

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales,
y de Telecomunicación

MEJORA DE LA EJECUCIÓN DE ENSAYOS ESTÁTICOS Y DE FATIGA SOBRE ELEMENTOS DE SUSPENSIÓN



Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

Víctor Forcada Garrido

Jesús María Pintor Borobia

Pamplona, Junio de 2018



Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres y hermana el ánimo recibido durante estos 5 años de carrera y sobretodo el apoyo en los momentos no tan buenos, sin los cuales no hubiera sido posible llegar hasta aquí.

Agradecer también a todos mis amigos y compañeros de universidad que han formado parte de esta etapa. Empezamos como desconocidos que querían descubrir el ámbito de la ingeniería. Largas tardes en nuestra fila de la biblioteca, largas horas en laboratorios y despachos salvando nuestros ratitos para almorzar. Lo descubrimos finalmente, dejando de ser desconocidos, colegas de uni.

Tampoco olvidarme de todos los compañeros que he conocido durante estos últimos 5 meses en Cemitec. Gracias a todos por hacer esta experiencia muy enriquecedora a la vez que dinámica y al integrarme como uno más-.Para la próxima vez no me saldré en la primera curva. La elaboración de este trabajo no habría sido posible sin vuestra ayuda.

Proyecto Fin de Grado
Ingeniería Mecánica

Mejora de la ejecución de ensayos estáticos y de fatiga sobre elementos de suspensión

Autor:

Víctor Forcada Garrido

Tutor:

Jesús Pintor Borobia

Profesor titular

Departamento de Ingeniería

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación

Universidad Pública de Navarra

Pamplona, 2018

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado consiste en la mejora de la ejecución de ensayos estáticos y de fatiga sobre manguetas pertenecientes al sistema de suspensión de tipo McPherson en vehículos ligeros.

Inicialmente se ha realizado un estudio teórico riguroso del funcionamiento del sistema de suspensión de un automóvil y los distintos elementos que lo componen. Además se ha desglosado la consecución y finalidad de los ensayos estructurales.

Seguidamente se ha establecido como identificar una mangueta, a través de un diseño conceptual se ha explicado la disposición real en un vehículo y se han recreado las condiciones de contorno en un banco de ensayo a través del software de diseño CATIA v5.

Posteriormente se ha desarrollado un ensayo estructural pasando por montaje, calibración, puesta a punto y obtención final de adquisiciones para su análisis posterior.

Lista de palabras clave

Suspensión, ensayo estructural, estático, fatiga, mangueta, McPherson, banco de ensayos

Abstract

This end-of-degree Project consists in the improvement of the execution of static and fatigue tests on Steering knuckles that belong to the suspension system of the McPherson type in light vehicles.

Initially a rigorous theoretical study of the operation of the suspension system of a car and the different elements that make it up has been carried out. In addition, the achievement and purpose of structural tests have been explained.

Next, it has been established how to identify a Steering knuckle, through a conceptual design the actual disposition in a vehicle has been explained and the boundary conditions have been recreated in a test bench through the CATIA v5 design software.

Finally, a structural test was carried out, including assembly, calibration, tuning and acquisitions for further analysis.

Keywords

Suspension, structural test, static, fatigue, steering knuckle, McPherson, test bench

Índice

1	Introducción	11
2	Estado del arte	13
2.1	Suspensiones	13
2.1.1	Concepto de suspensión	13
2.1.2	Masa suspendida y no suspendida.....	13
2.1.3	Funciones de la suspensión.....	13
2.1.4	Balanceo, cabeceo y guiñada	14
2.1.5	Componentes de un sistema de suspensión.....	14
2.1.5.1	Elementos elásticos.....	14
2.1.5.2	Amortiguadores.....	18
2.1.5.3	Elementos estructurales.....	21
2.1.6	Tipos de sistemas de suspensión	25
2.1.6.1	Suspensión McPherson	25
2.1.6.2	Paralelogramo deformable	27
2.1.6.3	Brazos arrastrados.....	27
2.1.6.4	Brazos semiarrastrados.....	28
2.1.6.5	Multibrazo	28
2.1.6.6	Suspensión de eje rígido	30
2.1.6.7	Suspensión semindependiente	31
2.2	Ensayos estructurales.....	32
2.2.1	Tipos de ensayo.....	32
2.2.1.1	Ensayos estáticos o de resistencia	32
2.2.1.2	Ensayos de fatiga.....	33
2.2.2	Sistemas de ensayo servo-hidráulicos.....	34
2.2.2.1	Sistemas hidráulicos.....	35
2.2.2.2	Servoválvula	36
2.2.2.3	Actuadores hidráulicos.....	37
2.2.3	Componentes auxiliares.....	39
2.2.4	Hardware y Software de control	43
2.2.4.1	Controlador Hardware	43

2.2.4.2	Software de control.....	45
3	Diseño banco de ensayos	47
3.1	Selección caso: Tipo de suspensión, casos de carga	47
3.1.1	Identificación del tipo de suspensión y de mangueta.....	47
3.1.2	Simulación para el ensayo de la mangueta.....	49
3.1.3	Casos de carga.....	50
3.1.3.1	Vertical Test.....	50
3.1.3.2	Steering Arm Impact Test.....	51
3.1.3.3	Lateral Test.....	51
3.1.3.4	Longitudinal Test.....	51
3.1.3.5	Braking Test.....	51
3.2	Diseño conceptual.....	51
3.2.1	Layout conceptual	51
3.2.2	Hardpoints.....	54
3.2.3	Condiciones y casos de carga	58
3.2.3.1	Primera disposición	58
3.2.3.2	Segunda disposición.....	59
3.2.4	Selección de componentes de ensayo	61
3.2.5	Selección de componentes auxiliares y de actuación	63
3.3	Diseño en detalle.....	64
3.3.1	Diseño en detalle del banco	64
3.3.2	Diseño de utillajes	67
4	Implementación del banco de ensayo y análisis de resultados	75
4.1	Montaje banco de ensayos	75
4.2	Ajuste sistemas de actuación (tuning) y pruebas iniciales.....	77
4.3	Programación y ejecución ensayo.....	80
4.4	Análisis de datos y resultados	86
5	Conclusiones y líneas abiertas.....	91
6	Bibliografía	93
7	ANEXOS	95

Índice de figuras

Figura 2.1: Grados de libertad existentes en cualquier vehículo	14
Figura 2.2: Características del muelle	15
Figura 2.3: Influencia de la dureza del muelle en las oscilaciones.....	15
Figura 2.4: Tipos de muelle en función del paso y diámetro exterior	16
Figura 2.5: Ballesta con sus diferentes partes.....	16
Figura 2.6: Ubicación en el vehículo de una ballesta con gemela	17
Figura 2.7: Principio de funcionamiento de una barra de torsión	17
Figura 2.8: Balanceo producido en un vehículo sin barra estabilizadora	18
Figura 2.9: Balanceo producido en un vehículo con barra estabilizadora	18
Figura 2.10: Vibraciones libres no amortiguadas y respuesta amortiguada	19
Figura 2.11: Partes y funcionamiento de un amortiguador bitubo	20
Figura 2.12: Partes y funcionamiento de un amortiguador monotubo	21
Figura 2.13: Ubicación trapecio superior e inferior en una suspensión	22
Figura 2.14: Diferentes brazos pertenecientes a una suspensión multibrazo	22
Figura 2.15: Mangueta (asociada a suspensión McPherson).....	23
Figura 2.16: Estructura del conjunto mangueta-buje.....	24
Figura 2.17: Buje estriado y pernos de sujeción	24
Figura 2.18: Rótula.....	25
Figura 2.19: Silentblocks	25
Figura 2.20: Estructura suspensión McPherson	26
Figura 2.21: Suspensión McPherson perteneciente a un eje delantero	26
Figura 2.22: Suspensión de paralelogramos deformables perteneciente a un eje trasero motriz.....	27
Figura 2.23: Suspensión de brazos arrastrados con muelle helicoidal (izda.) y barras de torsión (dcha.).....	27
Figura 2.24: Suspensión de brazos semiarrastrados en el eje trasero motriz.....	28
Figura 2.25: Brazos de una suspensión multibrazo	29
Figura 2.26: Suspensión multibrazo en un eje delantero no motriz	29
Figura 2.27: Concepto de eje rígido.....	30
Figura 2.28: Suspensión de eje rígido en un eje trasero	30
Figura 2.29: Suspensión semindependiente en el eje trasero.....	31
Figura 2.30: Etapas en el desarrollo de producto.....	32
Figura 2.31: Curva tensión-deformación.....	33
Figura 2.32: Distintas zonas en la cara de rotura producidas por fatiga.....	34
Figura 2.33: Layout hidráulico de un laboratorio de sistemas hidráulicos	34
Figura 2.34: Unidad HPS	35
Figura 2.35: Conjunto HSM con dos unidades HPU.....	36
Figura 2.36: Servoválvula de dos etapas.....	36
Figura 2.37: Actuador hidráulico con dos swivels y servoválvula.....	37
Figura 2.38: Vista interior de un actuador hidráulico.....	37
Figura 2.39: Transductor de fuerza, célula de carga	38
Figura 2.40: Swivels pertenecientes a un actuador hidráulico. Base (izda.) y varilla final (dcha.)	38
Figura 2.41: Bancada	39
Figura 2.42: Amarre en T.....	40
Figura 2.43: Placas base de distinto tamaño	40
Figura 2.44: Distintas columnas en función de la altura	40
Figura 2.45: Escuadra reguladora	41
Figura 2.46: Pórtico de sujeción	41
Figura 2.47: Columna angular.....	41
Figura 2.48: Placa de amarre que cuenta con 3 disposiciones para actuadores distintos	42
Figura 2.49: Bridas de amarre con distintas configuraciones	42
Figura 2.50: Cables hidráulicos conectados a la unidad HSM	42
Figura 2.51: Conexiones de los cables de control para los actuadores.....	43

Figura 2.52: Controlador	43
Figura 2.53: Sistema de control de lazo cerrado	44
Figura 2.54: Estructura del procedimiento de programación de un ensayo estructural	46
Figura 3.1: Vista exterior (izda.) e interior (dcha.) de la mangueta bajo estudio en CATIA.....	47
Figura 3.2: Vista interior de la mangueta y los links de unión.....	48
Figura 3.3: Mangueta mano izquierda bajo estudio	48
Figura 3.4: Convenio de signos para los ejes.....	49
Figura 3.5: Diseño conceptual. Vista 1	52
Figura 3.6: Diseño conceptual. Vista 2	52
Figura 3.7: Diseño conceptual explosionado. Visto desde el interior.	53
Figura 3.8: Diseño conceptual explosionado. Visto desde el exterior.	54
Figura 3.9: Ubicación de los Hardpoints en el diseño conceptual	55
Figura 3.10: Segunda ubicación de los Hardpoints en el diseño conceptual	56
Figura 3.11: Ubicación de los Hardpoints en el cubo de rueda.....	56
Figura 3.12: Montaje mediante utillajes de la disposición de la mangueta en el banco de ensayos	57
Figura 3.13: Disposición y orientación final de la mangueta en el banco de ensayos	57
Figura 3.14: Cargas de la primera disposición aplicadas en el diseño conceptual	58
Figura 3.15: Cargas de la primera disposición aplicadas en el banco de ensayo	59
Figura 3.16: Cargas de la segunda disposición aplicadas en el diseño conceptual	60
Figura 3.17: Cargas de la segunda disposición aplicadas en el banco de ensayo	60
Figura 3.18: Conjunto cubo de rueda o caja.....	61
Figura 3.19: Conjunto cubo de rueda visto desde el interior	61
Figura 3.20: Conjunto unión-soporte	62
Figura 3.21: Conjunto soporte rígido-cilindro.....	62
Figura 3.22: Etiquetas de identificación actuador: Capacidad en Newton (izda.) y LVDT en mm (dcha.)	63
Figura 3.23: Reenvío.....	64
Figura 3.24: Layout de la disposición Longitudinal en Catia. Vista 1.....	65
Figura 3.25: Layout de la disposición Longitudinal en Catia. Vista 2.....	65
Figura 3.26: Layout de la disposición Braking en Catia. Vista 1	66
Figura 3.27: Layout de la disposición Braking en Catia. Vista 2	66
Figura 3.28: Placa de amarre	67
Figura 3.29: Superficie de las rótulas/swivels en contacto con el utillaje de unión.....	67
Figura 3.30: Alternativas iniciales de utillaje de unión propuestos	68
Figura 3.31: Utillaje de 20 milímetros de espesor	69
Figura 3.32: Cargas y deformación en la simulación de la primera pieza	69
Figura 3.33: Detalle de las cargas producidas en la primera pieza	70
Figura 3.34: Niveles de desplazamiento producidos en la primera pieza	70
Figura 3.35: Utillaje de 40 milímetros de espesor	71
Figura 3.36: Cargas y deformación producidas en la segunda pieza	71
Figura 3.37: Detalle interior de las cargas producidas en la segunda pieza.....	72
Figura 3.38: Porcentaje de error en la simulación de la segunda pieza	72
Figura 3.39: Niveles de desplazamiento producidos en la segunda pieza	73
Figura 4.1: Utillajes montados (izda.) y mangueta fijada a los utillajes (dcha.).....	75
Figura 4.2: Interior de la unión mangueta y cubo de rueda	75
Figura 4.3: Cubo de rueda colocado sobre la mangueta.....	76
Figura 4.4: Conexión al cubo de rueda de los actuadores X y Z.....	76
Figura 4.5: Disposición final del layout con los 3 actuadores.....	77
Figura 4.6: Construcción de la estación de trabajo	77
Figura 4.7: Calibración en desplazamiento del actuador Ch 1	78
Figura 4.8: Calibración en desplazamiento del actuador Ch 1	78
Figura 4.9: Configuración de la señal cíclica en el tuning en desplazamiento del actuador.....	79
Figura 4.10: Señal comandada (azul) frente a señal respuesta (roja)	79
Figura 4.11: Ajuste de los valores P Gain e I Gain en el tuning en desplazamiento del actuador.....	80
Figura 4.12: Procedimiento de ensayo completo	80

Figura 4.13: Adquisición en tendencia. Time Interval.....	81
Figura 4.14: Parametros seleccionados en la adquisición cíclica.	81
Figura 4.15: Precarga en Z.	82
Figura 4.16: Comando para mantener la carga en Z durante todo el ensayo.	82
Figura 4.17: Parametros del seno en el actuador Ch 1.....	83
Figura 4.18: Comando para mantener el actuador Ch 1 a 0 Newtons	83
Figura 4.19: Comando manual (izda.) y Signal Auto Offset (dcha.).....	84
Figura 4.20: Interlocks.....	84
Figura 4.21: Información instantánea durante el ensayo	85
Figura 4.22: Gráficas durante el ensayo.....	85
Figura 4.23: Gráfica de tendencia de la fuerza en el actuador Ch 1. Fuerza (kN) frente a ciclos.....	86
Figura 4.24: Gráfica de tendencia del desplazamiento en el actuador Ch 1. Desplazamiento (mm) frente a ciclos. ...	87
Figura 4.25: Gráfica cíclica de la fuerza del actuador Ch 1 durante todo el ensayo. Fuerza (kN) frente a ciclos.....	88
Figura 4.26: Gráfica cíclica de la fuerza del actuador Ch 1 durante 5 ciclos. Fuerza (kN) frente a ciclos.	88
Figura 4.27: Gráfica cíclica del desplazamiento actuador Ch 1 en el ensayo. Desplazamiento (mm) frente a ciclos. ...	89
Figura 4.28: Gráfica cíclica del desplazamiento actuador Ch 1 en 20 ciclos. Desplazamiento (mm) frente a ciclos	89
Figura 5.1: Capacidades actualizadas del área para validación de sistemas de suspensión	91
Figura 5.2: Barra birrotulada para la mejora en el diseño de la configuración.....	92
Figura 7.1: Gráfica de tendencia de la fuerza en el actuador Y. Fuerza (kN) frente a ciclos.....	117
Figura 7.2: Gráfica de tendencia del desplazamiento en el actuador Y. Desplazamiento (mm) frente a ciclos.	117
Figura 7.3: Gráfica de tendencia de la fuerza en el actuador Z. Fuerza (kN) frente a ciclos.....	118
Figura 7.4: Gráfica de tendencia del desplazamiento en el actuador Z. Desplazamiento (mm) frente a ciclos.	118
Figura 7.5: Gráfica cíclica de la fuerza del actuador Y durante todo el ensayo. Fuerza (kN) frente a ciclos.....	118
Figura 7.6: Gráfica cíclica de la fuerza del actuador Y durante 5 ciclos. Fuerza (kN) frente a ciclos.	119
Figura 7.7: Gráfica cíclica del desplazamiento actuador Y en el ensayo. Desplazamiento (mm) frente a ciclos.	119
Figura 7.8: Gráfica cíclica del desplazamiento actuador Y en 20 ciclos. Desplazamiento (mm) frente a ciclos.....	119
Figura 7.9: Gráfica cíclica de la fuerza del actuador Z durante el ensayo. Fuerza (kN) frente a ciclos.	120
Figura 7.10: Gráfica cíclica de la fuerza del actuador Z durante 20 ciclos. Fuerza (kN) frente a ciclos.	120
Figura 7.11: Gráfica cíclica del desplazamiento actuador Z en el ensayo. Desplazamiento (mm) frente a ciclos.	120

Índice de tablas

Tabla 1: Descripción de los Hardpoints de una mangueta McPherson	55
Tabla 2: Características de la primera disposición de ensayo	58
Tabla 3: Características de la segunda disposición de ensayo	59
Tabla 4: Resumen de los elementos hidráulicos utilizados.....	64

1 Introducción

El presente trabajo se ha desarrollado en las instalaciones del centro tecnológico Fundación Cetena-Cemitec (Centro Multidisciplinar de Tecnologías para la Industria) en la sede de Pamplona durante un periodo de prácticas. Se ha llevado a cabo dentro del área mecánica en el departamento de componentes y sistemas estructurales que cuenta con laboratorios para validación estructural de componentes.

El proyecto tiene como objetivo principal la optimización de la capacidad del área de mecánica en el desarrollo de ensayos de validación de sistemas y componentes en automoción, especialmente en manguetas asociadas a una suspensión McPherson.

Los objetivos parciales se enfocan en base a las especificaciones de ensayos existentes para dar soporte en el diseño de los distintos layouts de ensayos necesarios, diseñar utillajes de adaptación a los medios de ensayo disponibles en el laboratorio de validación y realizar diferentes pruebas de ensayo a fatiga sobre la mangueta de tipo McPherson.

Se realizará el montaje del layout del ensayo en base a los planos de fabricación realizados. Posteriormente se definirá la programación del ensayo a través del programa *MultiPurpose TestWare Software* (MPT). Por último, se analizarán los datos obtenidos para comprobar que la señal y respuesta son correctas para en acciones futuras se pueda realizar un ensayo que determine la robustez del layout.

La realización de los distintos layouts de ensayo y del diseño de utillajes de adaptación se ha realizado a través del software de diseño CATIA (*computer-aided three dimensional interactive application*).

2 Estado del arte

2.1 Suspensiones

2.1.1 Concepto de suspensión

La Real Academia Española proporciona la siguiente definición de suspensión, para automóviles, vagones de ferrocarril y cualquier otro vehículo: “Conjunto de piezas y mecanismos destinados a hacer elástico el apoyo de la carrocería sobre las ruedas” (RAE, 2014, n. p.). En automoción, se considera que el chasis se encuentra suspendido respecto de las ruedas y sus elementos adjuntos. Es decir, no van unidos rígidamente, lo cual permite que se den movimientos relativos entre ambos.

Entre estos dos componentes se intercala un elemento elástico, como por ejemplo un muelle helicoidal (elemento elástico más utilizado como acumulador de energía), de modo que su resistencia a la deformación, mantenga el chasis en suspensión. Este debe permitir a la rueda recuperar la posición original de reposo tras un movimiento de compresión (chasis y rueda se acercan).

A su vez, dicho componente debe permitir a la rueda cierto margen de extensión desde su posición original de reposo para poder absorber irregularidades del terreno como baches, y compresión ante la presencia de resaltes.

En función de la fuerza necesaria para deformar el elemento elástico se considera tarado duro (mayor esfuerzo) o tarado blando (esfuerzo menor).

2.1.2 Masa suspendida y no suspendida

Los elementos del vehículo en contacto permanente con el suelo y que oscilan junto con las ruedas en los movimientos de aproximación y alejamiento entre éstas y el chasis, se denominan masas no suspendidas.

Por otro lado, el resto del vehículo, conocido como chasis o carrocería, se le denomina masa suspendida.

2.1.3 Funciones de la suspensión

La presencia de la suspensión en un vehículo, permite aislar y minimizar la transmisión de irregularidades del terreno al interior del compartimento, con lo que se consigue mejorar la comodidad de los ocupantes a la vez que se optimiza la conducción del propio vehículo

Se protege al vehículo al impedir que las irregularidades afecten directamente a la carrocería. Es posible diseñar un chasis menos resistente y más ligero (en consonancia con la tendencia actual de reducción de peso), al no estar directamente expuesto a las irregularidades de la vía.

Cuando se producen cambios de dirección, a través de la deformación de los elementos elásticos presentes en la suspensión, se absorbe parte de la fuerza centrífuga

generada, impidiendo que esta se transmita a las ruedas. Se reduce el trabajo de los neumáticos, aumentando su límite de adherencia. Con la presencia de un elemento auxiliar, denominado barra estabilizadora, no siempre presente, se facilita y descarga el trabajo a los neumáticos.

2.1.4 Balanceo, cabeceo y guiñada

Los efectos contraproducentes que se generan en un vehículo debido a las irregularidades del terreno, vaivenes en aceleraciones y frenadas, conducción inadecuada, viento, son gestionados por el sistema de suspensión el cual debe reducir la magnitud en la que estos son transmitidos al chasis del vehículo.

- Balanceo (Giro en X): Se puede percibir en las curvas
- Cabeceo (Giro en Y): Se produce en las aceleraciones y frenadas bruscas y al existir irregularidades en la vía.
- Guiñada (Giro en Z): Se puede producir en cambios bruscos de dirección
- Vaivén (Desplazamiento en X): Movimiento producido por el viento frontal o funcionamiento incorrecto del motor (tirones)
- Bandazos (Desplazamiento en Y): Provocado por el viento lateral
- Bailoteo (Desplazamiento en Z): Se produce en calzadas ligeramente onduladas.

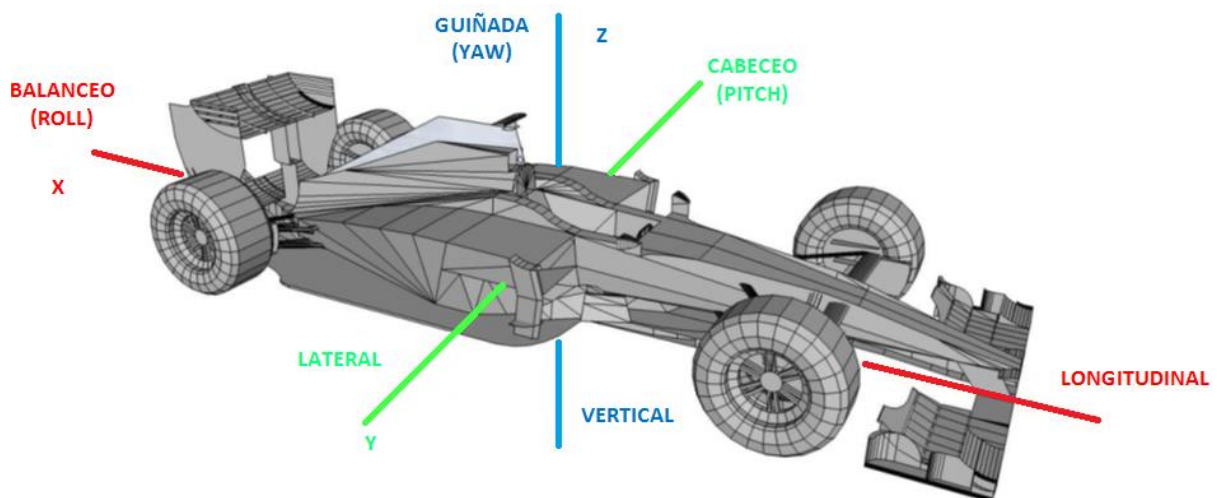


Figura 2.1: Grados de libertad existentes en cualquier vehículo

Fuente: <http://f1framework.blogspot.com.es/2012/08/f1-aero-glossary.html>

2.1.5 Componentes de un sistema de suspensión

2.1.5.1 Elementos elásticos

Es el componente que permite a través de su deformación, los movimientos relativos entre carrocería y ruedas. Además evita que se produzca la posición permanente de máxima compresión de la carrocería contra las ruedas, es decir, la que se produciría en ausencia de los elementos elásticos. Absorbe la energía mecánica de los impactos generados consecuencia de las irregularidades del terreno, como también la fuerza centrífuga producida en las curvas. Esta energía es devuelta posteriormente para recuperar la posición inicial de reposo.

2.1.5.1.1 Muelle helicoidal

Consiste en una varilla de acero enrollada en forma de espiral respecto un eje imaginario y teórico. Las espiras de los extremos son planas para facilitar el acoplamiento del muelle en sus apoyos. Reciben esfuerzos de compresión, pero como consecuencia de su disposición helicoidal trabajan a torsión. Por otra parte, no pueden emplearse como

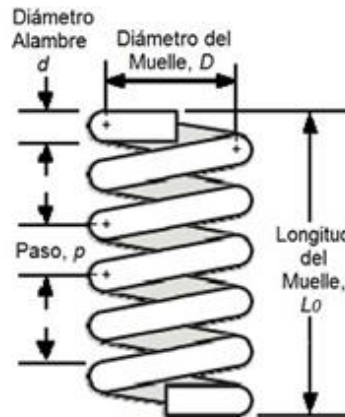


Figura 2.2: Características del muelle

Fuente: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn129.htm>

elementos de empuje ni de sujeción lateral por lo que se requiere de elementos auxiliares que realicen estas funciones. Las características de un muelle vienen determinadas por los siguientes factores:

- Longitud del muelle: Un muelle es más blando conforme aumenta su longitud (sin alterar el resto de variables).
- Diámetro del muelle: El aumento del diámetro exterior del muelle reduce la dureza del mismo
- Coeficiente elástico del muelle: Determina la fuerza a realizar para deformarlo en la unidad de longitud.
- Paso: Es la distancia entre espiras consecutivas. Al aumentar el paso, la dureza disminuye, por lo que se requiere menos fuerza para conseguir deformarlo.
- Diámetro del alambre: La dureza aumenta de forma directa en función del aumento de la sección.

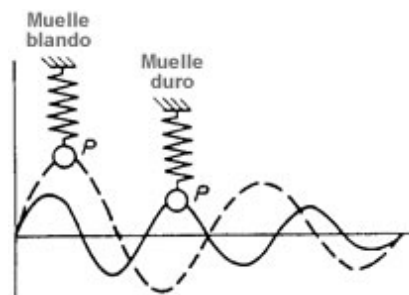


Figura 2.3: Influencia de la dureza del muelle en las oscilaciones

Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.net/suspension1.htm>

Además de muelles con paso fijo, existen muelles de progresividad variable los cuales aúnan el confort que proporcionan los muelles blandos junto con la estabilidad de los muelles duros. Dos de esos tipos son:

- Muelles de paso variable: Aquellos en los que el paso varía a lo largo de su longitud permitiendo disponer de un muelle de dureza variable que cumple con las exigencias dinámicas de forma más amplia.
- Muelles cónicos: Su disposición se ve modificada al reducirse el diámetro exterior a lo largo del muelle, lo que le aporta una dureza variable.



