la reacción en fuerza pasiva que produce.

10. Bibliografía

- [1] Advantages of electric vehicles compared to internal combustion engine vehicles (2014) 09-09-2020 Sitio web: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/electric-vehicles/advantages-of-electric-vehicles/>
- [2] Vijayagopal, R., Gallagher, K., Lee, D., and Rousseau, A., Comparing the Powertrain Energy Densities of Electric and Gasoline Vehicles),”SAE Technical Paper 2016-01-0903, 2016, <https://doi.org/10.4271/2016-01-0903>.
- [3] Stone, R. (2012a). Introduction to Internal Combustion Engines (4th ed.). Sae Intl. p.356
- [4] Heywood, J. (2018). Internal Combustion Engine Fundamentals 2E (2nd ed.). McGraw-Hill Education. Section 13.6.3 Piston Assembly Friction and Lubrication
- [5] Kevin Bailey. (2018). Pistons Aren’t Round: Profile and Ovality Explained. 09-09-2020, de WISECO Sitio web: <http://blog.wiseco.com/pistons-arent-round-profile-and-ovality-explained>
- [6] S.S., Narain. (2015). Analysis of Piston Slap Motion. International Journal of Applied Mechanics and Engineering. 20. 10.1515/ijame-2015-0030.
- [7] Nozdrzykowski, Krzysztof Chybowski, Leszek. (2019). A Force-Sensor-Based Method to Eliminate Deformation of Large Crankshafts during Measurements of Their Geometric Condition. Sensors. 19. 3507:1-25. 10.3390/s19163507.