Figura 2.4: Tipos de muelle en función del paso y diámetro exterior

Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.net/cursos-de-mecanica-2/>

La gran sencillez constructiva, unido a su ligereza y gran facilidad de ubicación en el vehículo, son las aptitudes que permiten a los muelles helicoidales ser el elemento elástico más utilizado en automoción.

2.1.5.1.2 Ballestas

Consisten en una serie de hojas o láminas de acero resistente dotado con propiedades elásticas, de diferente longitud, superpuestas entre sí de mayor a menor a partir de la hoja principal (más larga), denominada hoja maestra. Su forma posee cierto grado de curvatura y en sus extremos posee unas fijaciones circulares que alojan los bulones y silentblocks (bloque antivibratorio), que la articulan al bastidor del vehículo.

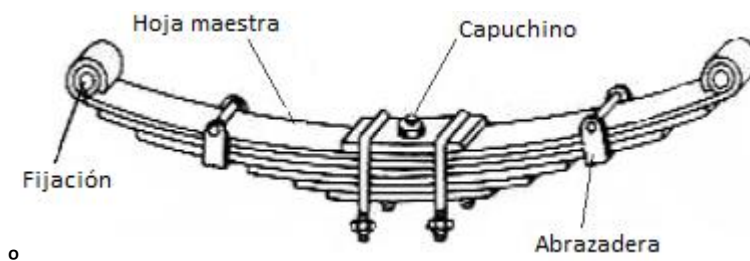


Figura 2.5: Ballesta con sus diferentes partes

Fuente: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn73.html>

Debido a las deformaciones elásticas que experimenta la hoja maestra, se coloca en uno de los extremos una fijación articulada, que recibe el nombre de gemela. Para mantener las láminas alineadas se dispone de abrazaderas, y al mismo tiempo, un perno pasante

transversalmente, que une todas las hojas, denominado capuchino. Pueden disponerse en sentido longitudinal o transversal.

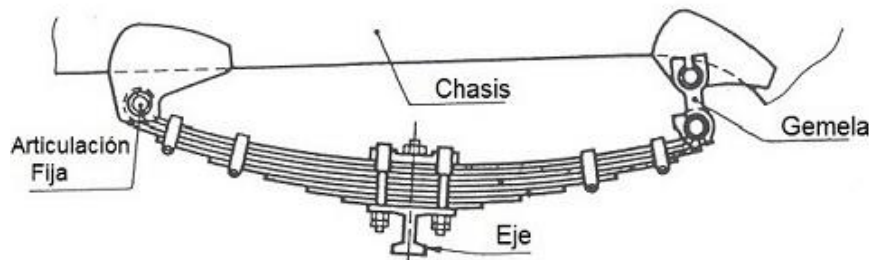


Figura 2.6: Ubicación en el vehículo de una ballesta con gemela

Fuente: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn73.htm>

El uso de ballestas permite, cumplir con las funciones de guiado y sujeción del eje, por lo que se puede prescindir de elementos de guiado, facilidad de fabricación y reparación de las hojas dañadas, y a su vez la posibilidad de modificar el tarado de la suspensión añadiendo o quitando hojas.

2.1.5.1.3 Barras de torsión

Este componente basa su funcionamiento en la torsión o revirado de una barra de sección circular, empotrada en uno de sus extremos a la carrocería y solidaria en el otro extremo a un brazo de suspensión giratorio.

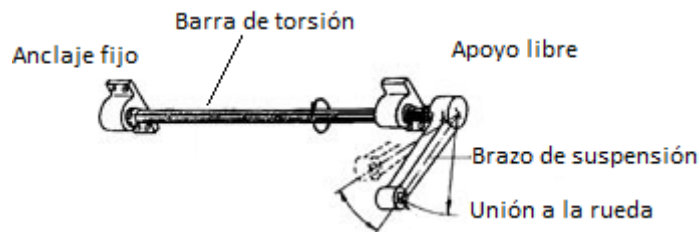


Figura 2.7: Principio de funcionamiento de una barra de torsión

Fuente: <http://suspensionautomotriz1993.blogspot.com.es/2012/09/suspension-automotriz.html>

Cuando la rueda experimenta un movimiento de translación debido a las irregularidades del terreno, la barra de torsión acumula energía lo cual le permite recuperar la posición inicial tras cesar la sollicitación que mantiene la barra revirada. Es independiente de cada rueda y puede colocarse tanto transversal como longitudinalmente.

2.1.5.1.4 Barras estabilizadoras

Es una barra de acero (maciza o hueca) que se encuentra fijada en sus extremos a los elementos de suspensión de cada rueda y al bastidor mediante puntos de apoyo sobre los que puede girar. Interfiere en el sistema de suspensión, aunque en principio no forma parte de él, forma parte de los elementos de seguridad activa del vehículo. Se puede asociar como una barra de torsión dispuesta transversalmente.

Su principio de funcionamiento es compensar la inclinación de la carrocería ante pares de vuelco originados por la transferencia de cargas entre ruedas que producen movimientos de balanceo. Con ello se consigue descargar de trabajo a los elementos elásticos del vehículo.

A continuación, se observan dos casos distintos producidos por la presencia y no presencia de la barra estabilizadora.

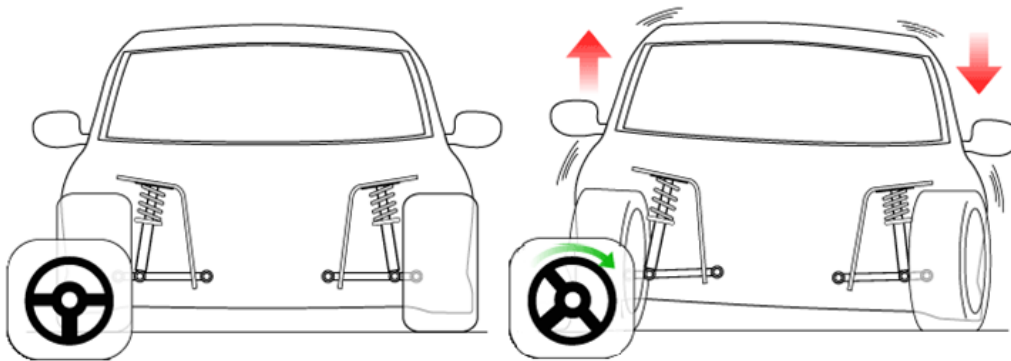


Figura 2.8: Balanceo producido en un vehículo sin barra estabilizadora

Al realizar el giro a derechas sin la presencia de la barra estabilizadora (fig. 2.8), el balanceo es muy acusado cargando en mayor medida la rueda izquierda.

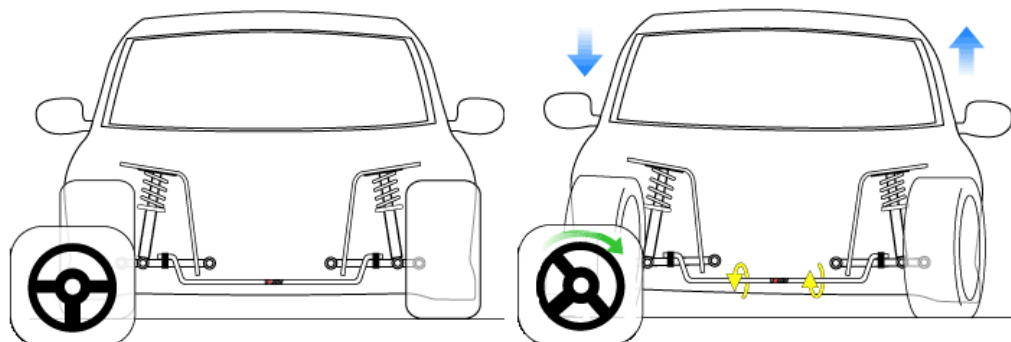


Figura 2.9: Balanceo producido en un vehículo con barra estabilizadora

Fuente: http://ultracing.my/v1/?page_id=2267

Con la barra estabilizadora (fig. 2.9), el balanceo es menor debido a que la fuerza centrífuga se compensa con el par de torsión de la barra y mantiene estable el chasis.

2.1.5.2 Amortiguadores

Cuando sobre un elemento elástico deformado se suprime la fuerza de sollicitación, este recupera su posición y forma original, aunque su propia inercia produce una reacción oscilante. Esta reacción oscilante provoca en el vehículo un movimiento de balanceo, con lo que la suspensión realiza movimientos de compresión y extensión.

Mediante los amortiguadores, se reducen los balanceos absorbiendo las oscilaciones de los elementos elásticos, que de no ser controladas provocarían en el vehículo movimientos desestabilizadores que persistirían indefinidamente.

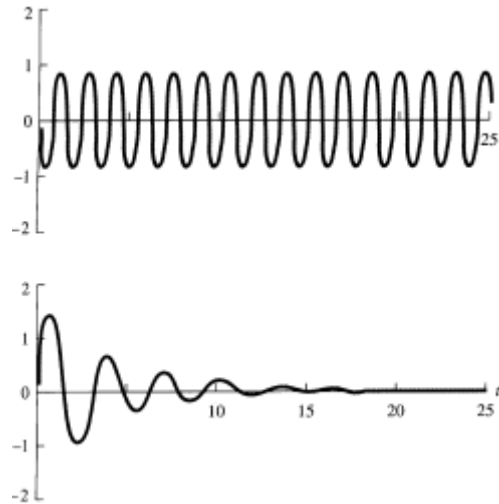


Figura 2.10: Vibraciones libres no amortiguadas y respuesta amortiguada

Fuente: Apuntes asignatura Vibraciones Mecánicas, Grado en Ingeniería Mecánica UPNA

Los amortiguadores transforman la energía mecánica del muelle en energía calorífica, calentándose un fluido contenido en el interior del amortiguador. Este fluido, normalmente aceite, se comprime obligándole a pasar por orificios o válvulas de paso. Se pueden agrupar dentro de las siguientes variantes:

- Hidráulicos
 - Mecánicos de fricción
 - De gas
- { - Giratorios

{ - De pistón

{ - Telescópicos

Hoy en día, los amortiguadores mecánicos de fricción están en desuso frente a los de tipo hidráulico y de gas. Estos últimos son una variante de los amortiguadores hidráulicos, con similar disposición y principio de funcionamiento, pero con la presencia de un depósito de gas, generalmente nitrógeno.

El funcionamiento de los amortiguadores hidráulicos está basado en la resistencia al paso de un líquido de viscosidad determinada, por uno o más orificios de pequeño diámetro. Los aceites utilizados (tanto de tipo mineral como sintéticos), deben poseer un alto índice de viscosidad (capacidad de conservar el grado de viscosidad al variar la temperatura), para que el efecto de frenado en el amortiguador sea lo menor posible. Existen dos tipos distintos de amortiguadores de tipo telescópico de funcionamiento hidráulico: Bitubo y monotubo.

2.1.5.2.1 Amortiguadores bitubo

En el diseño bitubo, se combina la acción del paso del fluido a través del pistón con el desplazamiento del fluido hacia/desde la cámara reguladora. Contiene un pistón de doble efecto que se desplaza por la acción de un vástago, lo que obliga al aceite a pasar a través de la válvula de pie. En la parte superior del tubo exterior queda un espacio donde se encuentra nitrógeno a una presión entre 2.5 y 5 bar.

Al comprimirse, se produce un exceso de aceite en la parte inferior del tubo interior. El aceite que se ha desplazado, se almacena en la cámara igualadora, conduciendo el calor a la parte exterior del amortiguador y reduciendo la temperatura del fluido hidráulico.

Durante el movimiento de extensión, se crea un vacío en la parte inferior del tubo interior y un volumen de aceite pasa a través de las válvulas del pistón (desde la cámara superior a la inferior del tubo interior) y al mismo tiempo, vuelve a través de un orificio en la válvula de pie desde la cámara igualadora.

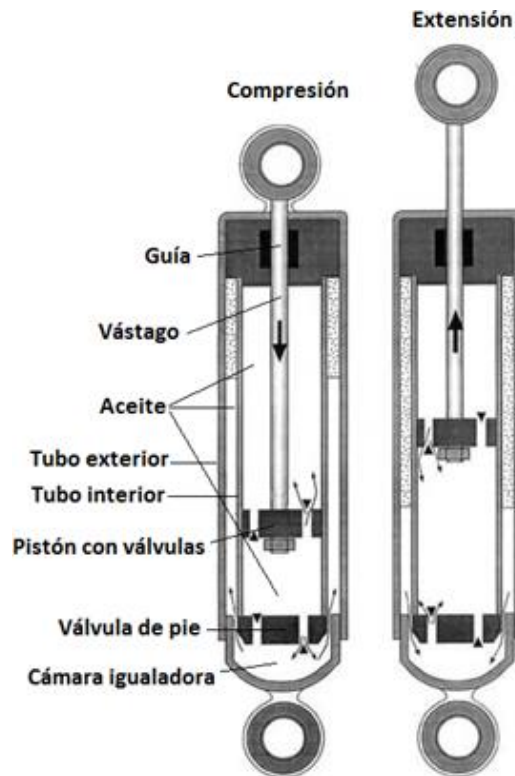


Figura 2.11: Partes y funcionamiento de un amortiguador bitubo

2.1.5.2.2 Amortiguadores monotubo

Este diseño incorpora un dispositivo de cierre en la parte inferior, por medio de un pistón flotante en contacto con el fluido, y soportado por la presión de un gas, normalmente nitrógeno.

Comparte con el diseño bitubo una serie de semejanzas. Tienen el mismo principio de funcionamiento, en el que un pistón se desplaza arrastrado por un vástago dentro de un tubo de aceite y para ambos diseños las válvulas no trabajan igual en compresión que en tracción.

Por otra parte, el diseño monotubo presenta ventajas respecto del bitubo. La respuesta es más instantánea, mejor refrigeración, menor peso y funcionamiento más silencioso (la presión del gas oscila entre 20 y 30 bares). Esta mayor presión evita la cavitación y formación de espuma del aceite.

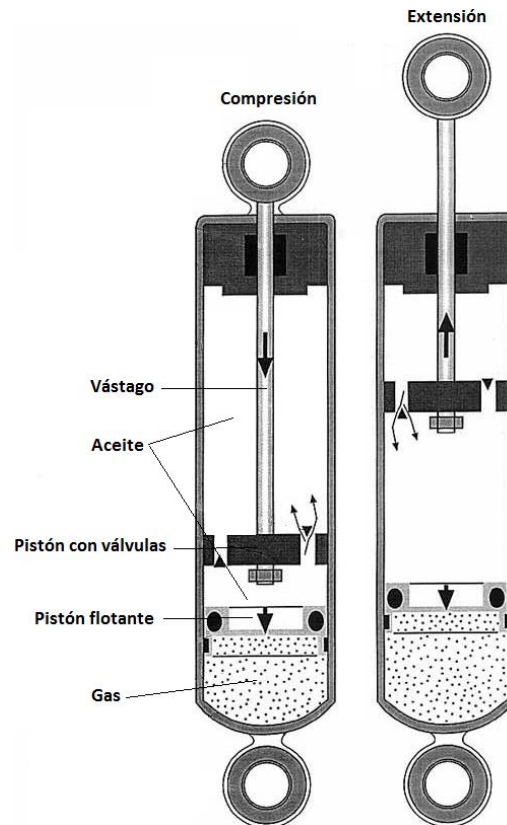


Figura 2.12: Partes y funcionamiento de un amortiguador monotubo

Fuente: <http://autofluids.ru/>

2.1.5.3 Elementos estructurales

Se engloba como el conjunto de elementos que sirven de sujeción y guiado de la rueda en su desplazamiento, permitiendo el correcto funcionamiento de la suspensión y la amortiguación, además de interrelacionarlos con el resto de dispositivos de tracción/propulsión y dirección. Son los siguientes:

- Trapecios
- Brazos
- Tirante
- Mangueta
- Rótulas/Articulaciones/Silentblocks

Como se ha señalado en puntos anteriores, estos elementos estructurales no suelen emplearse en los casos que se utilicen ballestas como elemento elástico, debido a las cualidades que estos ofrecen como elementos resistentes y de guiado. Por tanto, los elementos elásticos más empleados con este tipo de elementos estructurales suelen ser los muelles helicoidales y barras de torsión.

2.1.5.3.1 Trapecios

La función principal de los trapecios de suspensión es la de dar soporte y fijación a la mangueta, a la cual están unidos a través de una rótula por medio de la cual puede pivotar. La

mangueta soporta la rueda y sus elementos anexos. Por lo tanto, los trapecios ayudan al guiado del conjunto mangueta-rueda en sus recorridos oscilantes.

Están fabricados en acero macizo, en chapa de acero siendo huecos en su interior, o por fundición de aluminio. En función del tipo de sistema de suspensión empleado, se puede disponer de uno o dos trapecios por rueda (inferior o inferior y superior).

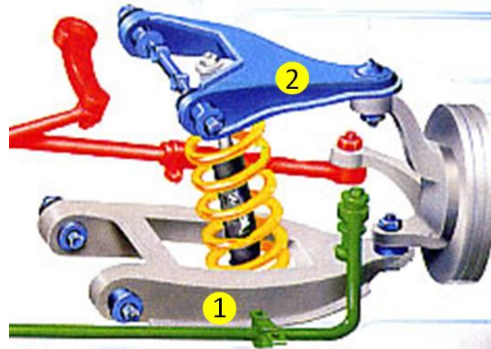


Figura 2.13: Ubicación trapecio superior e inferior en una suspensión

Fuente: <http://www.aficionadosalamecnica.net/suspension3.htm>

La unión y pivotamiento de los trapecios a la carrocería se realiza a través de dos articulaciones, directamente al chasis o a través del subchasis y con la presencia siempre de silentblocks.

2.1.5.3.2 Brazos

La diferencia entre un brazo de suspensión respecto de un trapecio, recae en su arquitectura. Los brazos únicamente poseen un punto de fijación a la carrocería. Sirven de guiado a la rueda aunque no impiden que se produzcan oscilaciones longitudinales de la misma (deben ser contrarrestadas por un tirante de reacción). Se fabrican en acero macizo, en chapa o incluso en aluminio.

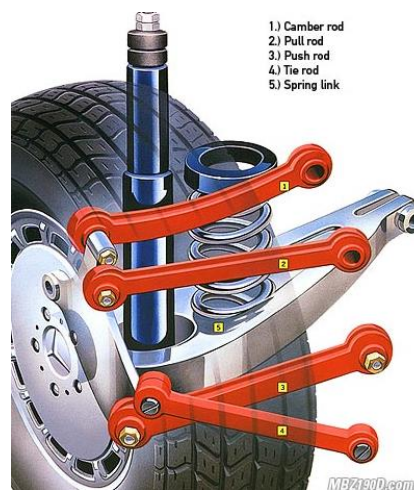


Figura 2.14: Diferentes brazos pertenecientes a una suspensión multibrazo

Fuente: <http://www.MBZ190D.com>

2.1.5.3.3 Tirantes

Los tirantes de reacción son un complemento de algunos elementos de suspensión, a través de los cuales no es posible conseguir un guiado y sujeción de la rueda suficientemente efectivo. Con su disposición se evitan alteraciones en la geometría de la misma y sus ángulos.

Además, se emplean como soportes de la barra estabilizadora, lo que permite ubicarla en una posición más adecuada.

2.1.5.3.4 Manguetas

Componente estructural en el que se fijan la mayoría de elementos de dirección y suspensión (directa o indirectamente), así como la rueda. Entre los requisitos que debe satisfacer destaca el de aunar gran rigidez, para transmitir sin interferir en ellos os esfuerzos que soporta, con cierto grado de flexibilidad, que no supongan roturas por exceso de fragilidad y poseer gran resistencia a fatiga. Como consecuencia, se fabrican en acero con excelentes cualidades mecánicas.



Figura 2.15: Mangueta (asociada a suspensión McPherson).

Fuente: <https://www.carid.com/steering-knuckles-spindles.html>

La mangueta transmite los distintos esfuerzos generados por la rueda durante la conducción, pero no gira con ella. En el interior de la mangueta, se dispone un rodamiento -de bolas o rodillos-, el cual permite el giro del buje, que es el elemento sobre el cual se fija la llanta del vehículo (ver figura a continuación).

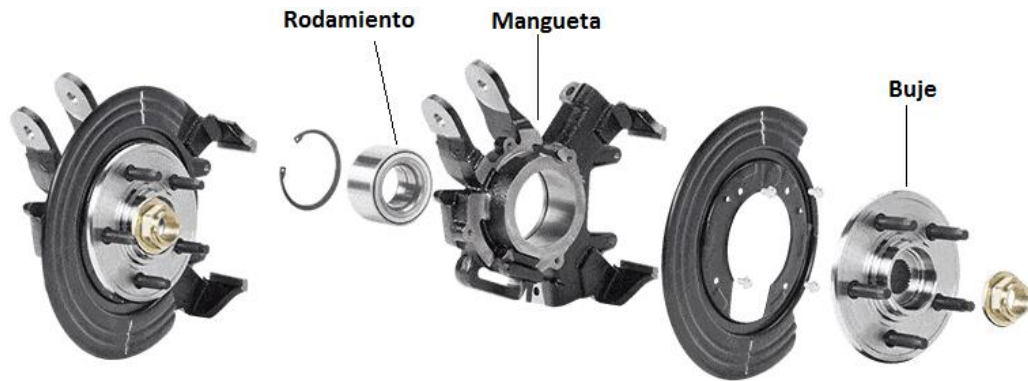


Figura 2.16: Estructura del conjunto mangueta-buje.

Fuente: <http://www.moogparts.com/parts/wheel-end/complete-knuckle-assemblies.html>

Cuando el buje está dispuesto en el eje motriz, dispone en su interior de un estriado donde se engrana el extremo del palier de transmisión, a través del cual se transmite el movimiento del motor desde el diferencial.



Figura 2.17: Buje estriado y pernos de sujeción

Fuente: <https://www.carid.com/dorman/wheel-hub.html>

La geometría de las manguetas varía en gran medida en función del tipo de sistema de suspensión al que va asociado.

2.1.5.3.5 Articulaciones, rótulas y silentblocks´

Sirven como elementos de unión de los distintos componentes descritos en los apartados anteriores. Estos elementos de unión deben poder absorber las oscilaciones producidas en la suspensión durante la rodadura del vehículo, sin interferir en la transmisión del movimiento.

La rótula es el elemento de unión más utilizado. Permite la transmisión de movimiento entre dos componentes (uno es solidario al extremo de la esfera y el otro elemento es solidario al alojamiento de la esfera) a la vez que posibilita adoptar distintas posiciones relativas. Por ello, permite combinar el movimiento vertical del sistema de suspensión con la rueda, con el movimiento de dirección del vehículo, manteniendo la misma geometría de la suspensión.



Figura 2.18: Rótula

Fuente: <https://www.carid.com/ball-joints.html>

Cuando el único requisito en la articulación de dos elementos a unir solo requiere de giro, y no necesita variar de posición angular, se utilizan silentblocks. Su empleo permite evitar la transmisión de ruidos y vibraciones al mismo tiempo que dota de elasticidad a la articulación. En su interior posee un aislamiento de goma.



Figura 2.19: Silentblocks

Fuente: <https://www.carid.com/control-arm-bushings-hardware.html>

2.1.6 Tipos de sistemas de suspensión

Las suspensiones pueden clasificarse en dos grupos. Por una parte, las suspensiones independientes, permiten el movimiento vertical de cada rueda del eje por separado, para así poder adaptarse a las distintas condiciones de la calzada. Por el contrario, en las suspensiones de eje rígido, las ruedas están unidas a los extremos de una barra. Por este motivo, cuando una de las ruedas experimenta un desplazamiento vertical, la otra rueda actúa en sentido contrario, balanceando el vehículo.

2.1.6.1 Suspensión McPherson

Esta suspensión se engloba en las de tipo independiente y es el sistema más empleado en turismos en el eje delantero (uso en eje trasero en menor medida). Dispone de una columna telescópica donde se acoplan conjuntamente el muelle que trabaja como elemento elástico y el amortiguador, que se sitúa dentro del muelle. La disposición es concéntrica, aunque la tendencia actual es que los ejes de simetría de los dos componentes no coincidan.

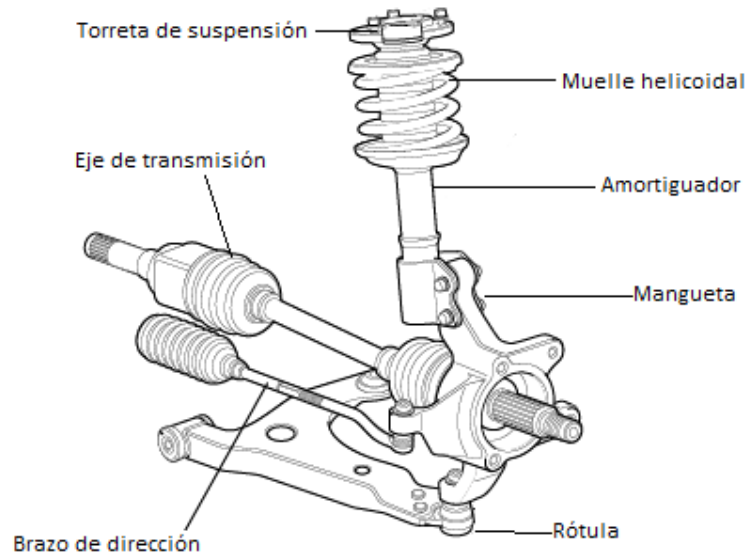


Figura 2.20: Estructura suspensión McPherson

Fuente: <https://clearmechanic.com>

El conjunto va fijado en su parte superior a la carrocería del vehículo, en la denominada torreta de suspensión, a través de un rodamiento de agujas que facilita el giro del conjunto muelle-amortiguador con la rueda. Por su parte inferior se fija a la mangueta mediante tornillos que lo fijan a modo abrazadera.



Figura 2.21: Suspensión McPherson perteneciente a un eje delantero

Fuente: <https://www.actualidadmotor.com/la-suspension-mcpherson/>

Estas suspensiones destacan por ofrecer las siguientes ventajas:

- Sistema muy simple. Únicamente es necesario un trapecio o brazo y tirante, debido a la función resistente de la columna.
- Compacidad y facilidad de montaje y desmontaje del conjunto.
- Idóneo para su uso en el eje delantero debido a que se permite el giro del conjunto a la vez que la rueda en los movimientos de dirección.

2.1.6.2 Paralelogramo deformable

Este sistema de suspensión independiente cuenta con una estructura formada por dos trapecios superpuestos, con una disposición paralela entre ambos y unidos a la mangueta por medio de sendas rótulas, como se puede observar en la figura 2.22.

Variando la configuración de sus parámetros se puede conseguir la geometría deseada para mejorar la estabilidad del vehículo, además de lograr un excelente guiado de la rueda, sin sufrir variaciones en los ángulos que componen la geometría de la rueda.



Figura 2.22: Suspensión de paralelogramos deformables perteneciente a un eje trasero motriz

Fuente: <https://www.audi-technology-portal.de/en/>

El elemento elástico más utilizado es el muelle helicoidal, que puede ubicarse sobre cualquiera de los dos trapecios. La disposición del amortiguador y muelle puede variar, pudiendo ir separados o concéntricos entre sí.

La configuración de paralelogramo deformable es más sofisticado y caro de elaborar frente a una configuración McPherson, aunque propicia un mejor comportamiento dinámico del vehículo.

2.1.6.3 Brazos arrastrados

La suspensión de brazos arrastrados o tirados pertenece a las de tipo independiente, mayoritariamente utilizada en los ejes traseros. Las ruedas traseras son simplemente arrastradas, empleando para ello brazos longitudinales de gran sección y robustez, con su eje de articulación dispuesto en sentido transversal.

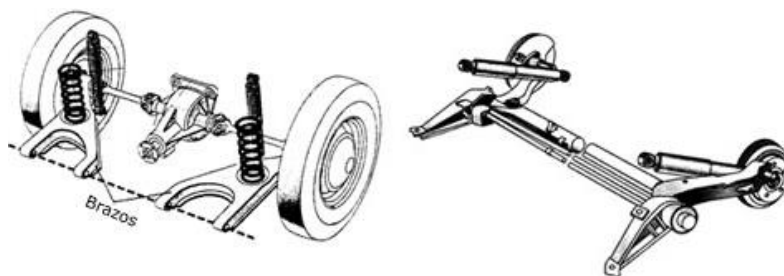


Figura 2.23: Suspensión de brazos arrastrados con muelle helicoidal (izda.) y barras de torsión (dcha.)

Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.net/suspension3.htm>

El empleo de estos brazos permite no utilizar más elementos de guiado adicionales por el hecho de proporcionar un guiado de las ruedas en sus oscilaciones en línea recta muy óptimo. En cambio, frente a curvas de gran apoyo la adherencia se ve reducida.

Pueden utilizarse muelles elásticos o barras de torsión, aunque el uso de estas últimas, al ubicarse transversalmente, permite optimizar el espacio de carga del maletero.

2.1.6.4 Brazos semiarrastrados

Este sistema de suspensión al igual que con la de brazos arrastrados es empleada en ejes traseros pero cuando estos son de tracción trasera. En esta disposición el eje de articulación, en este caso trapecios, se dispone formando un ángulo de 45° respecto a los ejes de coordenadas del vehículo.

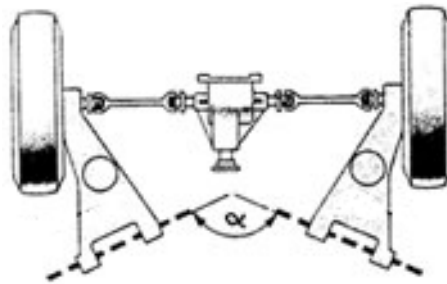


Figura 2.24: Suspensión de brazos semiarrastrados en el eje trasero motriz

Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.net/suspension3.htm>

Se requiere de trapecios por la necesidad de resistir mayores esfuerzos al ser un eje motriz y la disposición oblicua, responde a la atenuación de los movimientos longitudinales (por ejemplo, los que se producen en las aceleraciones desde parado).

La adherencia se ve favorecida al abordar una curva, al obtenerse en la rueda exterior del vehículo un ángulo de caída negativo.

2.1.6.5 Multibrazo

La suspensión multibrazo (también llamada multilink) es un sistema independiente empleado tanto en el eje delantero no motriz como en el eje trasero de vehículos de tracción trasera. Esta suspensión corresponde con una evolución de la ya citada suspensión de paralelogramo deformable.

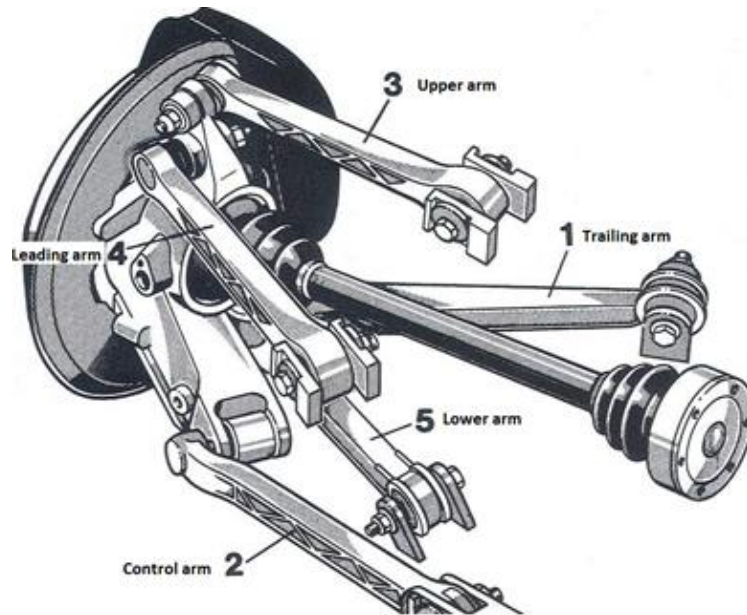


Figura 2.25: Brazos de una suspensión multibrazo

Fuente: <http://metize.us/5-link-suspension-design/>

Proporciona un eficaz guiado de las ruedas en sus oscilaciones, al mismo tiempo que absorbe todas las reacciones dinámicas que se generan en ellas, debido al par que se les aplica. Además permite variar la geometría de las ruedas durante el guiado, con el fin de adoptar los ángulos más idóneos para cumplir con sus funciones. Estos ángulos suelen ser el de caída y convergencia, reduciendo sus valores en la rueda exterior cuando se toma una curva, para favorecer la uniformidad de la pisada del neumático y con ello la adherencia del vehículo.

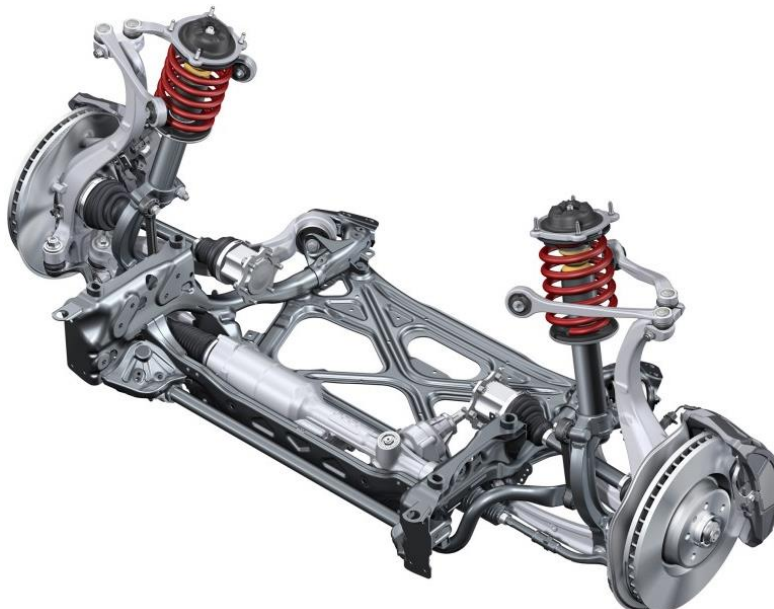


Figura 2.26: Suspensión multibrazo en un eje delantero no motorizado

Fuente: <https://www.audi-technology-portal.de/en/>

Se utilizan hasta cinco elementos de sujeción y guiado (trapecios, brazos, tirantes) que forman una estructura de gran complejidad y de coste elevado, pero que aporta gran efectividad, estabilidad y confortabilidad.

Como componente elástico suele emplearse muelles helicoidales, aunque se está extendiendo la utilización de elementos neumáticos al disponerse conjuntamente con suspensiones de tarado variable.

2.1.6.6 Suspensión de eje rígido

Sistema de suspensión dependiente en el que las posiciones espaciales de las ruedas de un mismo eje están relacionadas. Está formado por una barra transversal que restringe el movimiento de una rueda respecto de la otra, con una disposición concéntrica con el eje que une ambas ruedas.

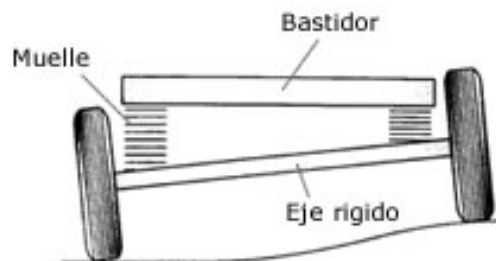


Figura 2.27: Concepto de eje rígido

Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.net/suspension3.htm>

En la actualidad solo está presente en vehículos utilitarios de gama muy baja o en vehículos pesados, así como algunos vehículos todo terreno, al asegurar el contacto de las ruedas con el suelo en las peores condiciones de adherencia.

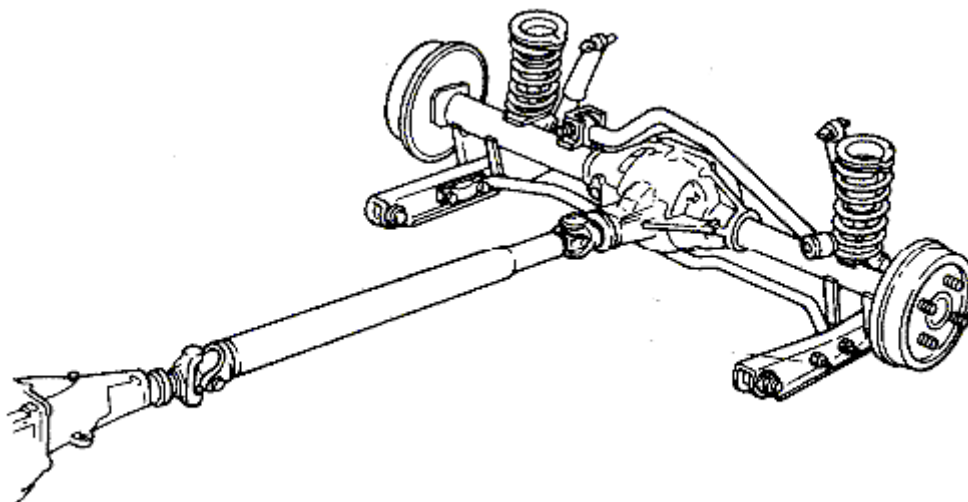


Figura 2.28: Suspensión de eje rígido en un eje trasero

Fuente: <https://www.monroe.com.au/>

Presenta una serie de ventajas frente a la mayoría de los sistemas de suspensión, como la robustez y sencillez del conjunto frente a elementos individuales, el balanceo producido en el vehículo no afecta al ángulo de caída de las ruedas, con lo que se consigue un desgaste menor de los neumáticos, y la ya citada capacidad de mantener siempre las ruedas en contacto con el suelo.

Por otra parte, presenta varios inconvenientes, destacando el menor grado de confortabilidad, la transmisión de oscilaciones de una rueda a otra, elevado peso del conjunto y el gran espacio necesario.

2.1.6.7 Suspensión semindependiente

Este tipo de suspensiones son un intermedio entre una suspensión independiente (brazos arrastrados) y un eje rígido, al estar compuestas por un tubo rígido que une ambas ruedas de un mismo eje y soportes articulados que se unen al chasis del vehículo, los cuales permiten movimientos longitudinales del sistema de suspensión y giro de las ruedas.

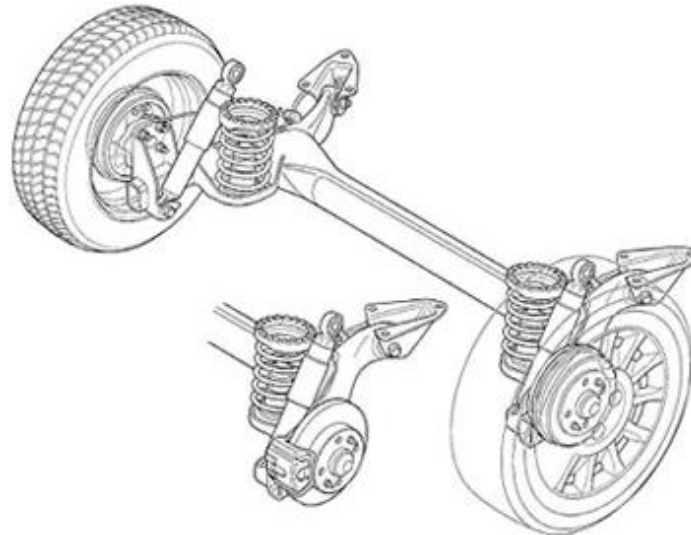


Figura 2.29: Suspensión semindependiente en el eje trasero

Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.net/suspension3.htm>

El tubo rígido, que actúa como elemento transversal, es rígido a flexión pero deformable a torsión, permitiendo el balanceo y asimilando el funcionamiento a una barra estabilizadora. Es un sistema compacto y económico.

2.2 Ensayos estructurales

Dentro de las distintas fases de desarrollo del componente, la ejecución de ensayos estructurales sobre prototipos permite garantizar el cumplimiento de las especificaciones de diseño del producto mediante la caracterización de las propiedades mecánicas y del comportamiento a fatiga. Así mismo, los resultados de dichos ensayos permitirán también ajustar los modelos virtuales desarrollados en las fases tempranas de diseño y optimización del componente.

De esta forma, la ejecución de ensayos estructurales en laboratorio permite acortar (y abaratar) tiempos de desarrollo del producto.

A continuación, se describen las etapas típicas del desarrollo de producto:

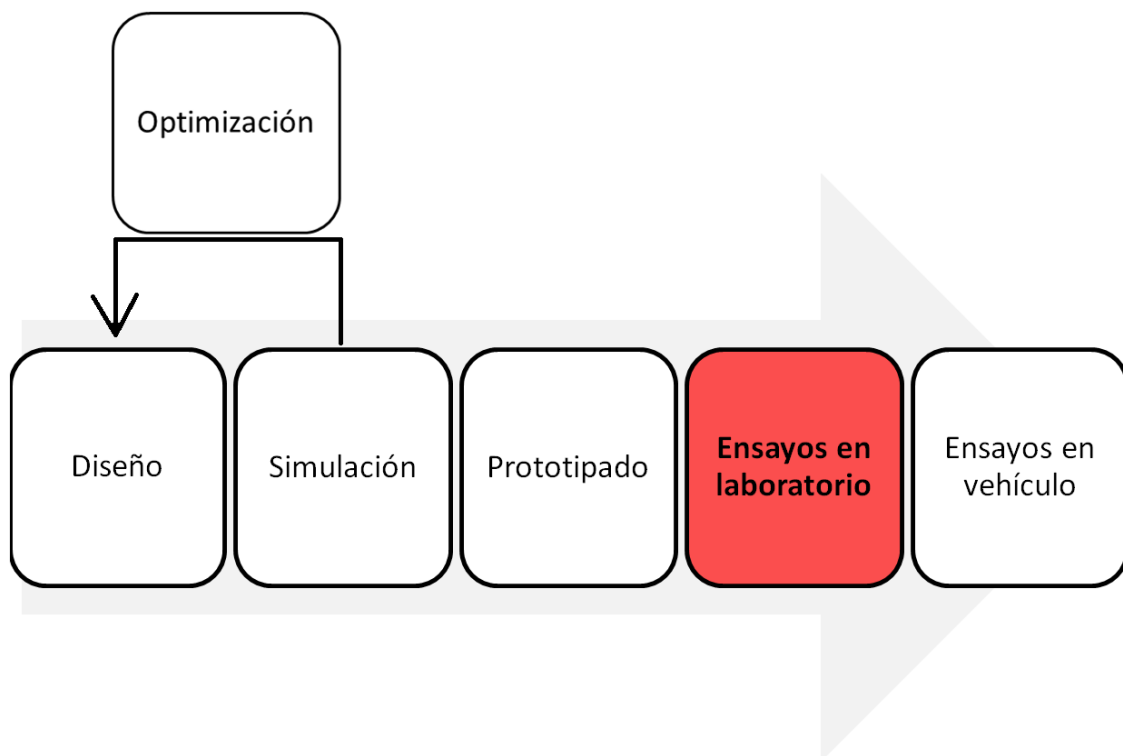


Figura 2.30: Etapas en el desarrollo de producto

2.2.1 Tipos de ensayo

2.2.1.1 Ensayos estáticos o de resistencia

Ensayo que consiste en la aplicación de cargas cuasi-estáticas (aplicación de carga a muy baja frecuencia). De esta forma, los esfuerzos se aplican de forma progresiva según la dirección y sentido establecidos hasta alcanzar la magnitud objetivo o lograr la rotura de la pieza (lo que ocurra primero).

El objetivo es determinar los límites a fluencia del componente (a partir de los cuales el componente se comportará de forma plástica y no elástica), y además, obtener la carga máxima a rotura.

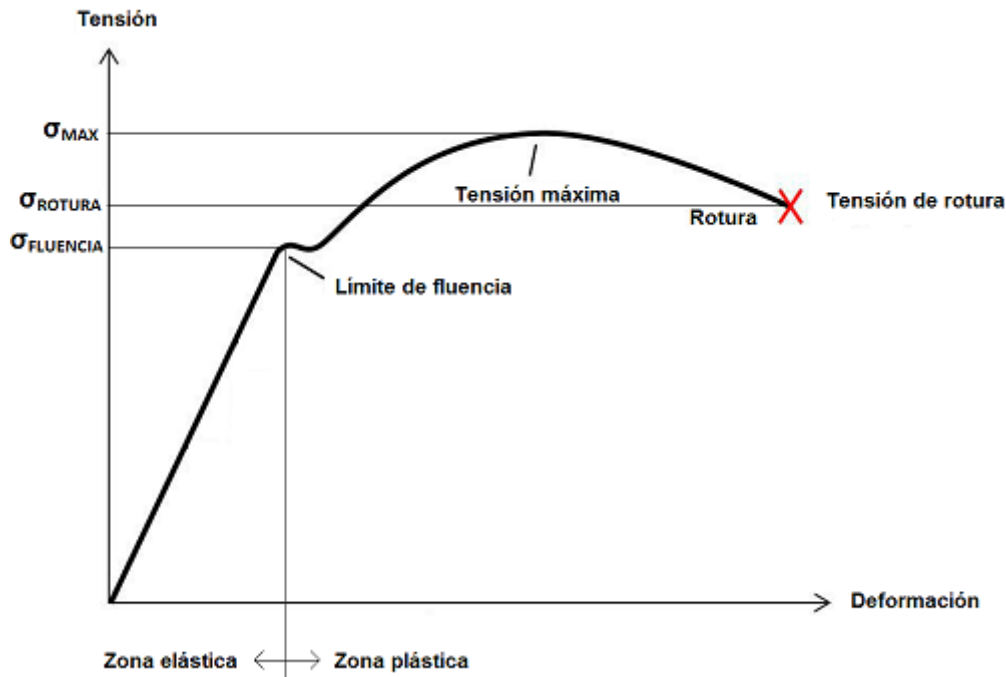


Figura 2.31: Curva tensión-deformación

Fuente: <http://www.instructables.com/id/Steps-to-Analyzing-a-Materials-Properties-from-its/>

Al producirse el fallo, la pieza pierde la configuración geométrica por la cual ha sido diseñado para su funcionamiento. El fallo se presenta de cuatro modos distintos:

- Rotura: La pieza se rompe.
- Plastificación: La pieza adquiere una deformación permanente al haberse superado el límite de fluencia.
- Fallo por excesiva deformación elástica: La deformación residual de la pieza (sin llegar al límite de fluencia) son perjudiciales para su funcionamiento.
- Fallo por desgaste: En la pieza aparecen holguras.

2.2.1.2 Ensayos de fatiga

Ensayo que consiste en la aplicación de cargas cíclicas con magnitud variable capaces de provocar tensiones variables en el espécimen de ensayo. La aplicación continuada en el tiempo de esfuerzos variables puede provocar la rotura del componente incluso si estos esfuerzos son mucho más pequeños que el límite elástico del material; es el fenómeno conocido como fatiga.

El objetivo es determinar el comportamiento y la durabilidad del componente bajo cargas cíclicas.

La rotura por fatiga comienza cuando aparece una microgrieta que se produce por la superación local del límite elástico, por pequeños defectos o concentradores de tensión. Esta microgrieta va creciendo mientras se suceden los ciclos de carga hasta que la sección residual de la pieza no es capaz de soportar la carga máxima del ciclo y la sección se rompe.



Figura 2.32: Distintas zonas en la cara de rotura producidas por fatiga

En la cara de rotura se crean distintas zonas:

- I. Grieta o punto inicial de rotura
- II. Zona suave con líneas de propagación de la grieta o frentes de playa
- III. Zona rugosa (sección residual) en la que se produce la rotura final

2.2.2 Sistemas de ensayo servo-hidráulicos

Un laboratorio capacitado para realizar ensayos estructurales cuenta con una distribución hidráulica (figura 2.33), la cual permite transportar distintos rangos de caudal a una determinada presión de funcionamiento.

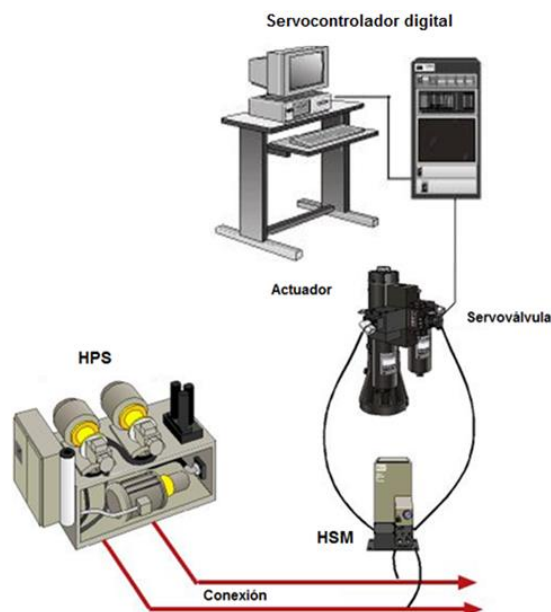


Figura 2.33: Layout hidráulico de un laboratorio de sistemas hidráulicos

Fuente: <https://www.mts.com/en/index.htm>

El circuito comienza en la HPS (Hydraulic Power Supply). A través de las distintas HSM (Hydraulic Service Manifold) se distribuye hacia las servoválvulas, controladas a través de un servocontrolador digital. Por último, los actuadores reciben la presión proveniente de las servoválvulas.

2.2.2.1 Sistemas hidráulicos

2.2.2.1.1 HPS

La HPS o sistema de potencia hidráulica es un componente robusto y compacto que suministra energía hidráulica y que proporciona la funcionalidad de un sistema hidráulico. Integra 6 bombas hidráulicas, depósito de aceite, los filtros y los acoplamientos de soporte a tierra en un colector.



Figura 2.34: Unidad HPS

Fuente: <https://www.mts.com/en/products/producttype/test-components/hydraulic-power-distribution/hydraulic-power-units/index.htm>

Esta HPU es la encargada de proporcionar una presión de trabajo constante en el sistema hidráulico; en función de la demanda de caudal a cubrir, el sistema de gestión PLC “Run on Demand” activa en tiempo real las bombas para satisfacer las necesidades de caudal de aceite demandadas por la instalación.

2.2.2.1.2 HSM

La unidad HSM o sistema de distribución hidráulica permite, por un lado, la entrega de presión de forma independiente a cada uno de los ensayos del laboratorio. De esta forma se garantiza un control preciso y el aislamiento en la distribución del fluido hidráulico proporcionados por la HPU, permitiendo eliminar la presión hidráulica sólo en aquellos ensayos en los que sea necesario sin afectar al resto. En la siguiente imagen se muestra una HSM con 2 salidas independientes.



Figura 2.35: Conjunto HSM con dos unidades HPU

Fuente: https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/dev_002101.pdf

Por otro lado, mediante la utilización de HSMs se garantiza una aplicación inicial de potencia hidráulica segura al ensayo, permitiendo para cada salida hidráulica establecer 2 niveles de presión ajustable: baja presión y alta presión.

El nivel de baja presión se utiliza durante la aplicación inicial de potencia hidráulica el ensayo para garantizar que los sistemas de control funcionan correctamente sin posibilidad de dañar componentes del banco. El nivel de alta presión se utiliza durante la ejecución del ensayo, una vez se ha comprobado el correcto comportamiento del banco en baja presión.

2.2.2.2 Servoválvula

Se emplean en circuitos cerrados para el control de alta precisión de la energía hidráulica. Una corriente eléctrica atraviesa las bobinas de la servoválvula y crea un par que desplaza la varilla creando un desequilibrio de presiones. Este desequilibrio afecta al carrete (spool) desplazándolo, permitiendo la entrada o la salida de presión al actuador.

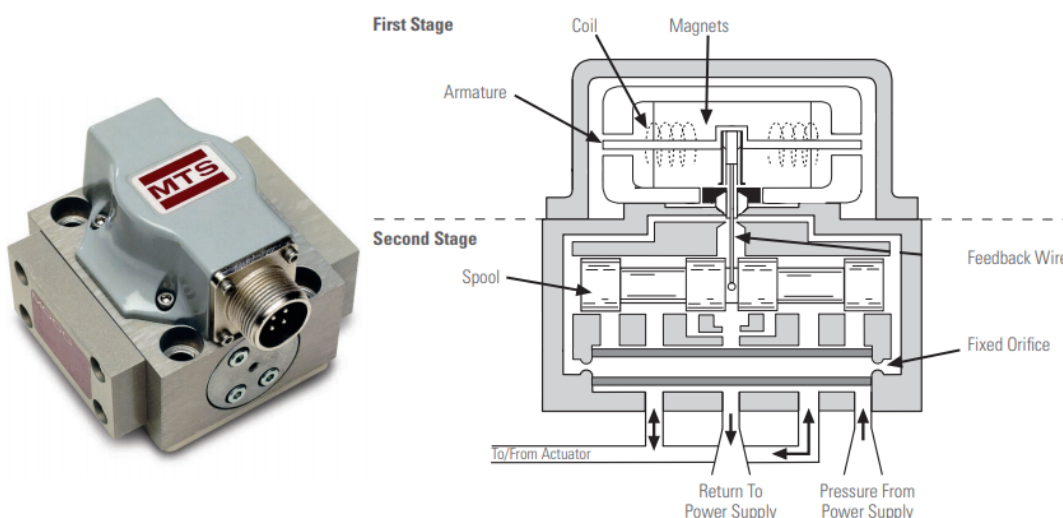


Figura 2.36: Servoválvula de dos etapas

Fuente: https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_006302.pdf

2.2.2.3 Actuadores hidráulicos

Alimentados con un fluido a presión se obtiene un movimiento lineal con una determinada fuerza y rampa de velocidad. La potencia que suministra al actuador es producto de la presión y el caudal de fluido hidráulico.



Figura 2.37: Actuador hidráulico con dos swivels y servoválvula

Fuente: https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_4036562.pdf

El pistón en su parte intermedia tiene un diámetro mayor, debido a que es en estas superficies donde incide el fluido hidráulico a presión. Dispone en su extremo superior un rodamiento interno que reduce las pérdidas por rozamiento.

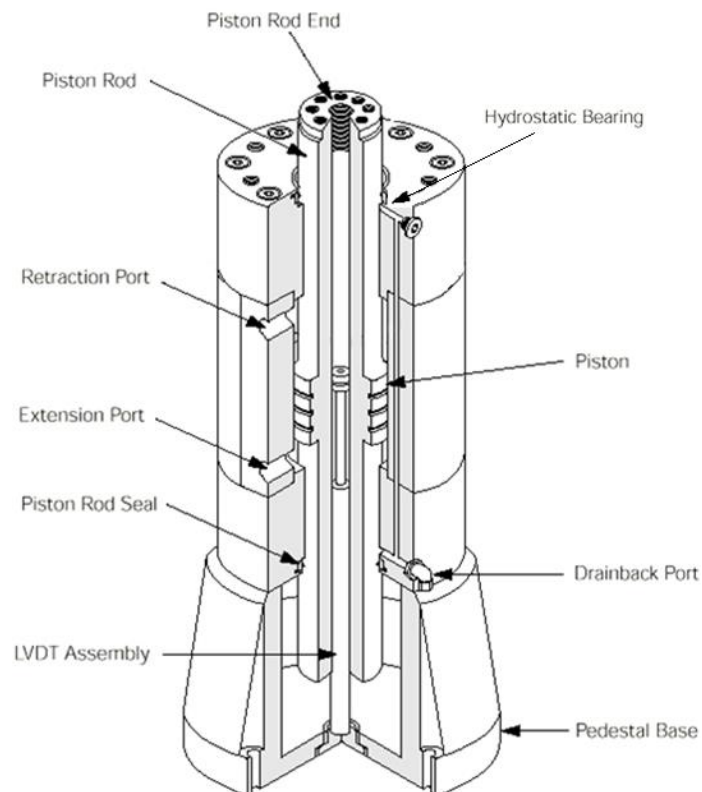


Figura 2.38: Vista interior de un actuador hidráulico

Fuente: https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_4036562.pdf

El actuador se complementa con transductores. Estos dispositivos proporcionan un valor de salida que tiene una relación directa con un parámetro que se quiere medir y conocer y permiten el control en lazo cerrado del actuador. Se diferencian 2 tipos de transductores:

-LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Es utilizado como transductor de desplazamiento. El núcleo se monta dentro de la varilla del pistón hueco y está fijado por la carcasa trasera del actuador. Cuando el actuador se desplaza, el LVDT se deforma en longitud.

-Célula de carga. Al aplicarse una fuerza sobre el elemento elástico produce una deformación. Es posible detectar la deformación a través del transductor y conociendo la rigidez de la célula de carga, se convierte en una salida medible, en este caso se obtiene el valor de fuerza aplicado.



Figura 2.39: Transductor de fuerza, célula de carga

Fuente: <https://www.mts.com/en/products/producttype/test-components/grips-fixtures-accessories/load-cells-force-transducers/index.htm>

Los distintos modelos de actuadores vienen determinados por dos magnitudes, como son el desplazamiento y la fuerza. El desplazamiento depende del LVDT. Los ratios de fuerza parten de los 10kN hasta 250kN.

Las rótulas -o swivels por su nombre comercial-(figura 2.40) son dos componentes ubicados en sendos extremos del actuador, por lo que se deben seleccionar con el mismo ratio de fuerza que el actuador al que se acople. Su estructura les otorga dos grados de libertad.



Figura 2.40: Swivels pertenecientes a un actuador hidráulico. Base (izda.) y varilla final (dcha.)

Fuente: <https://www.mts.com/en/products/producttype/test-components/actuators-hydraulic-components/swivels/index.htm>

Los actuadores lineales solo ejercen fuerza en una dirección. Existen casos en los que se ensayan piezas con un cierto ángulo respecto del actuador. Esto provoca la generación de tensiones laterales desfavorables en el pistón interior del actuador que pueden dañar las juntas de estanqueidad del mismo y el pistón. Por lo tanto, el uso de swivels permite absorber las desalineaciones que se producen evitando la generación de momentos y fuerzas de flexión sobre el vástago.

En función del tipo de ensayo pueden darse variaciones en el uso de swivels. En ensayos estáticos (se alcanzan cargas mayores) se utilizan swivels. En cambio, en ensayos de fatiga, donde se alcanzan cargas menores, pueden utilizarse swivels o sustituir estas por un utillaje que absorba las desalineaciones, como una barra flexible.

2.2.3 Componentes auxiliares

Conjuntamente con el sistema hidráulico, en un laboratorio capacitado para realizar ensayos estructurales se encuentra utillaje modular que permite diseñar y montar los distintos layouts de los ensayos en función de las distintas disposiciones geométricas que estos necesitan.

Estos utillajes deben resistir las cargas producidas en un ensayo, como la fatiga generada al formar parte de numerosos layouts en su ciclo de vida. Están compuestos de acero F114 (DIN C45). Cuentan con agujeros de anclaje de diferentes métricas pero todos con paso 100 milímetros.

La tornillería utilizada depende de los elementos a fijar variando la longitud, cabeza hexagonal o de tipo Allen. La calidad mínima utilizada es 8.8 (Resistencia a la tracción=800MPa, Límite elástico=640MPa).

- Bancada: Es la base fija sobre la que se colocan el resto de utillajes modulares, sistema hidráulico y espécimen a ensayar. Cuenta con unas guías longitudinales que permiten incorporar las T's de amarre. Se encuentran aisladas neumáticamente del edificio para evitar la propagación de vibraciones.



Figura 2.41: Bancada

- Amarre en T: Utillaje que permite anclar y fijar los elementos respecto de las guías de la bancada. Pueden desplazarse por toda la guía.

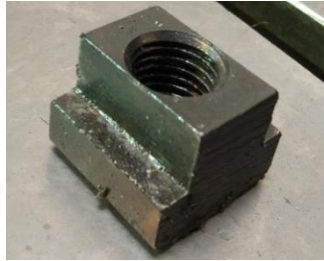


Figura 2.42: Amarre en T

- Placa base: Componente que permite unir las columnas a la bancada. Cuenta con guías longitudinales que permiten que el elemento que se fije pueda desplazarse por ellas para optimizar su disposición.



Figura 2.43: Placas base de distinto tamaño

- Columnas y vigas: Elementos que permiten elevar la altura del ensayo. Existen de distintos tamaños para optimizar su uso en los layouts. Perfiles en H.



Figura 2.44: Distintas columnas en función de la altura

- Escuadra reguladora: Es un utilaje con forma de escuadra que permite sujetar el actuador y regular la altura a la que este se encuentra, además de proporcionar un refuerzo estructural.



Figura 2.45: Escuadra reguladora

- Pórtico de sujeción: Permite nivelar y soportar el actuador por la parte más alejada a la base. Es recomendable su uso, para liberar esfuerzos en la escuadra reguladora.



Figura 2.46: Pórtico de sujeción

- Columna angular: Elemento auxiliar que permite sustituir a la escuadra reguladora, fijándose a una columna. Además se utiliza para reforzar ensayos de alta carga.



Figura 2.47: Columna angular

- Placa de amarre con colisos: Utillaje de amarre que cuenta con distintas configuraciones para poder fijar distintos actuadores. También cuenta con colisos para poder desplazarse y fijarse en una mejor posición.



Figura 2.48: Placa de amarre que cuenta con 3 disposiciones para actuadores distintos

- Bridas de amarre: Utillaje que permite fijar elementos que no disponen de mecanismos de amarre. Existen distintas configuraciones según la disposición del elemento a fijar.



Figura 2.49: Bridas de amarre con distintas configuraciones

- Cables eléctricos de conexión: Existen dos tipos de cables. Por una parte, los pertenecientes al sistema hidráulico, que habilitan las salidas de las HSM hacia las servo válvulas de los actuadores, permitiendo conmutar entre alta y baja presión.



Figura 2.50: Cables hidráulicos conectados a la unidad HSM

Por otra parte, los cables que conectan con la servoválvula, LVDT y célula de carga, que permiten el flujo de información y controlar el actuador.



Figura 2.51: Conexiones de los cables de control para los actuadores

2.2.4 Hardware y Software de control

2.2.4.1 Controlador Hardware

Un controlador (Flex Test GT, en este caso) lo forma un procesador digital de señal (DSG) y tarjetas de acondicionamiento (entrada y salida) para el control de actuadores: generación de consignas a las servoválvulas y lectura de las señales de realimentación o “feedback” de los sensores (célula de carga y LVDT). Adicionalmente cuenta con señales de entrada y salida analógicas (± 10 Voltios) y/o digitales (0-12 Voltios) para control externo de equipos. Permite realizar funciones distintas:

- Control de sistemas servohidráulicos
- Programación del ensayo
- Establecer límites de seguridad en el ensayo
- Habilitar / deshabilitar presión hidráulica.



Figura 2.52: Controlador

Fuente: https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/dev_003624.pdf

Para la primera función el controlador incorpora un controlador PID (Controlador Proporcional-Integral-Derivativo). Es un mecanismo de control por realimentación para regular, corregir y con ello alcanzar con exactitud los valores deseados de fuerza o desplazamiento del actuador, calculando la desviación o error entre el valor medido y el valor deseado.

Las tres componentes de un controlador PID son: la parte proporcional, acción integral y acción derivativa.

- La parte proporcional determina como de rápido responde el controlador al error producido mediante una señal de control proporcional a la señal de error.
- La acción integral se encarga de reducir y eliminar el error estacionario producido por pequeñas perturbaciones exteriores, que no pueden subsanarse a través del control proporcional. Un valor elevado para la acción integral podría provocar sobre oscilación y resonancia del actuador.
- La acción derivativa mejora la estabilidad al mantener el error mínimo corrigiéndolo a la misma velocidad que se produce.

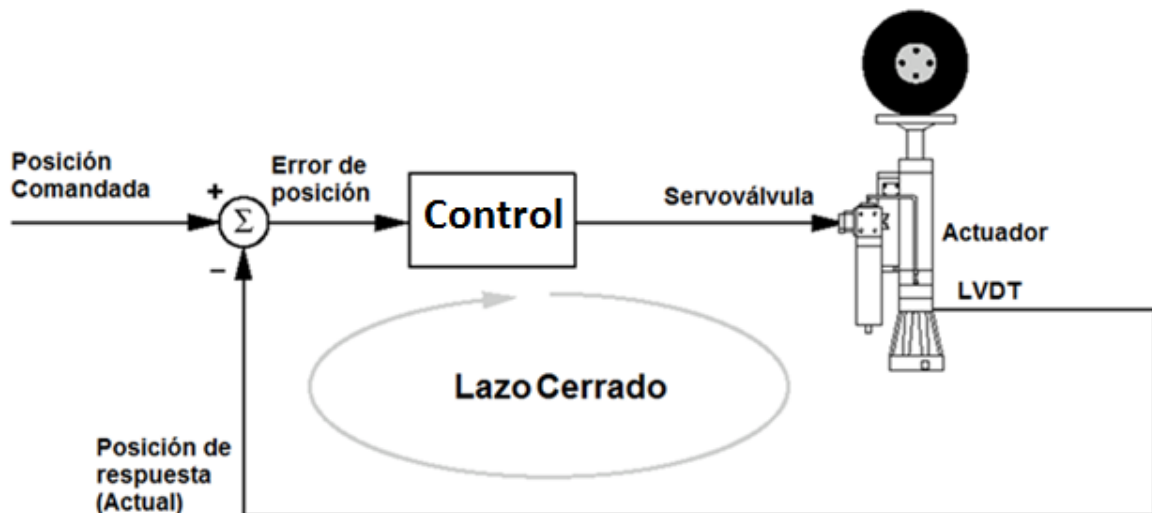


Figura 2.53: Sistema de control de lazo cerrado

Fuente: https://www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_006302.pdf

La segunda función del controlador es la programar (desglose en el apartado siguiente) y adquirir los datos del ensayo. Para ello dispone de varios métodos de adquisición (pico-valle, temporal, máximo-mínimo, a partir de un determinado nivel...). Se define la frecuencia para adquirir (definida por el cliente) donde a mayor frecuencia mayor cantidad de datos, lo que asegura mayor precisión en la nube de datos. Además se define durante cuánto tiempo y que señales se quieren adquirir.

Es necesario reservar una parte de la memoria del procesador para no saturarlo. Se define una carpeta de destino donde se vuelcan los X datos linealmente (es decir, añadiendo información).

La tercera función permite establecer los límites en el ensayo (limitadores en desplazamiento y fuerza). El controlador trabaja con una frecuencia interna muy elevada en comparación con el resto de frecuencias presentes en el ensayo que no hay que confundir entre sí (frecuencia de muestreo, frecuencia del ensayo, frecuencia de resolución de datos instantáneos).

Esta frecuencia alta permite al controlador responder de la forma más rápida cuando un límite del ensayo se ha visto superado y mandar las señales a los actuadores para que cesen de ejercer carga y el ensayo se pare.

Por último, la cuarta función está directamente relacionada con la tercera. Una vez se ha detectado que un límite del ensayo ha sido sobrepasado, el controlador habilita o deshabilita la presión hidráulica para garantizar la integridad física del espécimen bajo ensayo.

Un controlador es capaz de controlar simultáneamente seis estaciones distintas en una misma bancada.

2.2.4.2 Software de control

Un ensayo estructural se define en base a las especificaciones. Estas consisten en especificaciones relacionadas con el tipo de ensayo y cargas, planos de montaje y pares de apriete.

Un ensayo estructural queda completo con la construcción de una estación de trabajo mediante el programa *MultiPurpose TestWare Software* (MPT), a través del siguiente procedimiento:

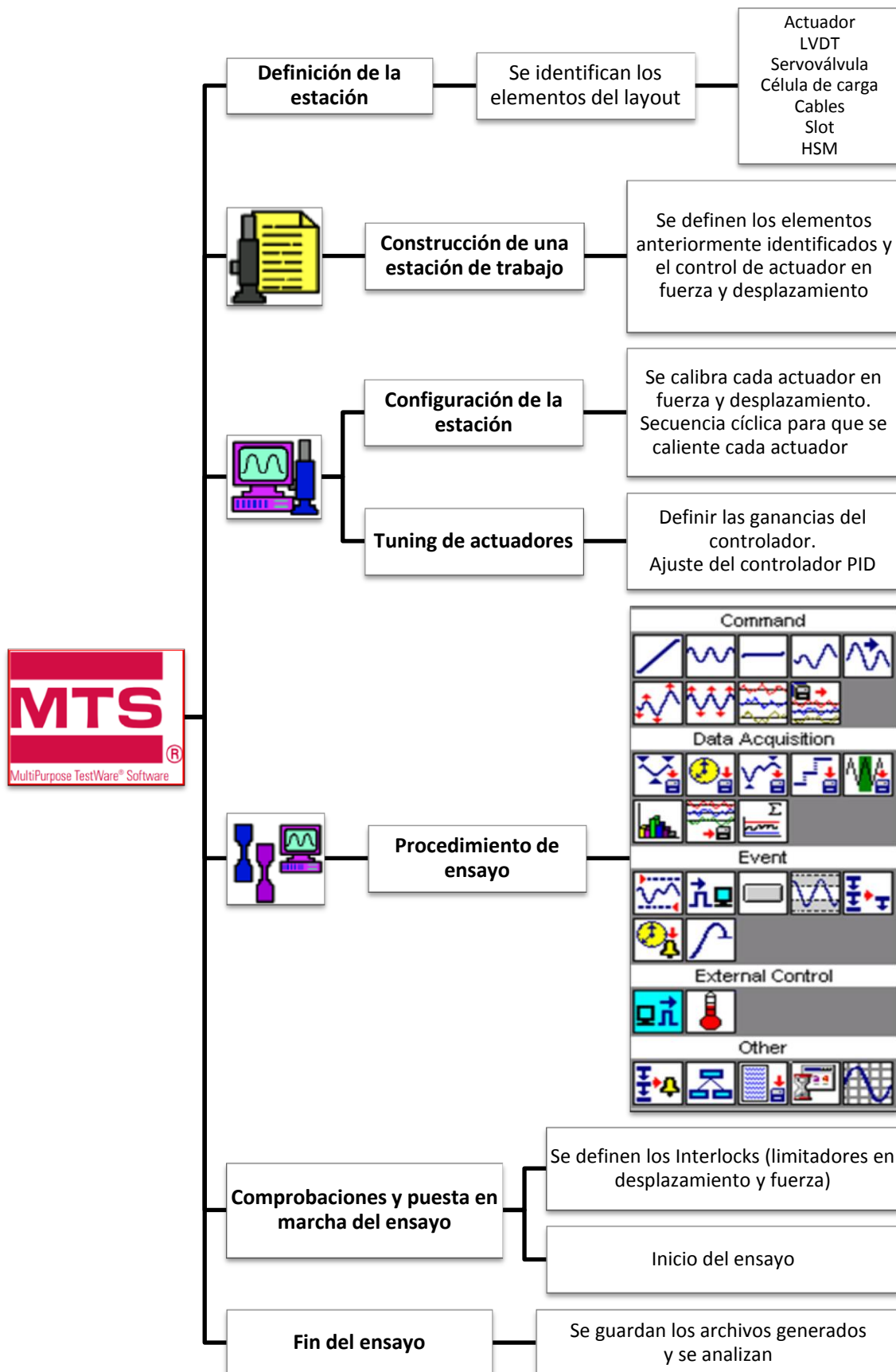


Figura 2.54: Estructura del procedimiento de programación de un ensayo estructural

3 Diseño banco de ensayos

El diseño de un banco de ensayos depende de múltiples aspectos como la pieza o componente que se quiera ensayar, montaje del componente en el sistema, tipo de ensayo, fuerzas a las que va a estar sometido, etc. En este apartado se va a introducir el componente que va a estar sometido a ensayos, explicando posteriormente a través de un diseño conceptual la disposición real en un vehículo y por último, el diseño en detalle del banco de ensayo para dos disposiciones.

3.1 Selección caso: Tipo de suspensión, casos de carga

3.1.1 Identificación del tipo de suspensión y de mangueta

El componente a ensayar es una mangueta de suspensión perteneciente a un vehículo ligero. Está asociada a una suspensión McPherson (como se vio en el apartado 2.1.6.1), de tipo independiente lo que permite el movimiento vertical independiente de cada rueda del eje. La particularidad de esta suspensión es la posibilidad que tiene el conjunto muelle-amortiguador de girar con la rueda en los movimientos de dirección.

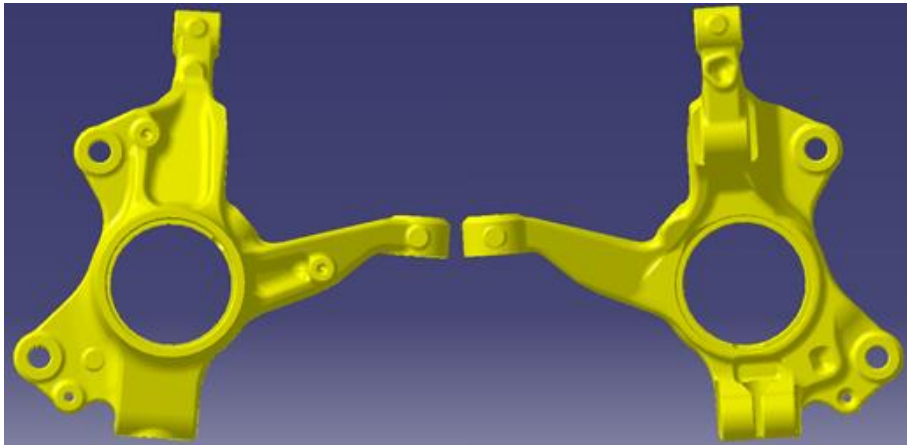


Figura 3.1: Vista exterior (izda.) e interior (dcha.) de la mangueta bajo estudio en CATIA

Esta mangueta se identifica y asocia con una suspensión McPherson por las siguientes consideraciones:

- Estructura muy simple
- Fabricadas por fundición, aunque presentan zonas mecanizadas para obtener mejor acabado superficial
- Pocos links (zonas de la mangueta que sirven de unión con los componentes adyacentes).
- La parte superior de la mangueta permite la unión directa de la columna de suspensión.

Por su configuración simple y con pocos links es posible diseñar bancos para ensayos multiaxiales. En estos ensayos se aplican fuerzas en varios ejes simultáneamente siendo en la mayoría de los casos los ejes x, y, z (ver apartado siguiente).

La mangueta dispone de cuatro links que permiten fijar los elementos del sistema de suspensión y de freno. Por su parte central se fija a la rueda, como se explicará en apartados siguientes.

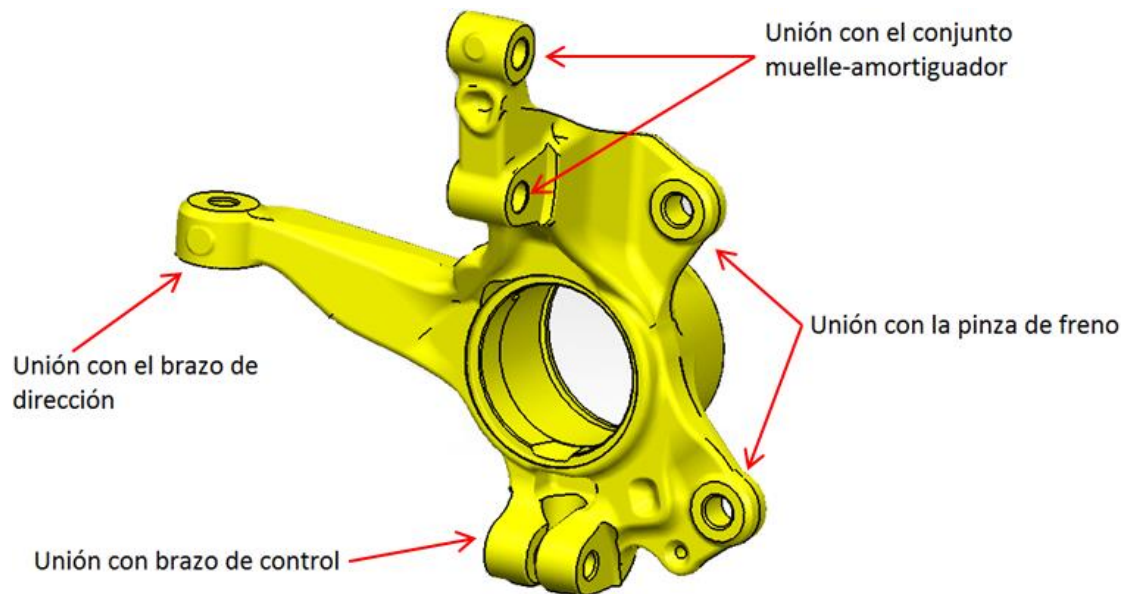


Figura 3.2: Vista interior de la mangueta y los links de unión

Las manguetas se distinguen en mano izquierda y mano derecha en función de en qué lado del vehículo van a estar colocadas. Para diferenciar una mangueta mano izquierda de una derecha, es preciso fijarse en el brazo de dirección. Una vez montada, éste se encuentra en la parte posterior (vista interior).



Figura 3.3: Mangueta mano izquierda bajo estudio

3.1.2 Simulación para el ensayo de la mangueta

Para poder realizar inequívocamente los mismos ensayos a través de las especificaciones de cargas en cualquier parte del mundo, se establece un convenio de signos para los ejes.

A continuación se define el sentido positivo de los ejes locales para la simulación de manguetas en un vehículo:

- Eje X o longitudinal: De la parte delantera a la trasera (sentido de la marcha del vehículo)
- Eje Y o lateral: De izquierda a derecha (sentido de la marcha del vehículo)
- Eje Z o vertical: De arriba a abajo

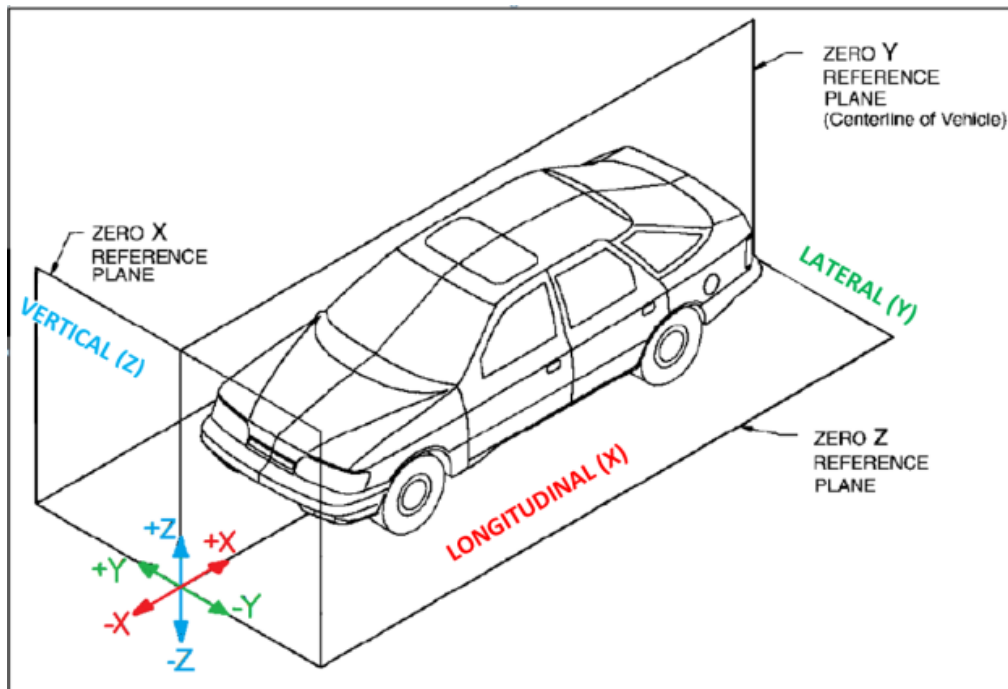


Figura 3.4: Convenio de signos para los ejes

Se quiere simular manguetas en las condiciones de trabajo a las que van a estar solicitadas. El ciclo de vida de una mangueta es extenso por lo que para optimizar ese tiempo y poder observar resultados en un periodo breve se recurre a realizar ensayos de simulación.

La mejor simulación de las condiciones reales de una mangueta consiste en un ensayo con vehículo completo. La mangueta se dispone en el vehículo en la configuración de funcionamiento para la que ha sido diseñada sin necesidad de incorporar utillajes complementarios. En esta disposición es posible ensayar las cuatro manguetas que incorpora el vehículo simultáneamente. Teniendo en cuenta la transferencia de cargas, inercias, cada mangueta sufre distintas solicitaciones.

Otra posibilidad consiste en realizar ensayos de un eje completo del vehículo, donde se ensayan las dos manguetas del eje y no se necesitan utillajes complementarios.

En cambio, en la fase de desarrollo en la que se encuentra la mangueta se da prioridad a la simulación del componente y no del sistema completo donde se integra, lo que se traduce en un menor coste y complejidad de la instalación. La simulación que se lleva a cabo reproduce la fracción de un cuarto del vehículo o corner.

Por lo tanto, para ensayar una mangueta y recrear las condiciones de trabajo sin distorsionar la realidad es necesario utilizar utillajes complementarios que cumplan la función de los componentes adyacentes a la mangueta en el vehículo.

Esto se comprueba a través de los *Hardpoints*. Son las fijaciones del conjunto-mangueta con el chasis que hay que respetar en el banco de ensayo para recrear las mismas condiciones de contorno. En apartados posteriores se enumerarán e identificarán dentro del sistema de suspensión McPherson.

3.1.3 Casos de carga

Los ensayos sobre los que se va a realizar el estudio son ensayos de fatiga multiaxial cuyo fin es determinar la durabilidad de la mangueta bajo cargas cíclicas.

Estos ensayos cuentan con diferentes configuraciones de carga que simulan las principales maniobras del vehículo. En ellos se aplican distintas fuerzas (distintos ejes) simultáneamente para reproducir con la mayor exactitud las condiciones que sufre una mangueta en su ciclo de vida.

Se definen cinco configuraciones de aplicación de cargas

1. Vertical Test
2. Braking Test
3. Lateral Test
4. Longitudinal Test
5. Steering Arm Impact Test

3.1.3.1 Vertical Test

En esta configuración se realizan únicamente fuerzas en el eje Z. En un vehículo las sollicitaciones en el eje Z varían según el eje del vehículo.

El peso del vehículo incluyendo ocupantes y carga afecta por igual, correspondiendo a cada mangueta la fracción de un cuarto del peso total. En un vehículo con motor delantero las manguetas delanteras están más cargadas. Esto también ocurre cuando se producen frenadas donde el peso total tiende a desplazarse hacia la parte delantera por la inercia del vehículo en movimiento. Además se producen impactos debido a las irregularidades del terreno como baches o badenes.

El punto de contacto del vehículo con el suelo es la huella del neumático, por lo que la línea de acción se encuentra en la mitad de la rueda y el punto de aplicación de la relación de fuerzas peso-impacto en el centro de la misma.

3.1.3.2 Steering Arm Impact Test

En esta disposición se producen fuerzas en el eje Y a manguetas pertenecientes al tren delantero. Como su nombre indica es un impacto producido en la rueda, especialmente en la llanta, al golpear lateralmente con un obstáculo. El impacto produce que la rueda gire respecto de su centro.

El punto de aplicación de la carga en la mangueta se produce en la unión con el brazo de dirección.

3.1.3.3 Lateral Test

Cuando un vehículo circula a cierta velocidad y toma una curva se produce una transmisión de cargas laterales. En este caso actúan simultáneamente fuerzas en el eje Z (vehículo en contacto con el suelo) y en el eje y. La fuerza lateral equivale a la fuerza centrífuga que se debe realizar en las curvas por parte de las ruedas para mantener la trayectoria.

Esta fuerza se transmite en el contacto del neumático con el suelo en el plano medio de la rueda.

3.1.3.4 Longitudinal Test

Esta configuración combina cargas en el eje X y las cargas ya citadas que afectan al eje Z. Las cargas del eje X se producen en la dirección longitudinal del vehículo provocada por la oposición al avance del mismo. Por tanto, el punto de aplicación de la carga se sitúa en el centro de la rueda, mismo punto en el que se aplican las cargas del eje Z.

3.1.3.5 Braking Test

Al igual que en la configuración anterior *Longitudinal Test*, se combinan cargas en el eje X y eje Z. Cuando un vehículo circula a cierta velocidad y se frena, el vehículo tiende a inclinarse hacia la parte delantera en un movimiento de cabeceo. Los neumáticos delanteros reciben más carga en el eje Z.

Por otra parte, se produce un proceso de cizalladura entre la huella del neumático y el suelo. El punto de aplicación de las fuerzas longitudinales se encuentra en el contacto de la rueda en su plano medio con el suelo.

3.2 Diseño conceptual

Se ha realizado el diseño conceptual de un cuarto de suspensión de un vehículo, correspondiente con la mano izquierda de una suspensión delantera (directriz y motriz).

3.2.1 Layout conceptual

La mangueta es el componente sobre el que se fijan múltiples sistemas del vehículo (sistema de suspensión, sistema de dirección, transmisión y sistema de frenado).

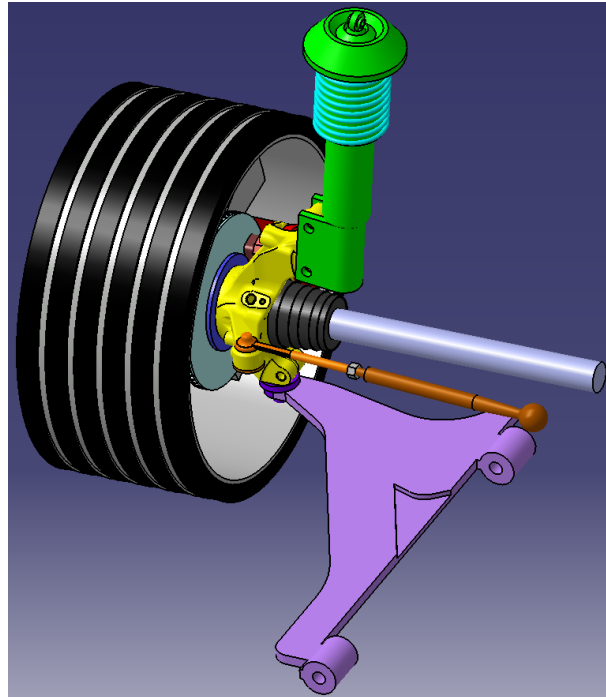


Figura 3.5: Diseño conceptual. Vista 1

En la disposición real en un vehículo, los elementos a los que la mangueta se encuentra unida son los siguientes:

- Rueda: Es el único contacto del vehículo con el suelo. Se compone de dos partes diferenciadas, la llanta y el neumático. La llanta es el elemento circular que mediante un perfil adecuado sirve de soporte al neumático. Además se fija al eje del vehículo a través de tornillos y debe resistir el par motor que se le transmita. El neumático es el responsable de mantener una buena superficie de contacto con el suelo y asegurar un buen grado de adherencia. En el diseño conceptual se ha representado una rueda con llanta de 15 pulgadas y cinco radios, con un neumático de poco perfil.

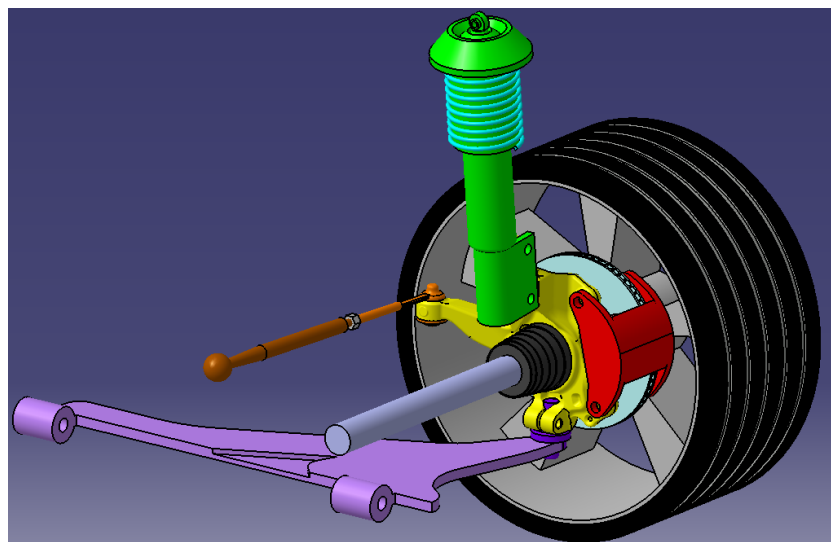


Figura 3.6: Diseño conceptual. Vista 2

- Disco de freno: Dispositivo empleado para reducir la velocidad de cada rueda debido a la fricción que se crea cuando los frenos inciden sobre él al accionar el pedal. El disco gira solidario con la rueda. Debe absorber y disipar el calor generado en el frenado. Un disco de freno ventilado posee en su estructura interior conductos por los que puede circular el aire lo que permite una mejor disipación del calor. El disco de freno representado (en color azul turquesa) es un disco de freno ventilado.
- Pinza de freno: Su función es apretar el disco de freno hasta detenerlo. El cáliper (representado en color rojo) es el elemento que guarda las pastillas y pistones de freno (representados en el interior). El pistón al recibir la señal del pedal, presiona las pastillas de freno contra el disco de freno. La pinza de freno se fija a la mangueta.
- Buje: Su funcionamiento se expuso y explicó con anterioridad (está recogido en el apartado 2.1.5.3.4). Se fija al disco de freno a través de cuatro pernos. Se ha representado el buje con su estriado interior (en color azul oscuro).

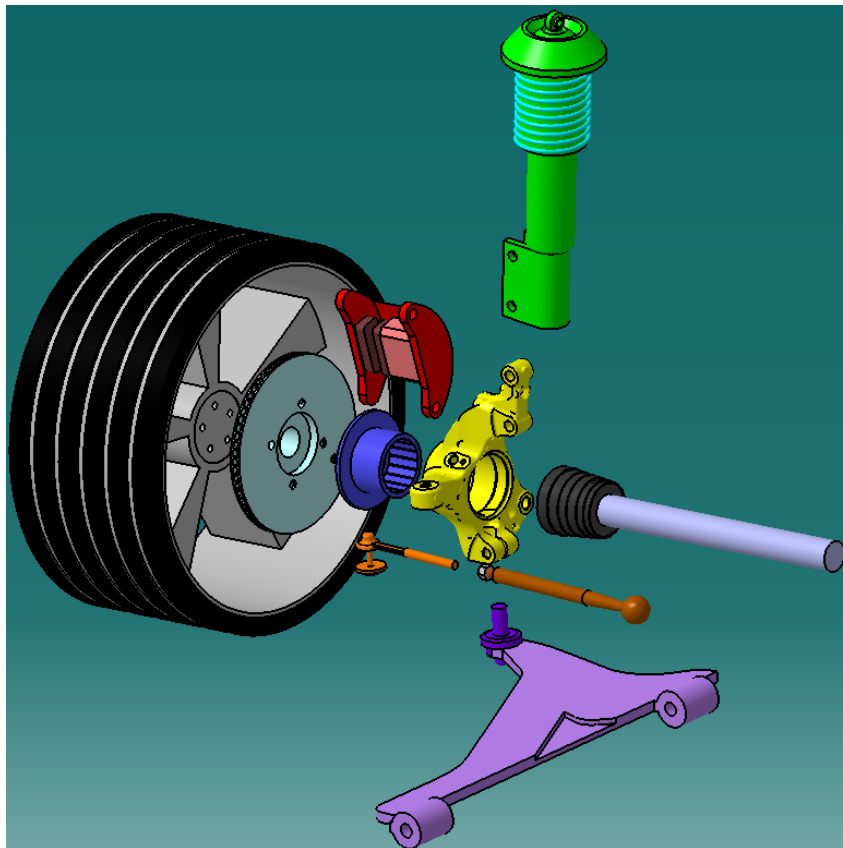


Figura 3.7: Diseño conceptual explosionado. Visto desde el interior.

- Columna de suspensión McPherson: Columna telescópica donde amortiguador y muelle helicoidal se acoplan conjuntamente (apartado 2.1.6.1). El conjunto está unido a la mangueta a través de dos tornillos y gira con ella. Por su parte superior se fija al chasis.

- Brazo de dirección: Recibe el movimiento del piñón-cremallera (una cremallera se mueve transversalmente accionada por un piñón que está unido a la columna de dirección), y transmite este movimiento a la mangueta. En los extremos dispone de rótulas de dirección encargadas de conectar la mangueta con el brazo de dirección y el piñón-cremallera con el brazo de dirección permitiendo el movimiento relativo en varias direcciones. El brazo de dirección está dispuesto en dos partes que se atornillan entre sí, a través de una tuerca (vienen representadas en color naranja).
- Palier de transmisión: El motor suministra el par al eje motriz y este lo transmite a las ruedas. En el extremo que se une a la rueda, se encuentra una junta homocinética (representada en color negro). Las juntas homocinéticas a diferencia de las juntas universales, permiten conservar la misma velocidad en el eje de salida respecto al de entrada y absorber desalineaciones.
- Trapecio inferior: La función principal de este trapecio (como se explicó en el apartado 2.1.5.3.1) es dar soporte y fijación a la mangueta. Están unidos entre sí a través de una rótula (representada en color morado) con la cual el trapecio (representado en color lila) puede pivotar respecto de la mangueta. A su vez el trapecio se une a la carrocería o subchasis a través de dos articulaciones, respecto de las cuales puede pivotar. En estas dos articulaciones se instalan silentblocks para minimizar la transmisión de vibraciones.

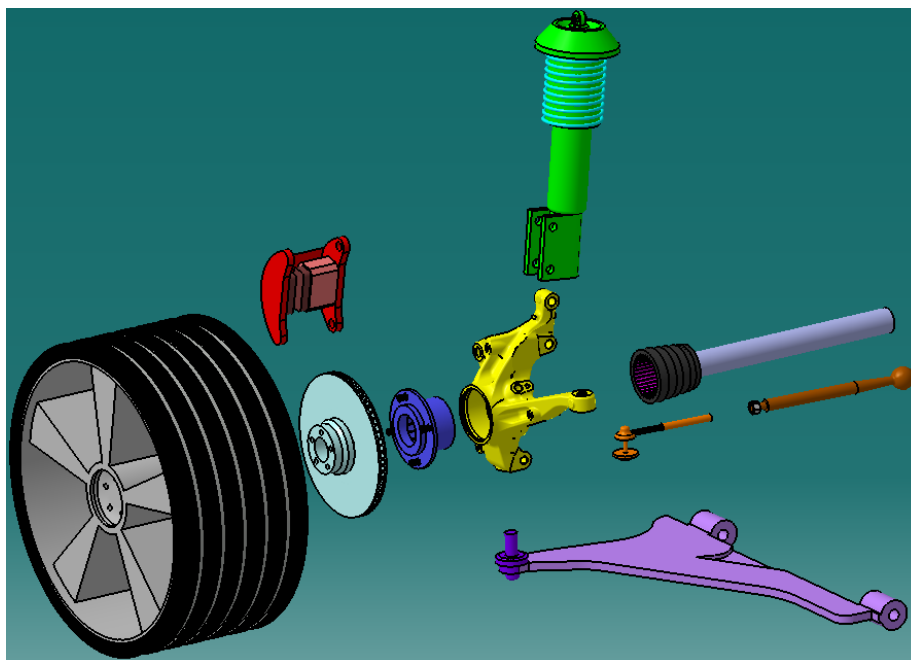


Figura 3.8: Diseño conceptual explosionado. Visto desde el exterior.

3.2.2 Hardpoints

Los Hardpoints (como se introdujo en el apartado 3.1.2) son las fijaciones que hay que respetar en el banco de ensayos para recrear las mismas condiciones de contorno (misma cinemática del sistema de suspensión). Pueden ser puntos físicos y/o geométricos que determinan la posición de la mangueta a través de coordenadas en los tres ejes (x, y, z). La

mayoría de estos Hardpoints indican donde se encuentra la unión de la mangueta con los elementos a los que se fija, es decir, los citados en el apartado anterior. A continuación se presentan los Hardpoints utilizados en una mangueta McPherson:

Geometry Hardpoints	
#	Description
1	LCA to Subframe Front
2	LCA to Subframe Rear
3	LCA Ball Joint
4	Strut to Body
5	Tie Rod Ball Join Outer
6	Tie Rod Ball Join Inner
7	Strut Alignment Point
8	Upper Strut Hole
9	Wheel Center
10	Tire Patch
11	Spindle Alignment joint

- **1 y 2:** Unión entre el trapecio inferior (unido a LCA) y el subchasis
- **3:** Ubicación de la rótula sobre la que pivota el LCA
- **4:** Tope superior del amortiguador delantero
- **5 y 6:** Rótulas en el brazo de dirección
- **7:** Punto geométrico que determina la inclinación del amortiguador respecto de la mangueta
- **8:** Ubicación del agujero que permite la unión entre la mangueta y el amortiguador
- **9:** Centro de la rueda
- **10:** Contacto del neumático con el suelo
- **11:** Unión eje de transmisión

Tabla 1: Descripción de los Hardpoints de una mangueta McPherson

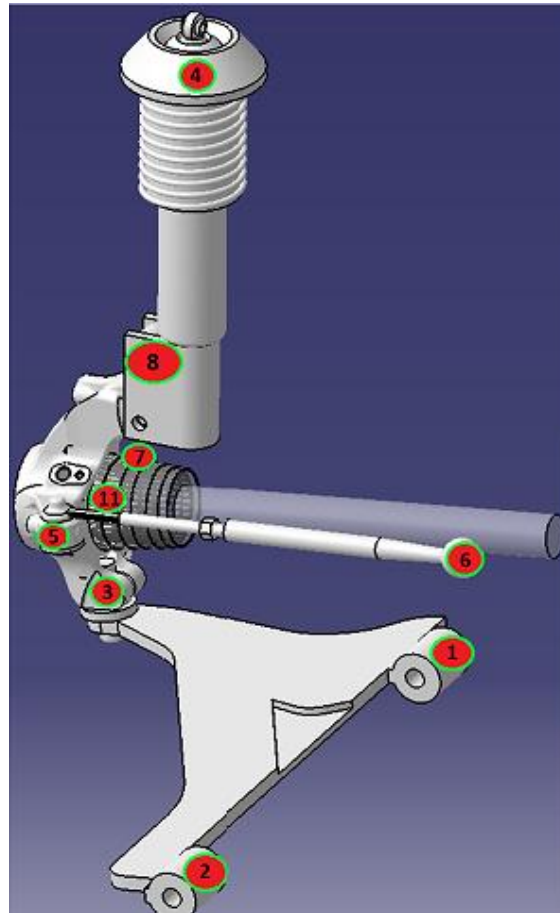


Figura 3.9: Ubicación de los Hardpoints en el diseño conceptual

En el banco de ensayos no se dispone de los elementos con los que la mangueta va a funcionar en el vehículo en su uso diario. En cambio, se utilizan utillajes. Una vez montado el layout, habrá que comprobar que las medidas definidas por los Hardpoints se cumplen.

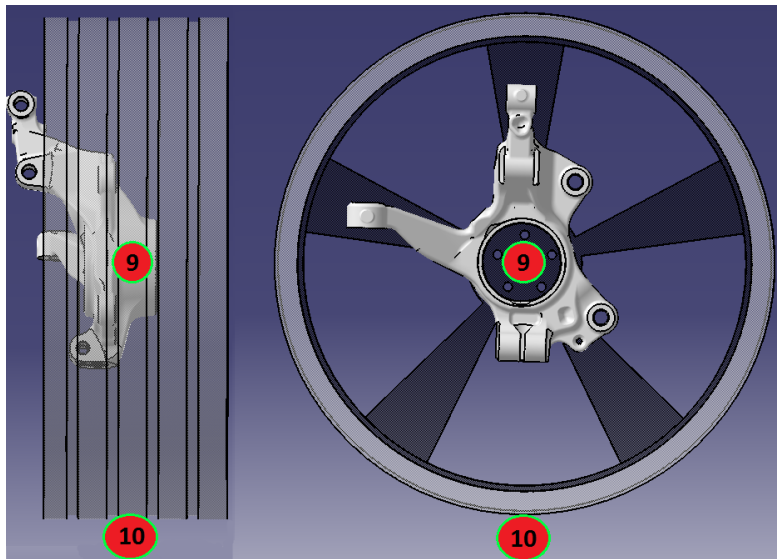


Figura 3.10: Segunda ubicación de los Hardpoints en el diseño conceptual

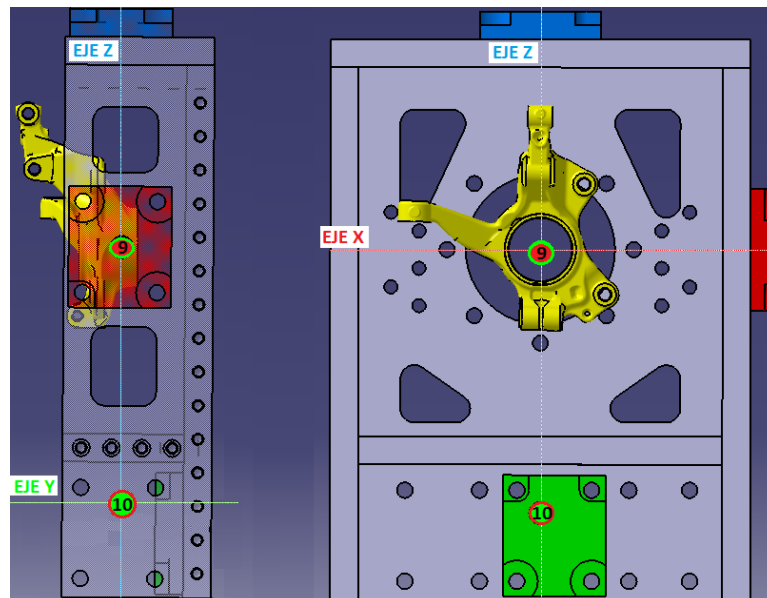


Figura 3.11: Ubicación de los Hardpoints en el cubo de rueda

El montaje de la mangueta en el banco de ensayos (a falta de los elementos auxiliares y de control) se observa en la siguiente figura.

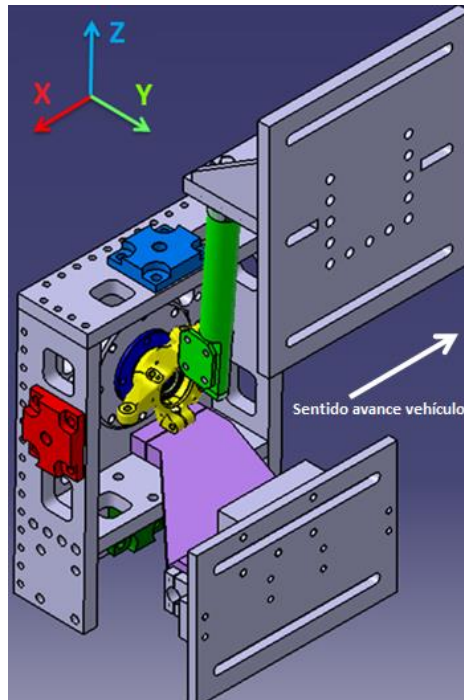


Figura 3.12: Montaje mediante utillajes de la disposición de la mangueta en el banco de ensayos

El utillaje más representativo es el cubo de rueda que simula ser la rueda del vehículo. En las paredes laterales del cubo de rueda se disponen tres placas de amarre. Se encuentran en la línea de acción de las cargas (apartado 3.1.3), es decir, los Hardpoints 9 y 10. En estas placas es donde se ejercerá la fuerza a través de los actuadores hidráulicos.

Posteriormente será necesario diseñar un utillaje intermedio entre estas placas pertenecientes al cubo de rueda y las swivels de los distintos actuadores hidráulicos que se utilicen.

Se valora el giro de 90º para facilitar el montaje de los actuadores en el banco de ensayos. Pese a este cambio, la mangueta no se ve afectada y se ensaya de la misma manera.

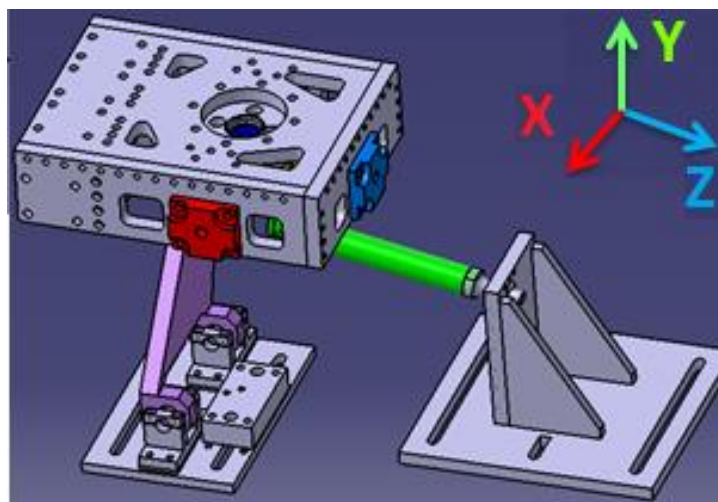


Figura 3.13: Disposición y orientación final de la mangueta en el banco de ensayos

3.2.3 Condiciones y casos de carga

En los ensayos de fatiga multiaxial (como se detalló en el apartado 3.1.3) intervienen distintos casos de carga aplicadas en distintos ejes.

Se va a elaborar un estudio en profundidad respecto de dos disposiciones de carga en un banco de ensayos.

En adelante, los vectores en rojo determinan las fuerzas que se producen en el eje X. Los vectores en azul indicarán las fuerzas en el eje Z. Por último, los vectores en color verde representaran las fuerzas en el eje Y.

3.2.3.1 Primera disposición

En esta disposición intervienen los tres ejes simultáneamente a través de tres casos de carga. Se muestran a continuación:

Disposición 1				
Caso de carga	Dirección/Eje	Color convenio	Punto de aplicación	Observaciones
Longitudinal Test	X	Rojo	Hardpoint 9	
Lateral Test	Y	Verde	Hardpoint 10	
Vertical Test	Z	Azul	Hardpoint 9	Precarga en Z primero

Tabla 2: Características de la primera disposición de ensayo

En el uso adecuado de un vehículo, este se encuentra siempre en contacto con el suelo por lo que las sollicitaciones en el eje Z aparecerán primero a modo de precarga (peso del vehículo) e irán variando en función de las irregularidades.

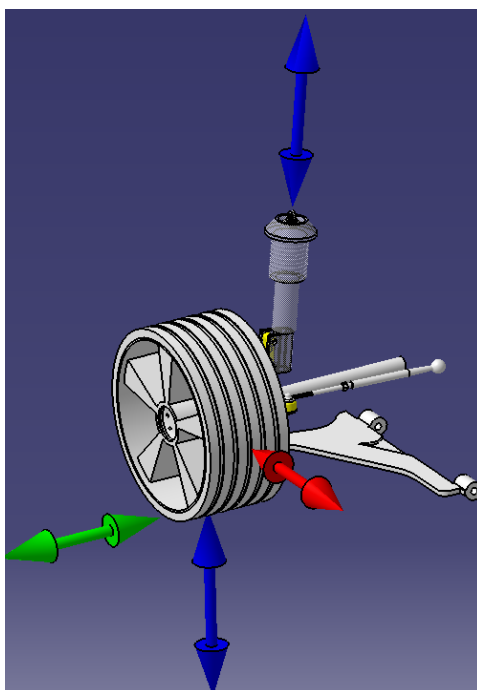


Figura 3.14: Cargas de la primera disposición aplicadas en el diseño conceptual

En el diseño conceptual, se observa que las solicitaciones en el eje Z provienen de dos causas distintas; impactos debido a las irregularidades del terreno y el peso del vehículo. Esta relación de fuerzas tiene la misma dirección y se aplica en el Hardpoint 9.

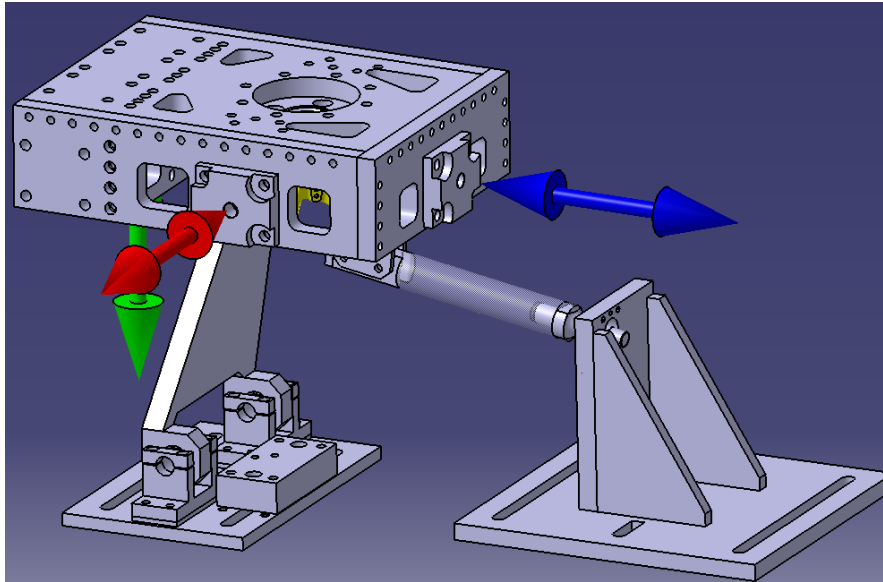


Figura 3.15: Cargas de la primera disposición aplicadas en el banco de ensayo

3.2.3.2 Segunda disposición

Al igual que en la disposición anterior, intervienen los tres ejes simultáneamente a través de tres casos de carga. Se muestran a continuación:

Disposición 2				
Caso de carga	Dirección/Eje	Color convenio	Punto de aplicación	Observaciones
Braking	X	Rojo	Hardpoint 10	
Lateral	Y	Verde	Hardpoint 10	
Vertical	Z	Azul	Hardpoint 9	Precarga en Z primero

Tabla 3: Características de la segunda disposición de ensayo

Cuando un vehículo frena lo hace a través del único contacto que tiene con el suelo, las ruedas. Este contacto con el suelo, implica que la presencia de las cargas en Z esté siempre presente y al tratarse de un eje delantero, las solicitaciones en el eje Z aumentan debido a la transferencia de peso durante la frenada.

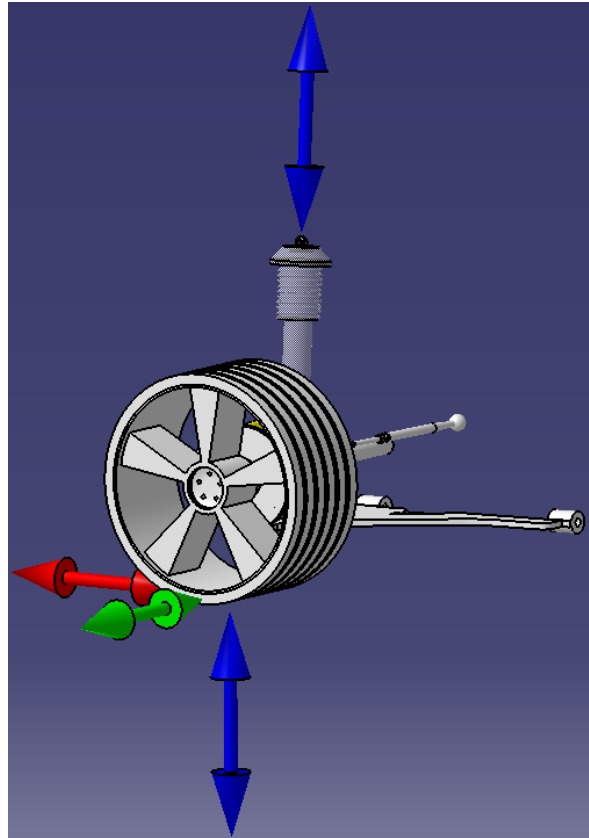


Figura 3.16: Cargas de la segunda disposición aplicadas en el diseño conceptual

Las cargas producidas en el frenado provocan que la carga ejercida en el eje X sea aplicada en el Hardpoint 10 (al igual que la carga lateral).

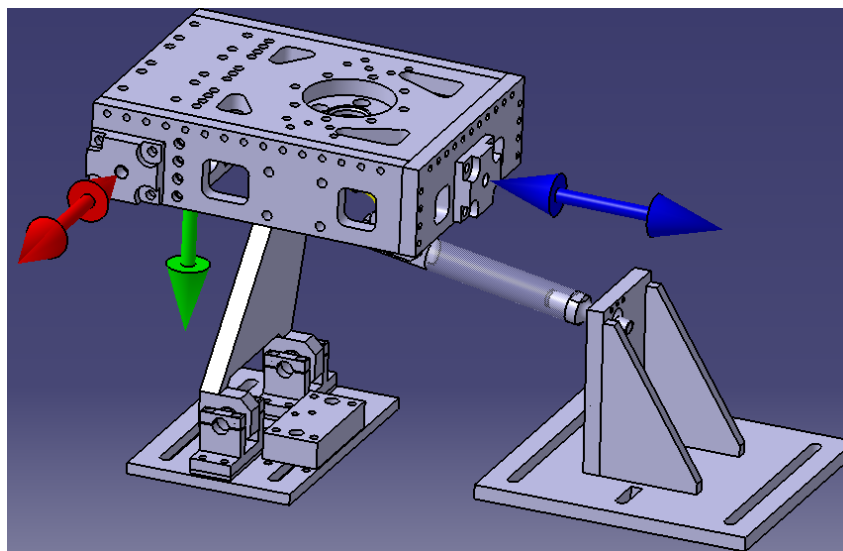


Figura 3.17: Cargas de la segunda disposición aplicadas en el banco de ensayo

La carga en el eje X ejercida en el banco de ensayo también se desplaza, para provocar con ello un momento similar al producido en el frenado.

3.2.4 Selección de componentes de ensayo

La configuración del layout a través de los utillajes complementarios de ensayo depende de cuál es la orientación que tiene la mangueta (mano derecha o mano izquierda) a ensayar.



Figura 3.18: Conjunto cubo de rueda o caja

El cubo de rueda o caja va a estar presente en todos los ensayos independientemente de que mano de la mangueta se trate. El cubo de rueda, como su propio nombre indica, simula la acción de la rueda del vehículo cumpliendo con las dimensiones de la misma (neumático y llanta).

En sus extremos se colocan las placas de amarre para ejercer las cargas sobre ellos (Hardpoints 9 y 10).

En el interior se colocan los utillajes (simulan ser el disco de freno y buje) a los que se fijará la mangueta.

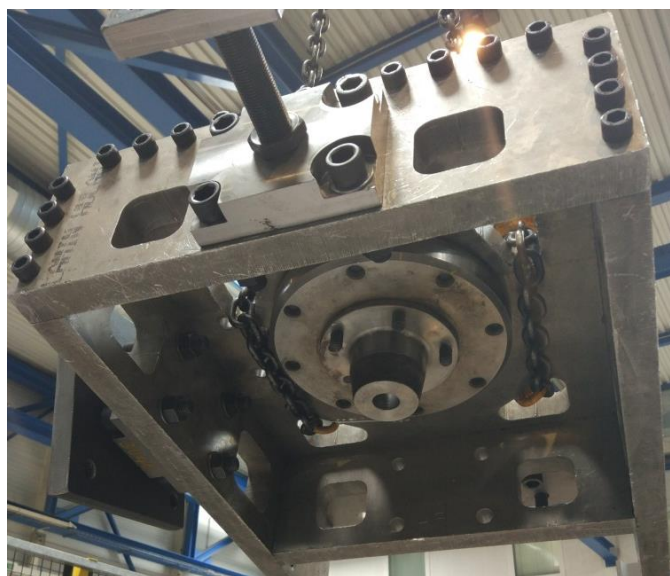


Figura 3.19: Conjunto cubo de rueda visto desde el interior

La conexión superior de la mangueta se realiza mediante el conjunto unión-soporte. El cilindro (simula ser la columna de suspensión) se conecta a una escuadra a través de una rótula.

La disposición del cilindro respecto de la escuadra no es simétrica, por lo que dependiendo de la mangueta que se ensaye se utilizarán distintos conjuntos.



Figura 3.20: Conjunto unión-soporte

El trapecio inferior se simula con el conjunto soporte rígido-cilindro. Incorpora una rótula en la cual la mangueta se fija.

Existen dos conjuntos en función de la mangueta a ensayar. En el vehículo, la unión del trapecio inferior al subchasis se realiza con dos silentblocks desplazados en dirección longitudinal hacia atrás.



Figura 3.21: Conjunto soporte rígido-cilindro

3.2.5 Selección de componentes auxiliares y de actuación

En base a las especificaciones técnicas del cliente como son el tipo de ensayo y de cargas, se seleccionan los sistemas de actuación necesarios.

Como se introdujo en el apartado 2.2.1.2, en fatiga existen distintos tipos de cargas para ensayos:

- Escalón: La secuencia a fatiga aumenta/disminuye de forma instantánea con saltos (escalones).
- Sintéticas: Responden a la secuencia de un seno/coseno determinando valores de amplitud y la frecuencia.
- De carretera: Son señales obtenidas directamente del espécimen en su lugar de actuación en las que intervienen sucesos externos. (Ejemplo: Un vehículo toma señales de las ruedas en un circuito. Se obtiene la señal de carretera de las diferentes condiciones por las que ha pasado).

En estos ensayos, se va a trabajar con cargas sintéticas. Se establecen las cargas que deben cubrir los actuadores (con cierto margen de holgura) y se seleccionan. Además llegados a este punto, esta selección se ve condicionada por la disponibilidad del actuador (otros ensayos) y si se encuentra en almacén o presente en la bancada.

Se seleccionan tres actuadores para cada eje (X, Y, Z) de 160kN, 50kN y 15kN respectivamente. Se identifican por las etiquetas presentes en el actuador (figura 3.22).

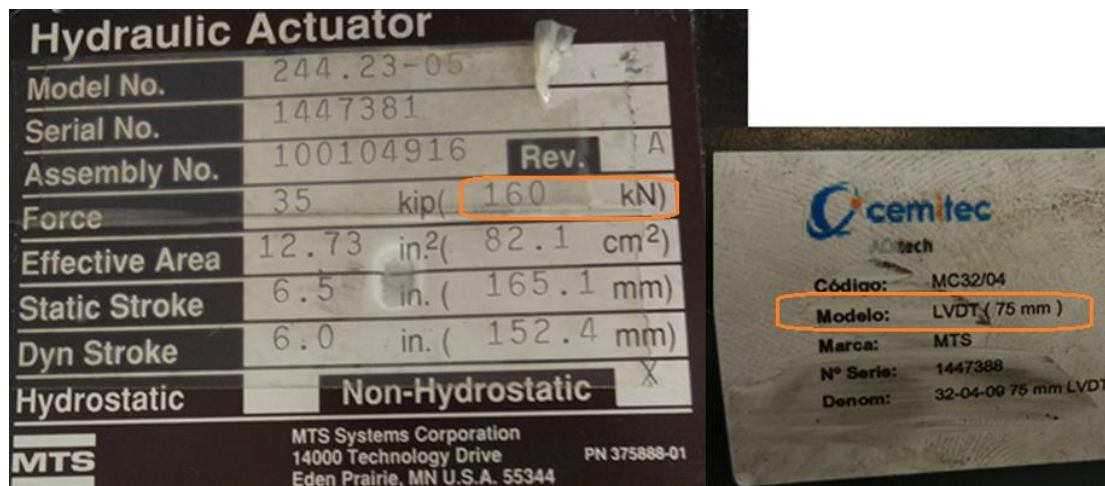


Figura 3.22: Etiquetas de identificación actuador: Capacidad en Newton (izda.) y LVDT en mm (dcha.)

Para facilitar el trabajo posterior en la creación de la estación de trabajo, se rellena la siguiente tabla, donde se identifican los actuadores y los elementos que conforman el mismo, a la vez que los cables utilizados, HSM y SLOTS en el servocontrolador.

Elemento/Componente	Nº de serie		
	Longitudinal/Braking	Vertical	Lateral
Actuador	160 kN	15 kN	50 kN
LVDT	32-04-09 75 mm	32-04-14 125mm	32-07-01
Célula de carga	30-02-09 250 kN	30-00-01 15 kN	30-11-02 50 kN
Cables	Nº 24	Nº 13	Nº 15
Slot	8	5	6
HSM	1	1	2

Tabla 4: Resumen de los elementos hidráulicos utilizados

La peculiaridad de estos ensayos multiaxiales es la presencia de un reenvío (figura 3.23) que facilita tanto la aplicación de la carga (en este caso, lateral en el eje Y) como la ubicación de los actuadores en la bancada.

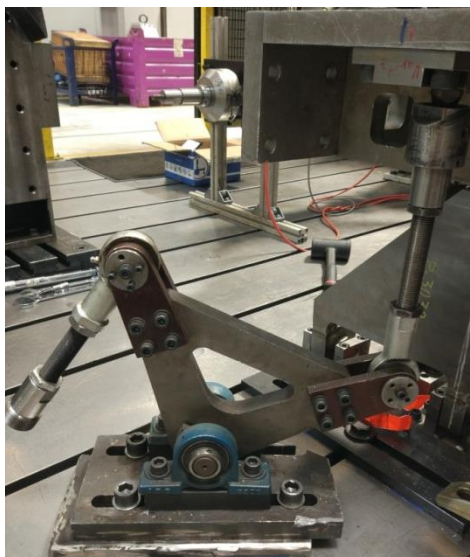


Figura 3.23: Reenvío

3.3 Diseño en detalle

3.3.1 Diseño en detalle del banco

El objetivo del diseño en detalle de las distintas disposiciones del banco de ensayos es facilitar y reducir el tiempo de montaje de los layouts. Estos planos (Anexos) son suministrados a los técnicos. Además de facilitar el montaje, sirven para comprobar que el montaje se está realizando acorde a lo establecido por el cliente. Al elaborar el diseño del banco se busca ocupar el menor espacio posible (dentro de unos márgenes de seguridad) para optimizar el uso de la bancada al máximo.

En la disposición Longitudinal, el actuador asociado al eje X (160 kN) y del Z (15 kN) están alineados con el Hardpoint 9. Ajustando la altura de los actuadores a través de las escuadras regulables se nivelan los actuadores para formar 0º grados respecto de la horizontal.

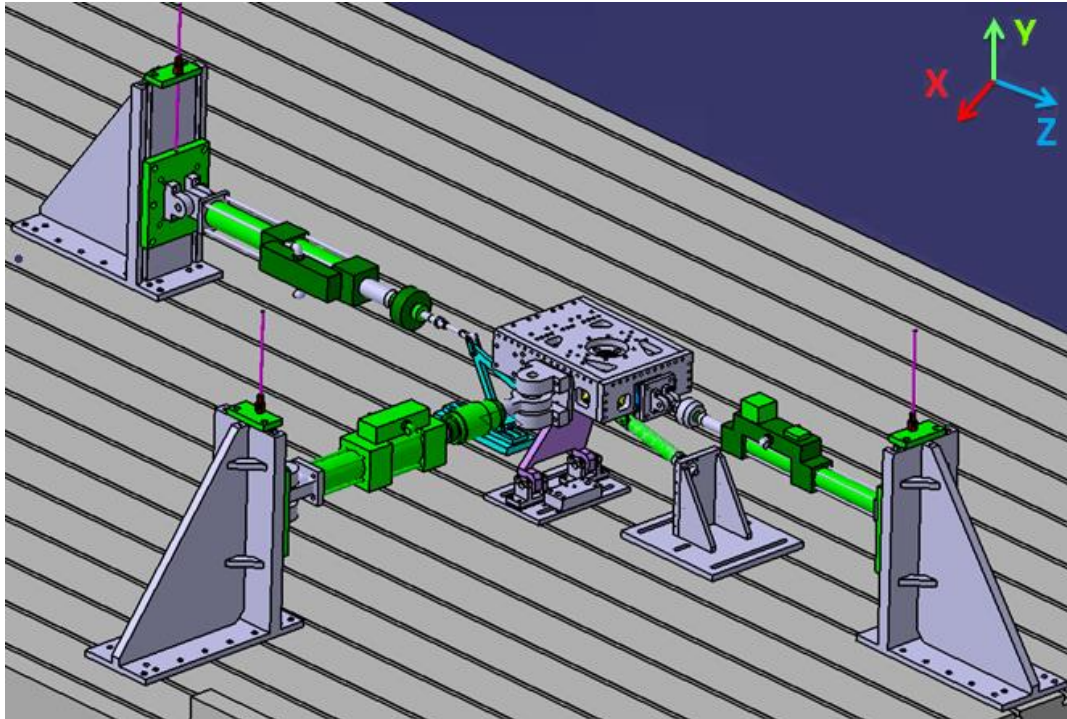


Figura 3.24: Layout de la disposición Longitudinal en Catia. Vista 1

El actuador en el eje Y se alinea con el Hardpoint 10. Incorpora un reenvío para transmitir la carga horizontal que proviene del actuador a una vertical. La conexión del reenvío a la placa de amarre forma un ángulo de 90° respecto de la horizontal.

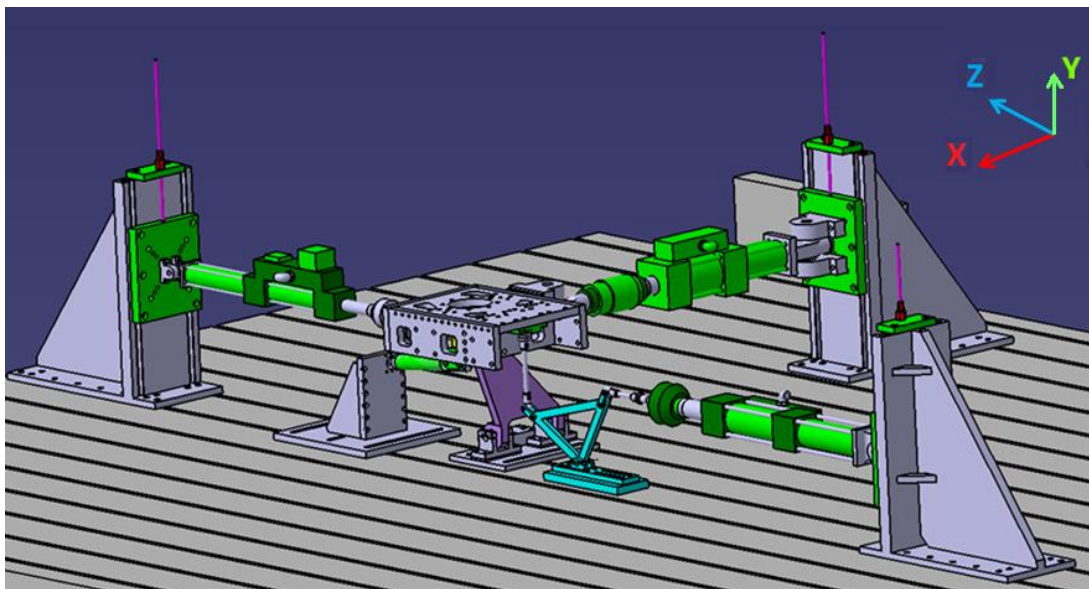


Figura 3.25: Layout de la disposición Longitudinal en Catia. Vista 2

En la disposición Braking, el actuador asociado al eje Z (15 kN) está alineado con el Hardpoint 10 por lo que se desplaza la escuadra regulable conectada al actuador a través de la bancada. Se mantiene el grado de inclinación de 0° respecto de la horizontal.

El actuador en el eje Z (15 kN) se mantiene alineado con el Hardpoint 9 y nivelado a 0 grados.

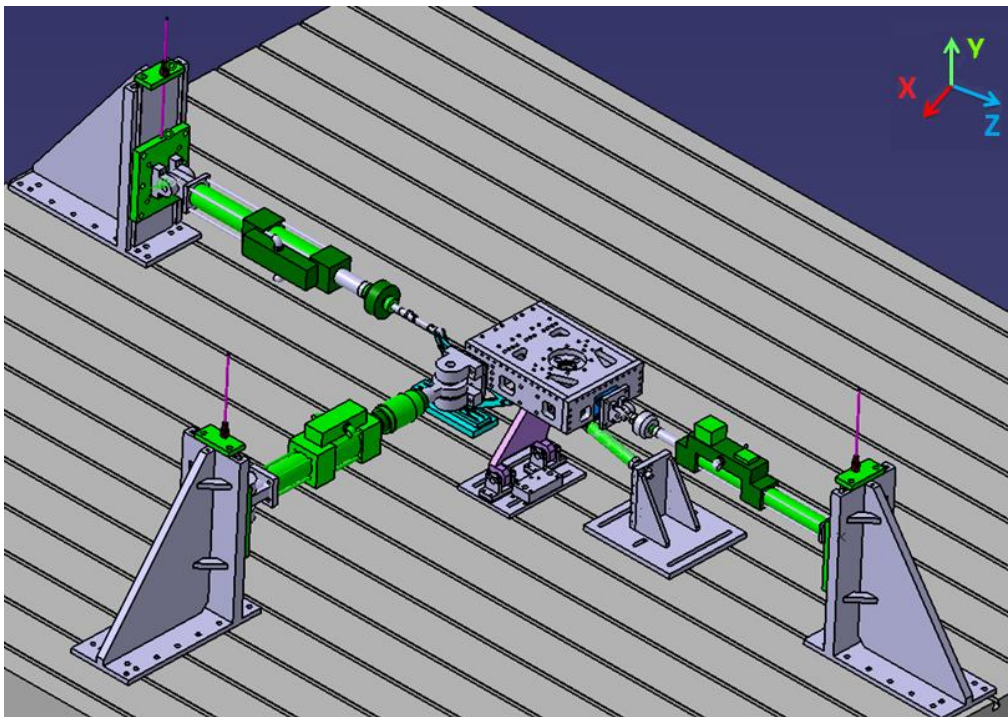


Figura 3.26: Layout de la disposición Braking en Catia. Vista 1

Al igual que en la disposición anterior el actuador en el eje Y (50 kN) incorpora un reenvío cuya unión a la placa de amarre del cubo de rueda forma 90° con la horizontal.

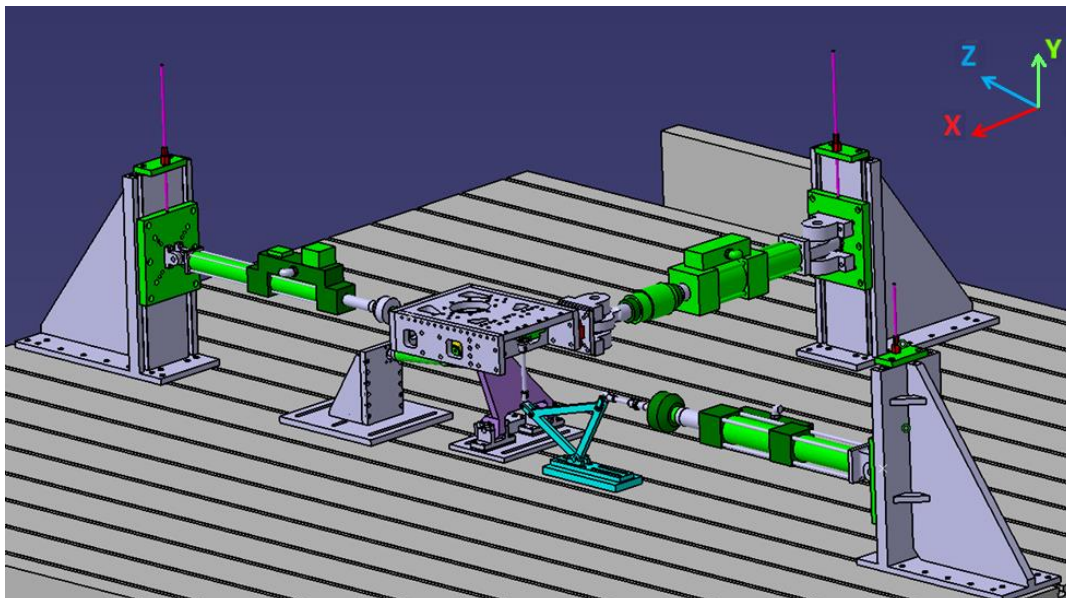


Figura 3.27: Layout de la disposición Braking en Catia. Vista 2

Para evitar que se produzca el bloqueo del reenvío hay que evitar que este forme 45° grados con la horizontal.

3.3.2 Diseño de utillajes

El cubo de rueda dispone en sus extremos de placas de amarre que se fijan a través de cuatro tornillos. Sobre estas placas se ejercen las cargas a través de los actuadores. La unión de las swivels de los actuadores con las placas de amarre no se puede realizar de forma directa, es necesario un utillaje intermedio.



Figura 3.28: Placa de amarre

El utillaje de unión debe disponer de un agujero roscado central (que permita fijar el utillaje a la placa de amarre) y otros cuatro agujeros donde se fijan las rótulas de los actuadores.

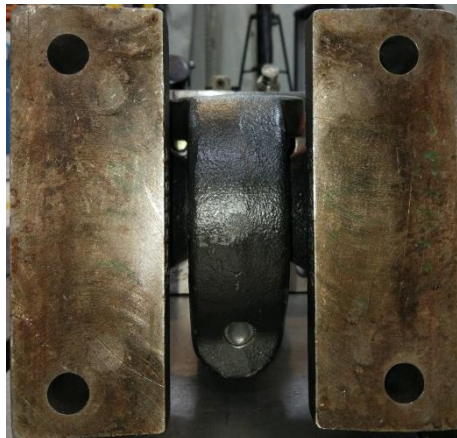


Figura 3.29: Superficie de las rótulas/swivels en contacto con el utillaje de unión

La pieza puede soportar las cargas estáticas y de fatiga que el actuador al que se fija puede suministrar. En un principio se propusieron tres alternativas:

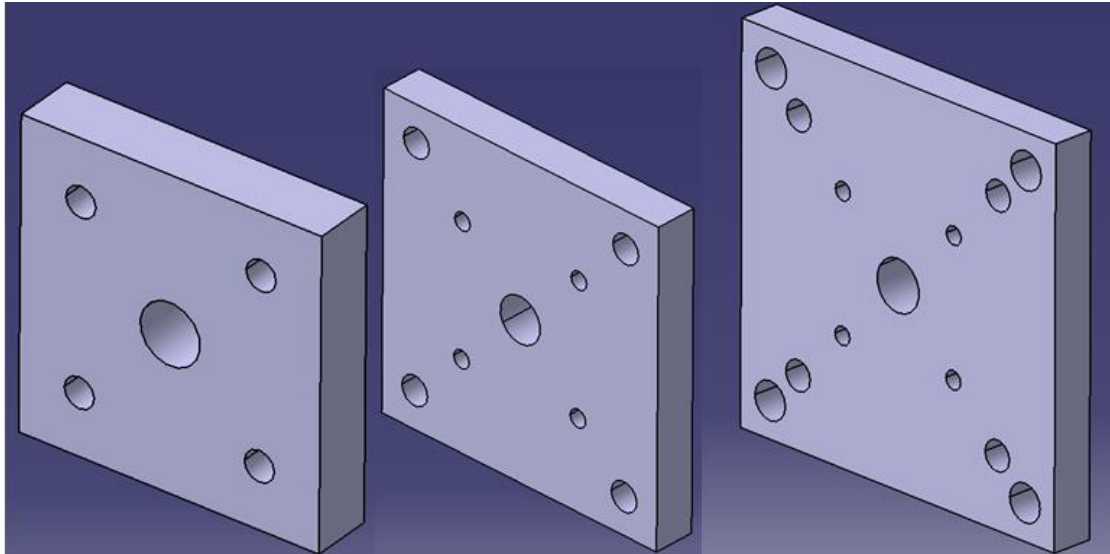


Figura 3.30: Alternativas iniciales de utillaje de unión propuestos

- La primera alternativa (izquierda en figura 3.30) consiste en la solución más simple. El utillaje solo puede combinarse con la swivel pequeña (incluye actuadores de 15 y 25 kN), es el más pequeño y el que menos material necesita.
- La tercera alternativa (derecha en figura 3.30) permite colocar las tres swivels disponibles (pequeña asociada a actuadores de 15 y 25 kN, mediana con 50 y 100 kN, y grande con actuadores de 160 kN), ocupa más espacio, mayor gasto de material y el que mayor solicitaciones va a sufrir.
- La segunda alternativa (central en figura 3.30) es la solución intermedia a las dos anteriores, permitiendo utilizar la swivel pequeña y mediana.

Teniendo en cuenta la gran variedad de swivels y actuadores con los que puede montarse, se selecciona la tercera alternativa para realizar un análisis por elementos finitos y optimizar la geometría final de la pieza. Este análisis se basa en dos requisitos:

- Compuesto por un acero estándar de límite elástico 215 MPa.
- La tensión de von-Mises máxima generada debe ser inferior al límite elástico estableciendo un coeficiente de seguridad.

Este utillaje es utilizado directamente por técnicos por lo que hay que eliminar las aristas vivas presentes. Para favorecer la entrada y salida de los tornillos se realizan avellanados sobre los agujeros de la placa. La eliminación de estas aristas vivas permite reducir la concentración de tensiones que se originan en estas zonas.

El análisis se realiza a través de una simulación por elementos finitos con el programa Catia v5. Se ha estudiado la situación más desfavorable que sufre la pieza, es decir, el actuador colocado aporta 160 kN y realiza una carga a tracción. La carga a tracción es más desfavorable ya que la carga se transmite en cuatro zonas puntuales, al contrario que en la compresión que apoya toda la superficie de la rótula (figura 3.29).

El primer análisis que se realizó sobre una pieza de 20 milímetros de espesor permitió definir en qué situación de solicitaciones se encontraba la pieza.

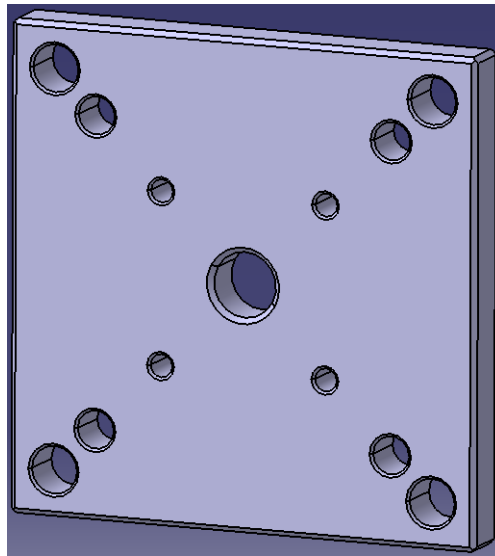


Figura 3.31: Utillaje de 20 milímetros de espesor

La carga de 160 kN se aplica en los puntos de amarre con el actuador y se establece una relación de contacto entre la varilla roscada (perno central) y el utillaje que define la sujeción del ensayo. Las cargas producidas (figura 3.32) aumentan del exterior al interior de la pieza.

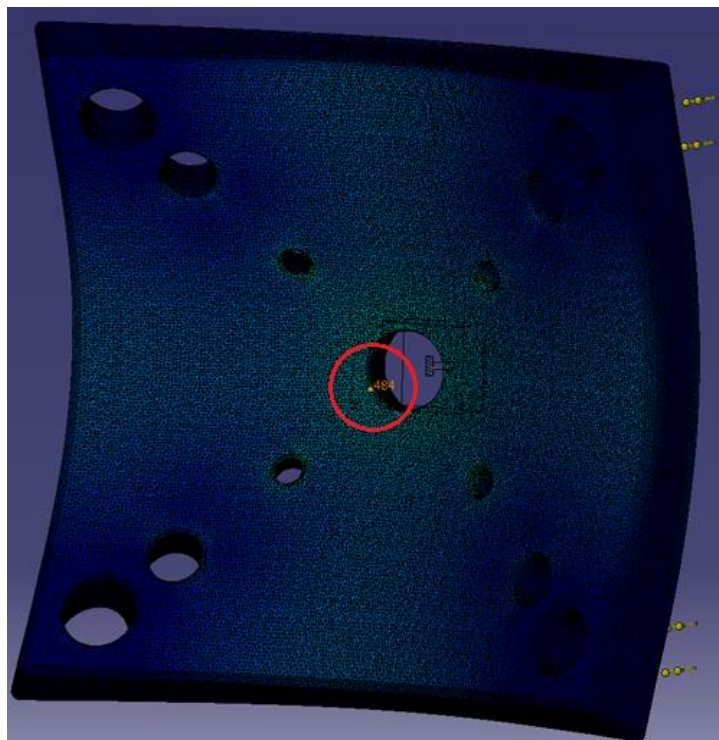


Figura 3.32: Cargas y deformación en la simulación de la primera pieza

En la figura 3.33 se aprecia la zona con mayor carga, la unión del avellanado y la rosca del agujero central. Se aprecia que esa zona tiene gradientes muy altos de cargas, por lo que es recomendable escoger valores algo más alejados, manteniendo un margen.

Los valores observados rondan los 490 Mpa, valores que superan el límite elástico del material.

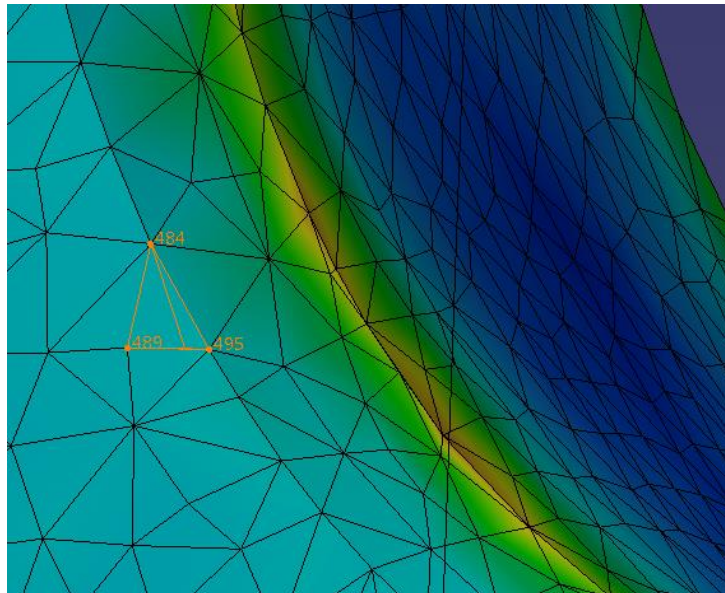


Figura 3.33: Detalle de las cargas producidas en la primera pieza

Los desplazamientos máximos alcanzados en las zonas de aplicación de la carga son de 1,17 milímetros. Se observa una clara distribución de desplazamientos desde el interior hasta el exterior de la pieza.

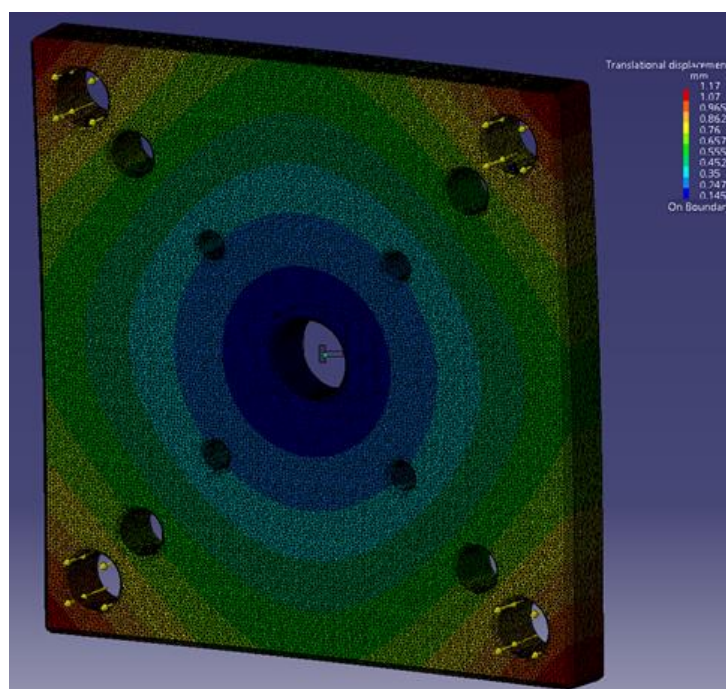


Figura 3.34: Niveles de desplazamiento producidos en la primera pieza

En el segundo análisis se tomaron las siguientes medidas con el objetivo de mejorar los resultados anteriormente obtenidos:

- Aumento del grosor de la pieza hasta los 40 milímetros
- Reducción del tamaño de la malla hasta 1 milímetro

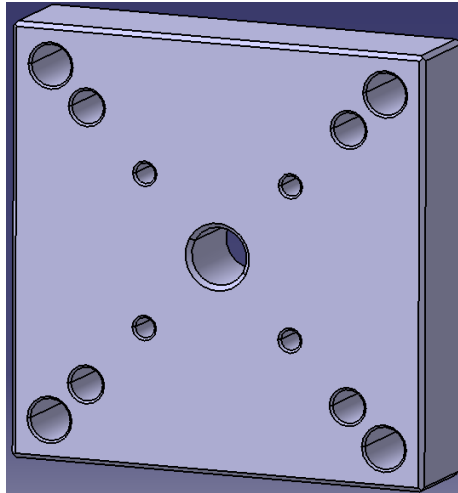


Figura 3.35: Utillaje de 40 milímetros de espesor

Al igual que en el análisis anterior, las cargas se distribuyen desde el exterior hasta el interior de la pieza central. En la figura 3.36 se aprecia el sentido de las cargas de tracción y como en la zona central se encuentran colores más vivos, indicadores de cargas más elevadas.

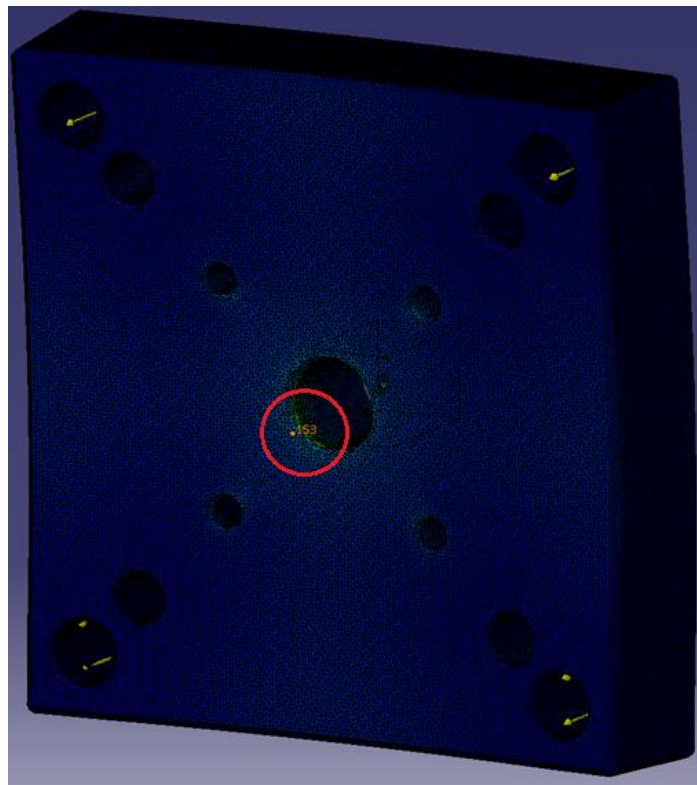


Figura 3.36: Cargas y deformación producidas en la segunda pieza

En la siguiente figura se observa en detalle el agujero central con el avellanado y la rosca interior. El gradiente de tensiones es mucho menor en comparación con el anterior análisis. Se observa una concentración de tensiones muy elevada en el contacto del avellanado con la rosca central. Estas cargas tan elevadas (superan límite elástico pieza) no reflejan en realidad el comportamiento de la pieza. Es necesario establecer un margen de aceptación de los valores, es decir, en la periferia de esta zona el gradiente es constante por lo que se seleccionan estos valores (150 MPa). Con estas cargas se establece un coeficiente de seguridad de 1,43 puntos.

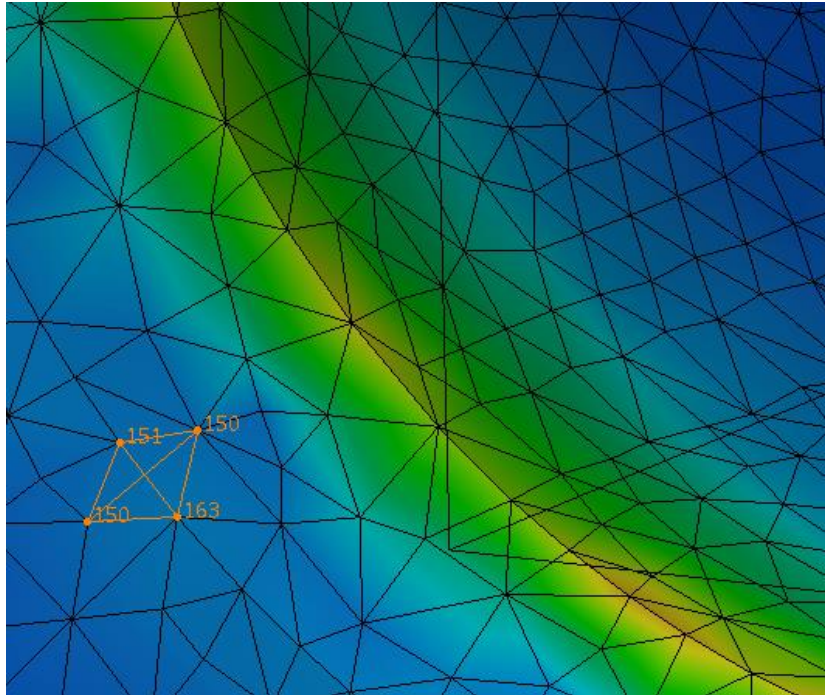


Figura 3.37: Detalle interior de las cargas producidas en la segunda pieza

Realizando un análisis más fino, reduciendo la dimensión de la malla, implicaría un aumento de las tensiones máximas alcanzadas produciéndose igualmente en la zona de contacto de ambas superficies. Es un error de la simulación que hay que saber interpretar.

A la hora de analizar si se ha realizado un análisis representativo sobre la pieza, se observa el porcentaje de error global que tiene el modelo. Por debajo del 15 % una simulación se puede considerar como aceptable y por debajo del 5 % es una simulación que simula casi a la perfección la realidad.

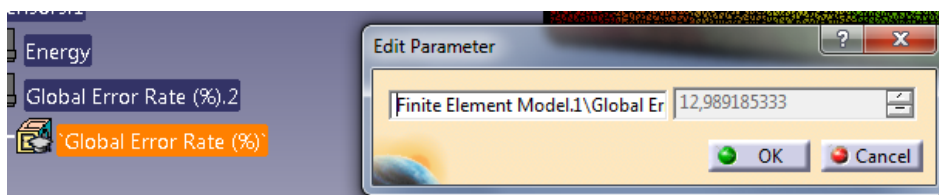


Figura 3.38: Porcentaje de error en la simulación de la segunda pieza

Con un valor del 12,9% de error global se acepta la simulación y análisis de la pieza realizados.

El desplazamiento observado sigue el mismo patrón anteriormente estudiado. Se propaga desde el centro con desplazamiento nulo hasta los límites exteriores de la pieza con desplazamientos máximos que alcanzan los 0,26 milímetros.

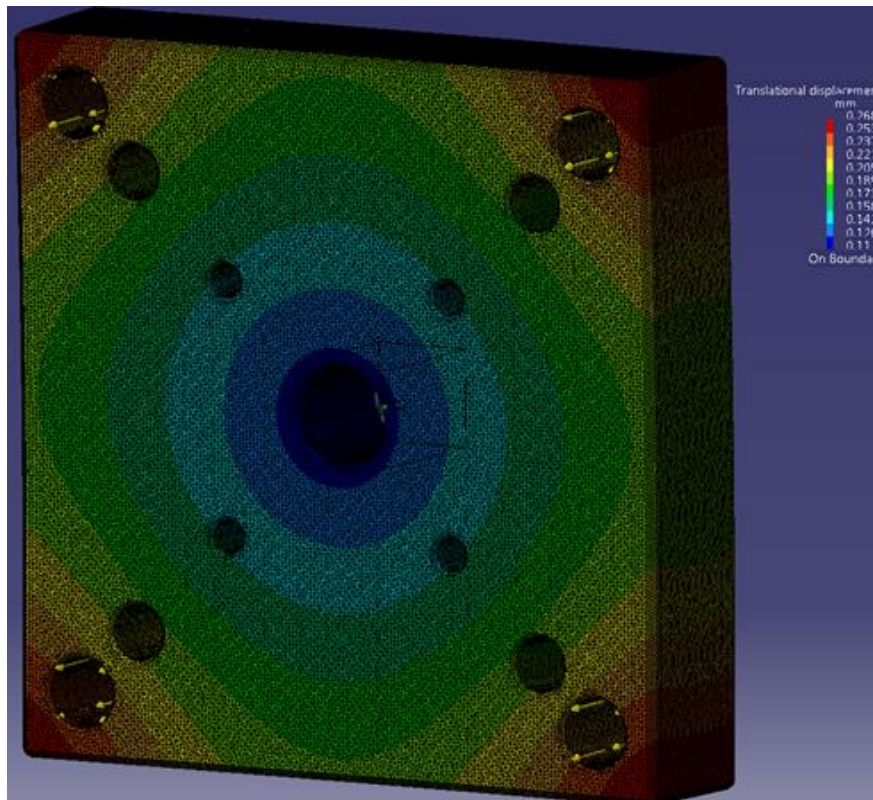


Figura 3.39: Niveles de desplazamiento producidos en la segunda pieza

4 Implementación del banco de ensayo y análisis de resultados

4.1 Montaje banco de ensayos

El director de área en la planificación de proyectos establece la ubicación del ensayo en una de las tres bancadas del laboratorio en función del espacio requerido y la disponibilidad de las bancadas.

Una vez establecida la bancada y seleccionados los componentes auxiliares y de actuación comienza el montaje del ensayo. En primer lugar se colocan los conjuntos unión-soporte (figura 3.20) y soporte rígido-cilindro (figura 3.21) respetando las medidas establecidas por el cliente para su montaje (plano en anexos). Se coloca el espécimen a ensayar (en este caso una mangueta mano derecha) y se fija a los utillajes.

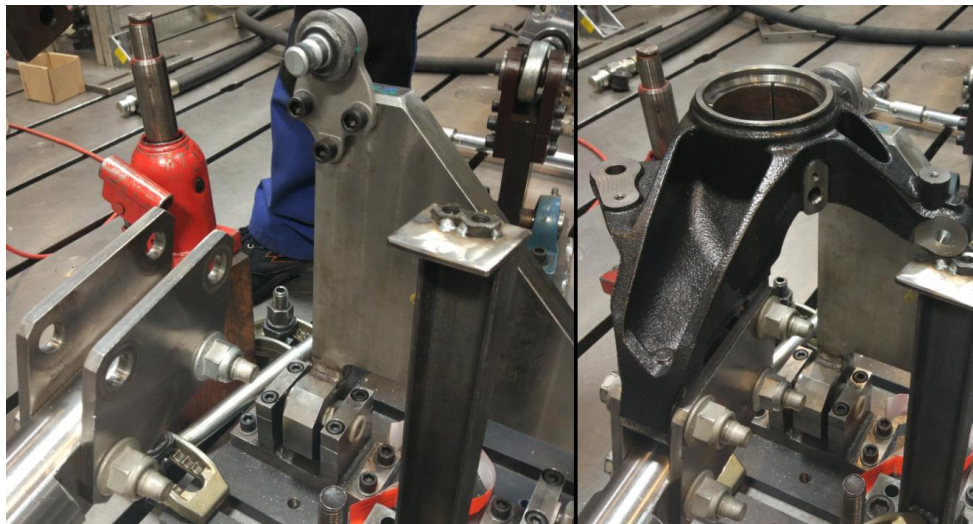


Figura 4.1: Utillajes montados (izda.) y mangueta fijada a los utillajes (dcha.)

Posteriormente se coloca el cubo de rueda sobre la mangueta incorporando un acoplamiento y arandela cónicos para la correcta fijación. El cubo debe quedar a 0° respecto de la horizontal.



Figura 4.2: Interior de la unión mangueta y cubo de rueda

Sobre el cubo de rueda se fijan las placas de amarre en función de la disposición que se vaya a ensayar. Esto permite situar las direcciones de acción de los tres ejes y con ello alinear los actuadores.

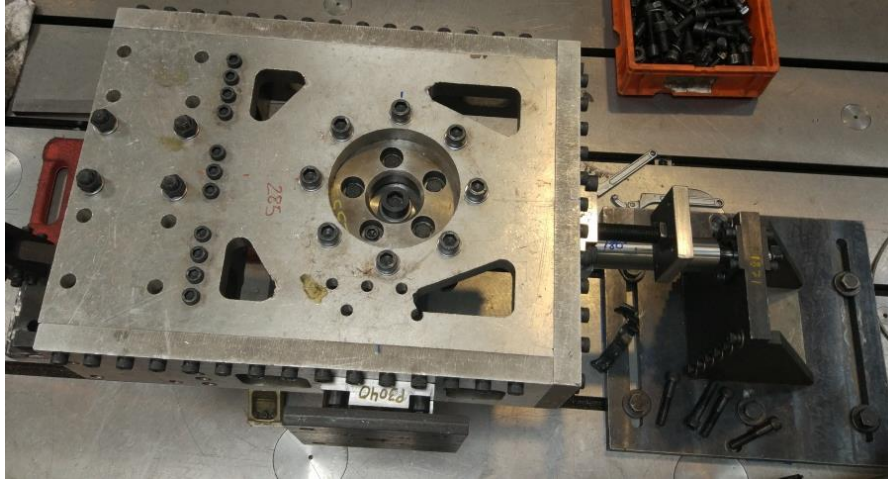


Figura 4.3: Cubo de rueda colocado sobre la mangueta

Los actuadores del eje X y Z se amarran a sendas escuadras reguladoras y se colocan pórticos de sujeción en la mitad de los actuadores para reducir las cargas que se producen los tornillos en el amarre posterior. La fijación entre las placas de amarre y las swivels se realiza mediante los utilajes de unión.

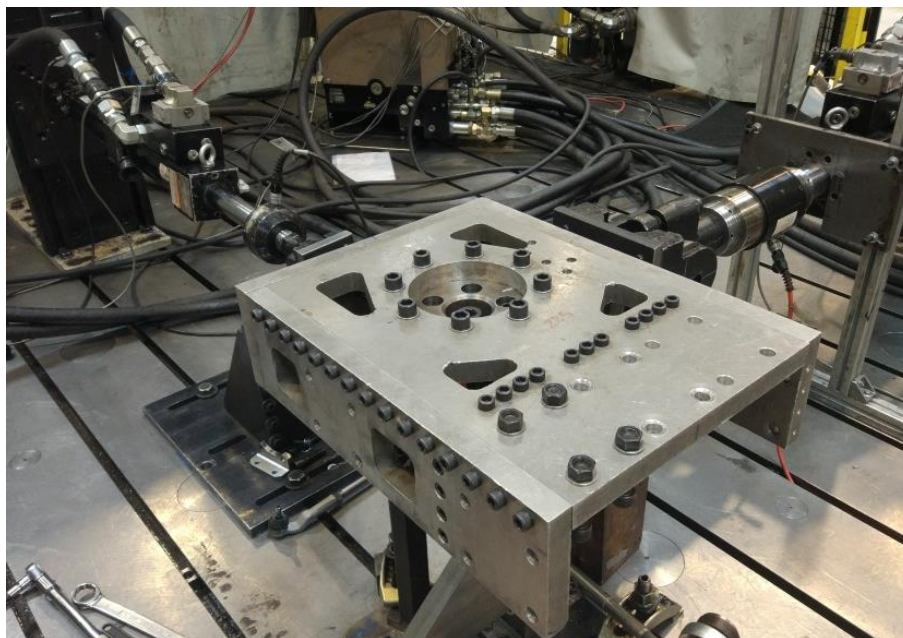


Figura 4.4: Conexión al cubo de rueda de los actuadores X y Z

El actuador correspondiente al eje Y se conecta con un reenvío al cubo de rueda. Este reenvío permite transmitir las cargas de manera perpendicular al cubo de rueda. Es necesario mantener la guía de unión del reenvío con la placa de amarre a 90° respecto de la horizontal para la correcta transmisión de cargas.



Figura 4.5: Disposición final del layout con los 3 actuadores

Por último, se comprueban los pares de apriete de cada tornillo del cubo de rueda. El par más importante es el que se da entre la mangueta y el cubo de rueda, llegando hasta los 730 Nm.

4.2 Ajuste sistemas de actuación (tuning) y pruebas iniciales

Identificados los elementos que intervienen en el layout a través de sus etiquetas de identificación (tabla 4) se procede a construir la estación de trabajo (como se detalló en el apartado 2.2.4.2).

En el constructor de estaciones se comienza añadiendo el número de canales según el número de actuadores que se vayan a utilizar clicando en la pestaña “+”. En este caso, se añaden tres canales (Ch1, Z, Y). Se define el control de cada actuador (fuerza y desplazamiento) y tanto el SLOT y la HSM al que están conectados.

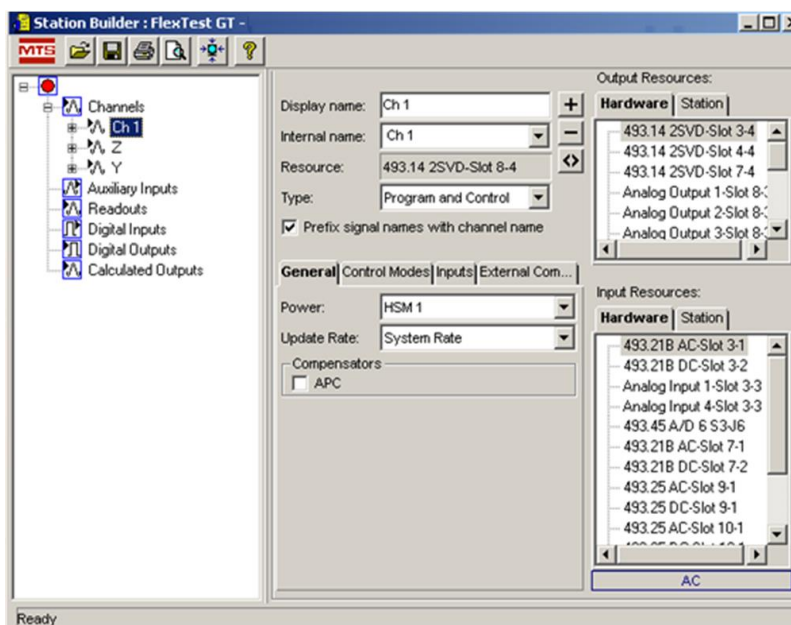


Figura 4.6: Construcción de la estación de trabajo

En el manejador de estaciones, se abre la estación recién creada. En primer lugar se realiza la configuración, es decir, se calibra cada actuador en sus dos modos de control. Se añaden los ficheros de calibración que coinciden con los números de serie de LVDT y célula de carga.

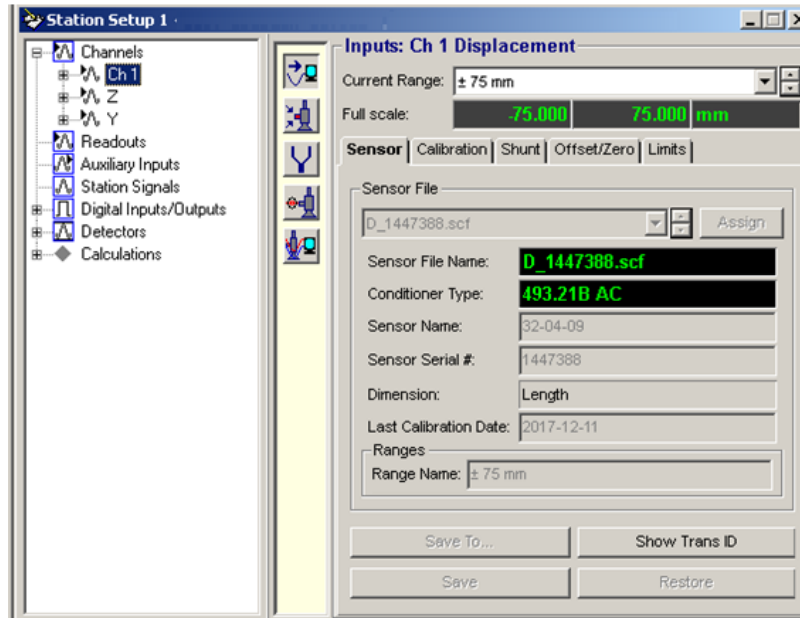


Figura 4.7: Calibración en desplazamiento del actuador Ch 1

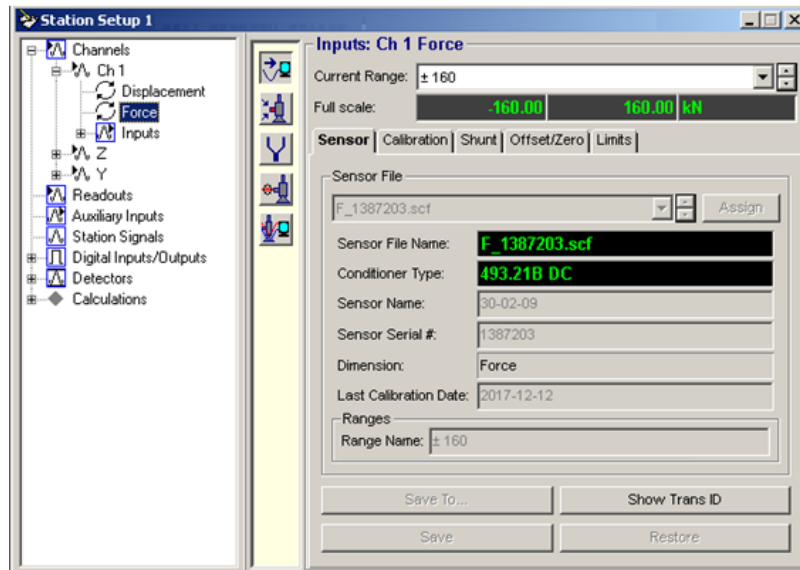


Figura 4.8: Calibración en desplazamiento del actuador Ch 1

Tras la calibración se procede a calentar el actuador para que funcione en las condiciones óptimas de trabajo. En función del tamaño del actuador, se requerirá de más o menos tiempo siendo un tiempo aproximado para los actuadores de 15-25kN es de 25 minutos de calentamiento. El actuador se calienta en desplazamiento (actuador no sujeto a espécimen) realizando ciclos con una determinada amplitud y frecuencia.

La segunda etapa en el manejador de estaciones consiste en el tuning de los actuadores lo que permite definir las ganancias del controlador.

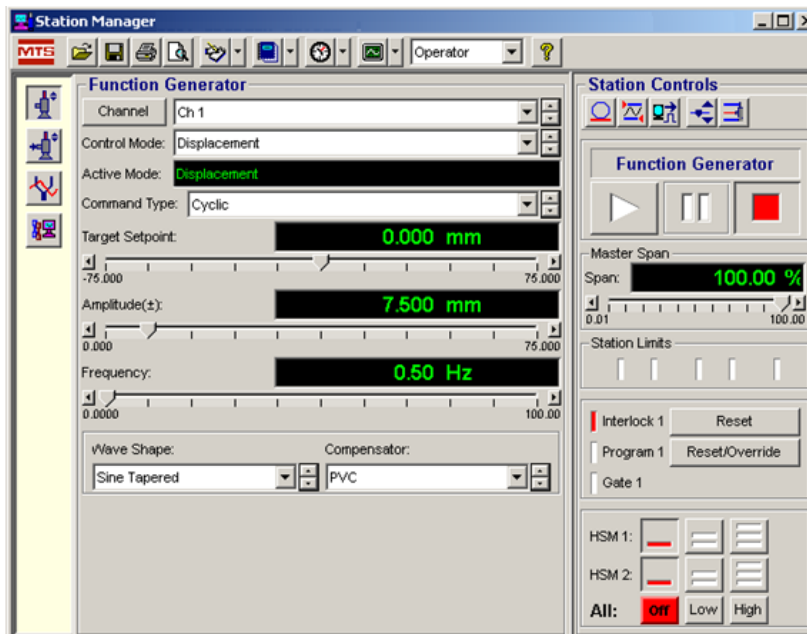


Figura 4.9: Configuración de la señal cíclica en el tuning en desplazamiento del actuador

El tuning se realiza una vez se ha calentado el actuador. Primero se realiza el tuning en desplazamiento. Consiste (al igual que el calentamiento) de una señal cíclica con una amplitud igual al 10% del desplazamiento de la LVDT (en este caso 10% de 75 milímetros) a una frecuencia de 0,5 Hz.

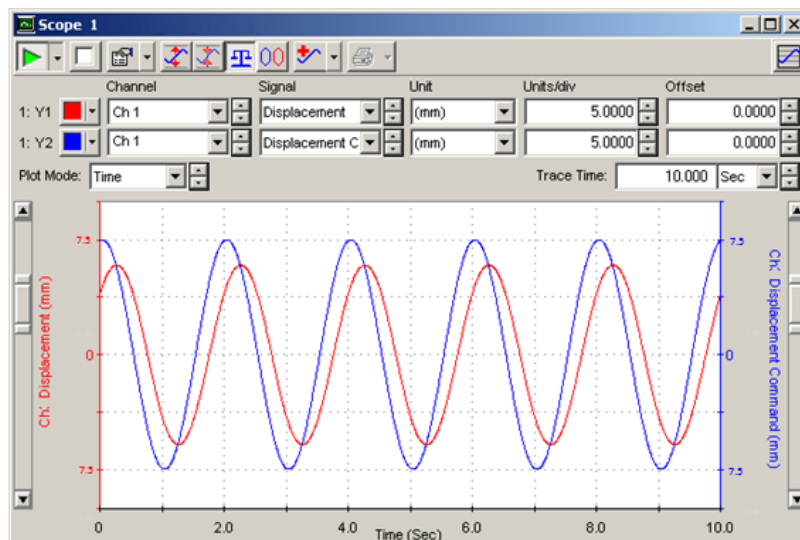


Figura 4.10: Señal comandada (azul) frente a señal respuesta (roja)

Una vez en marcha, el actuador no consigue alcanzar la señal comandada. Es necesario incrementar el ajuste P Gain hasta que se vea un poco de sobre-pico entre la señal respuesta y la comandada. Posteriormente se modifica el ajuste de I Gain para reducir el pico y el rizado de la señal.

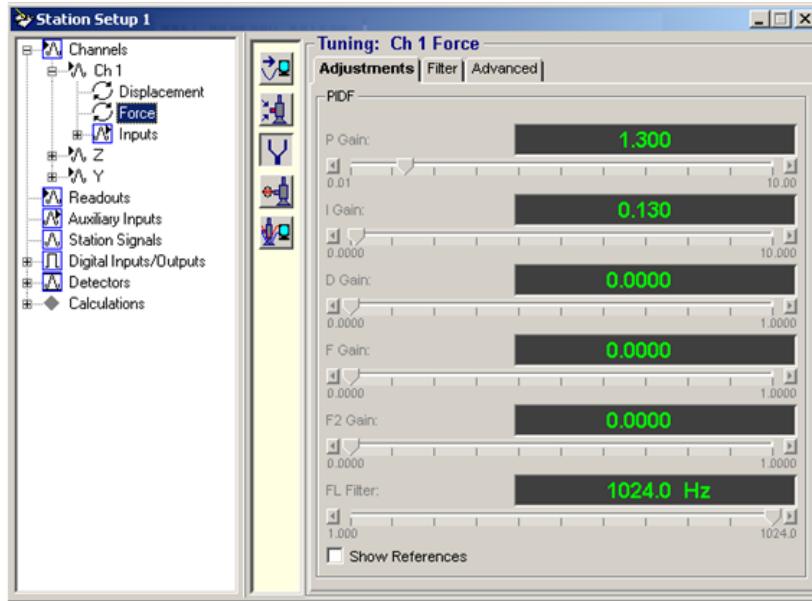


Figura 4.11: Ajuste de los valores P Gain e I Gain en el tuning en desplazamiento del actuador.

Realizado el tuning en desplazamiento, el actuador se fija al espécimen y se realiza el tuning en fuerza programando otra señal cíclica con una amplitud igual al 10% la carga máxima del ensayo o un 10% la carga máxima del actuador. Se elige la más restrictiva de las dos.

En el tuning, es recomendable no sobrepasar en ningún momento el valor de P Gain por encima de un valor 2. Esto podría provocar alteraciones e inestabilidad en el actuador.

Cuando se tienen las dos formas de control del actuador controladas, se activa un compensador PVC, que asegura que se llegue a los valores comandados.

4.3 Programación y ejecución ensayo

El procedimiento de ensayo se lleva a cabo a través del "Procedure Editor" que permite crear los pasos o comandos que conforman el ensayo.

Type	Name	Start	Interrupt
	Trend 1	<Procedure>.Start	
	BUFFER	<Procedure>.Start	
	Cyclic Acquisition 1	<Procedure>.Start	
	Precarga Z Vertical	<Procedure>.Start	
	Mantener Z Vertical	Precarga Z Vertical.Done	
	Carga en X Longitudinal	Precarga Z Vertical.Done	
	Dwell Command 1	Carga en X Longitudinal.Done	
	Carga en Y Lateral	Carga en X Longitudinal.Done	
	HSM OFF	Carga en Y Lateral.Done	

Figura 4.12: Procedimiento de ensayo completo

En primer lugar se definen las distintas adquisiciones de datos del ensayo. La adquisición de tendencia (*Trend 1*) va a recoger los valores máximo, mínimo y media de los oparametros seleccionados. Se establece un tiempo intervalo de 5 segundos, es decir, cada 5 segundos se obtiene un punto para la tendencia que proviene de la media de todos los puntos registrados durante esos 5 segundos.

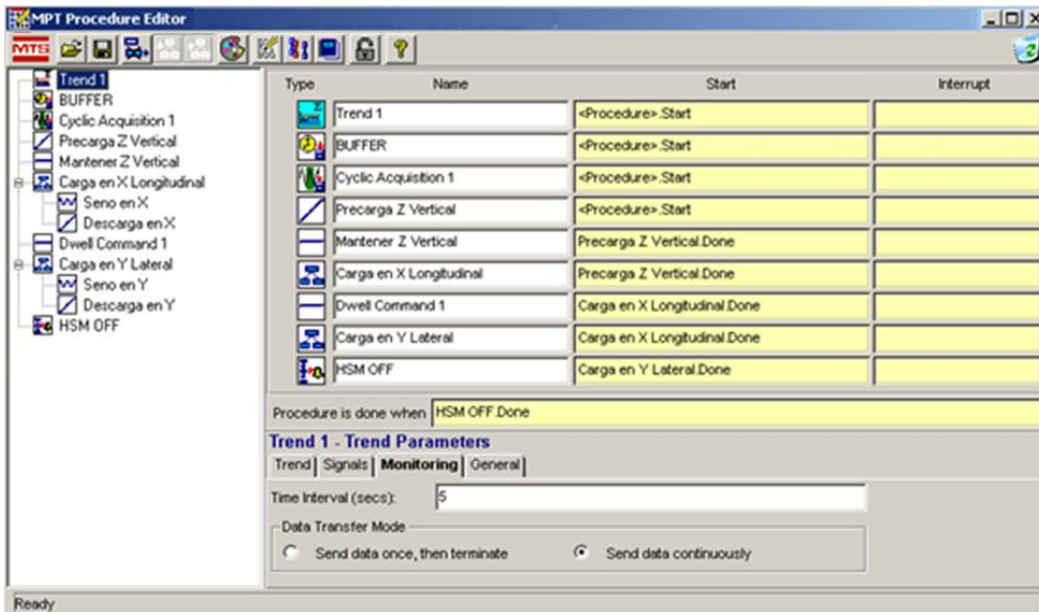


Figura 4.13: Adquisición en tendencia. Time Interval.

La adquisición cíclica (*Cyclic Acquisition 1*) recoge los datos exactos (desplazamiento, fuerza comandada y tiempo) de cada actuador. Se define la frecuencia de muestreo en 50 Hz, por lo que se recogen datos cada 0,02 segundos.

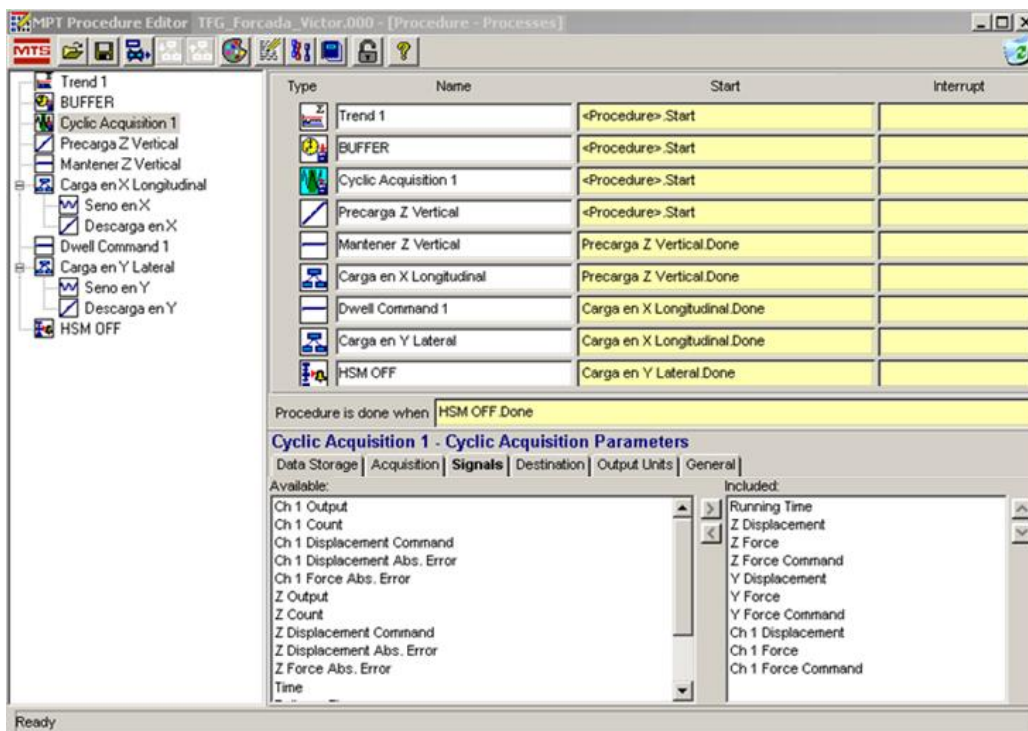


Figura 4.14: Parametros seleccionados en la adquisición cíclica.

Tras definir las adquisiciones se procede a crear los comandos que los actuadores realizarán. Primero se realiza una precarga en el actuador Z de -2000 Newtons con una rampa de 500 N/s.

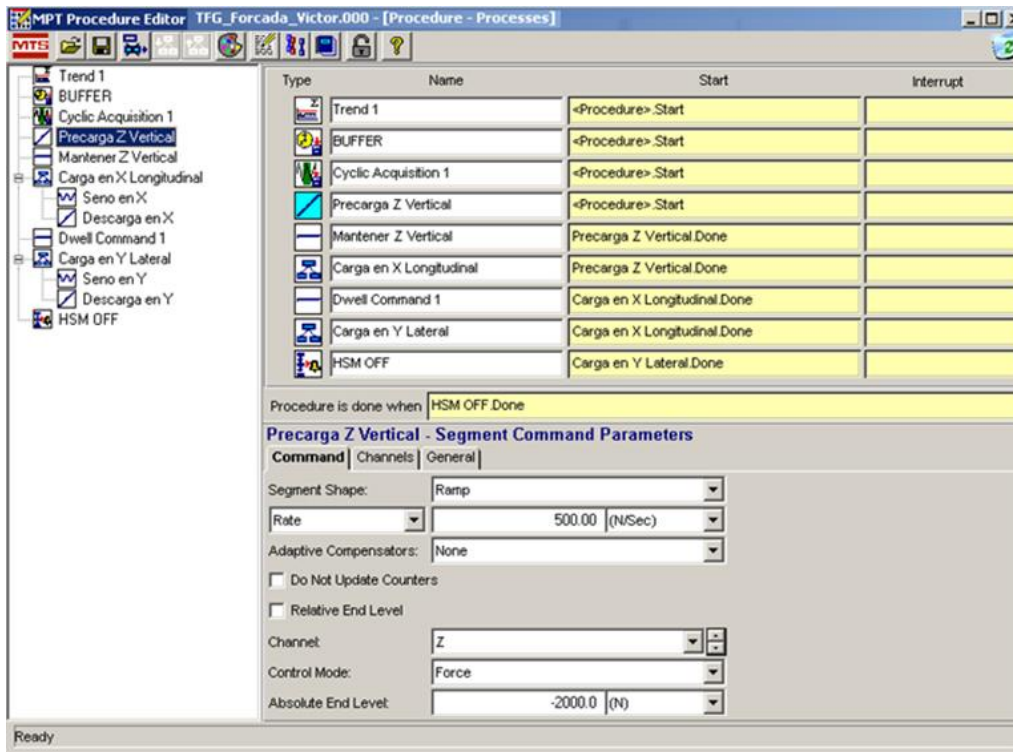


Figura 4.15: Precarga en Z.

Es necesario que esta precarga en Z se mantenga durante todo el ensayo, ya que se simula que el vehículo está en contacto con el suelo. Se define un comando, para mantener la carga Z durante todo el ensayo.

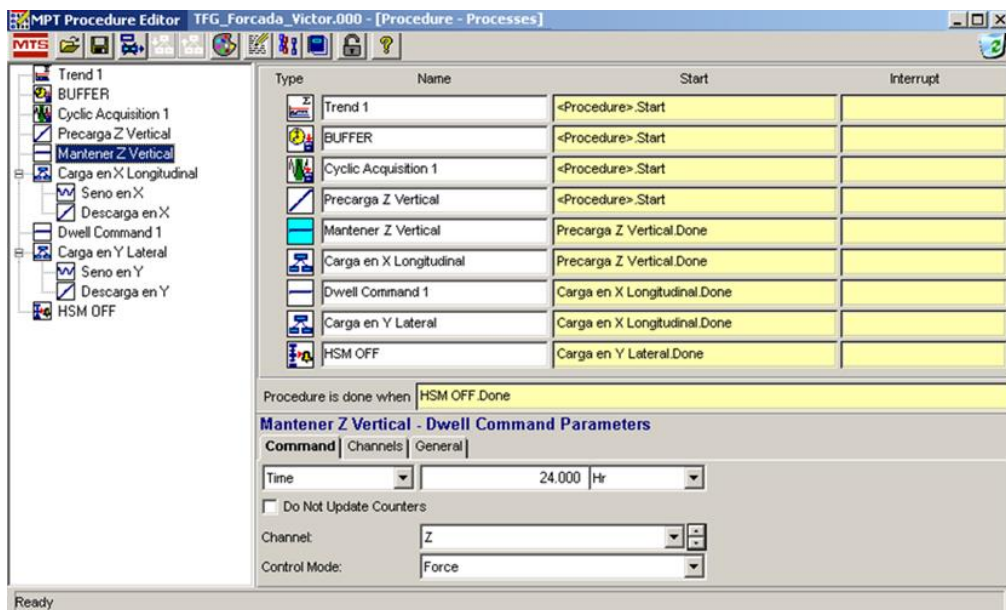


Figura 4.16: Comando para mantener la carga en Z durante todo el ensayo.

Las dos secuencias de fatiga se separan en dos. Se crea un subgrupo (Carga en X Longitudinal).

Primero se define la onda senoidal que va a describir el actuador Ch 1 (X) con máximo 7000 N y mínimo -3500 N a una frecuencia de 1,5 Hz. Describirá en total 200 ciclos. Se añade un compensador adaptativo para asegurar que se llega a las cargas satisfactoriamente.

Cuando se hayan realizado los 200 ciclos, un nuevo comando descargará el actuador hasta 0 Newtons.

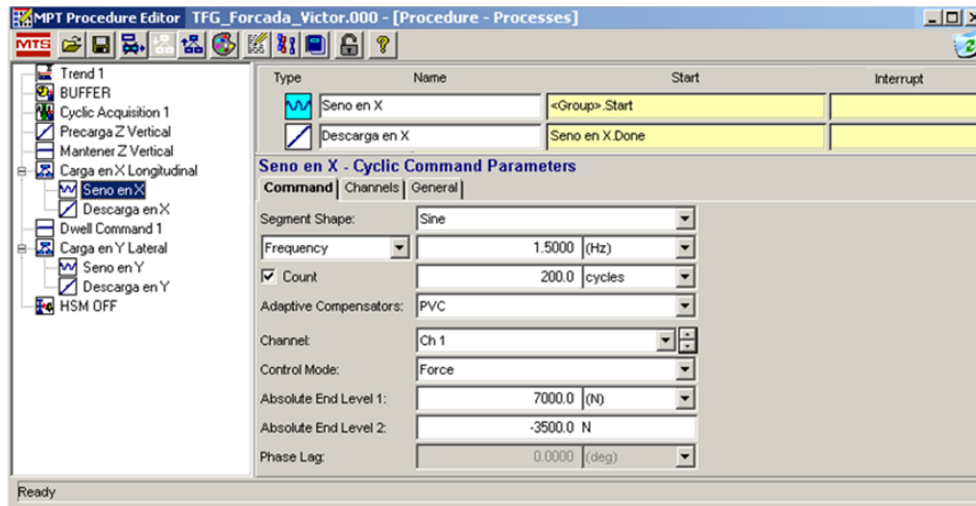


Figura 4.17: Parametros del seno en el actuador Ch 1

Posteriormente, se establece un comando que asegura que el actuador Ch 1 va a mantenerse en 0 N. Si no se incluye este comando, al comenzar el siguiente subgrupo, este actuador se cargaría al afectarle el seno del actuador Y.

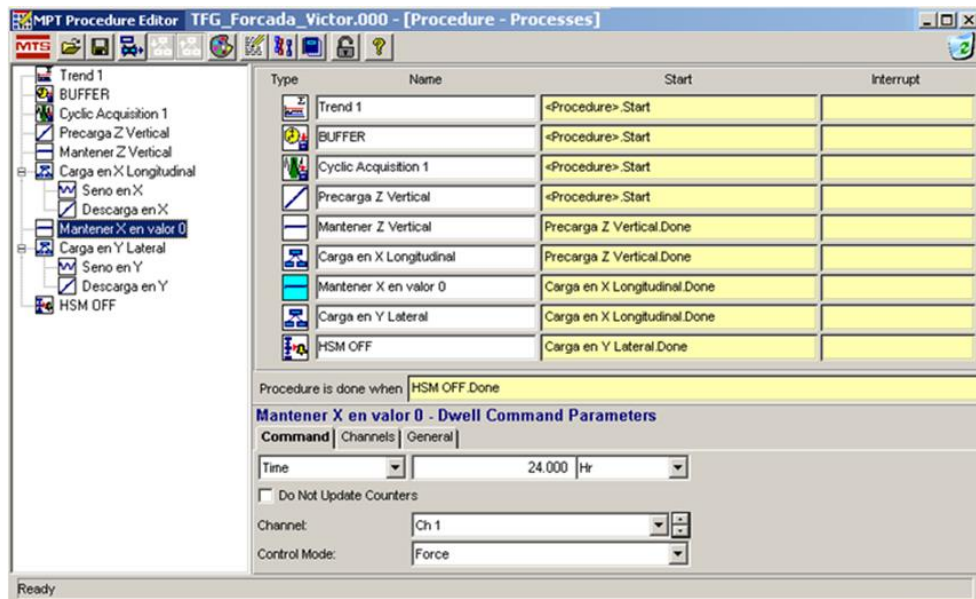


Figura 4.18: Comando para mantener el actuador Ch 1 a 0 Newtons

El segundo subgrupo (*Carga en Y Lateral*) comienza cuando se ha establecido 0 N en el actuador Ch 1. La onda senoidal que lo conforma alcanza los 5000 n hasta -2000 n a una frecuencia de 1,5 Herzios. Al igual que el subgrupo anterior describe 200 ciclos y se incorpora el compensador adaptativo.

Para dar por finalizado el procedimiento, se establece el corte de la HSM que corta el flujo hidráulico a los actuadores.

Antes de comenzar el ensayo, se realizan las últimas comprobaciones. A través del comando manual se controla en fuerza cada actuador para que no realicen fuerza, es decir, se queden en 0 kN. Seguidamente se abre la ventana “*Signal Auto Offset*” donde se establece a cero los desplazamientos de los actuadores. En la propia ventana, la opción “*Offset*” indica el valor real que está realizando el actuador (por ejemplo, el actuador se encuentra a 50 milímetros, pero establecemos el cero ahí para realizar el ensayo).

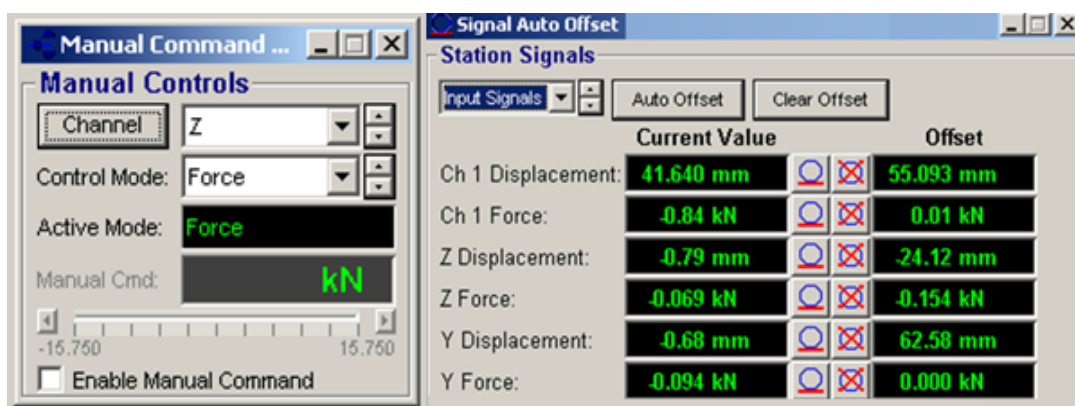


Figura 4.19: Comando manual (izda.) y Signal Auto Offset (dcha.)

Por último, se definen los Interlocks (limitadores en desplazamiento y fuerza) que permiten detectar cualquier grieta o que algún actuador ejerce demasiada fuerza y es necesario parar el ensayo. Se establece un límite superior e inferior.

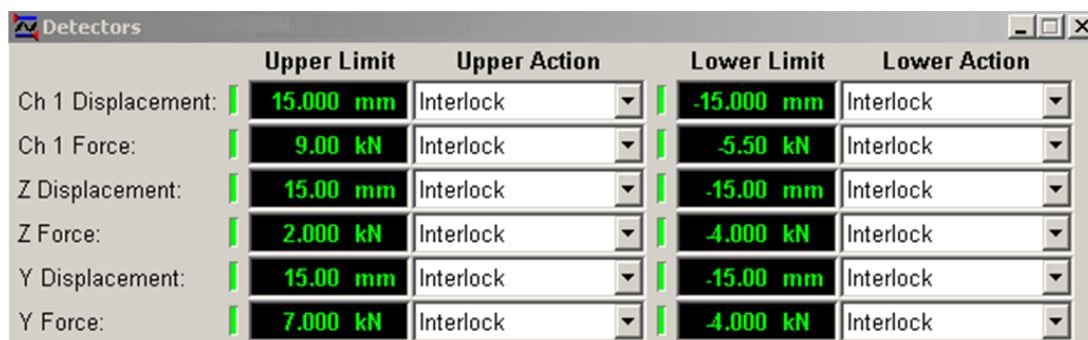


Figura 4.20: Interlocks

Se da comienzo al ensayo. A través de las distintas pantallas se observa distinta información que refleja el ensayo como número de ciclos, tiempo de ensayo, cargas y desplazamientos instantáneos, gráficas, etc.

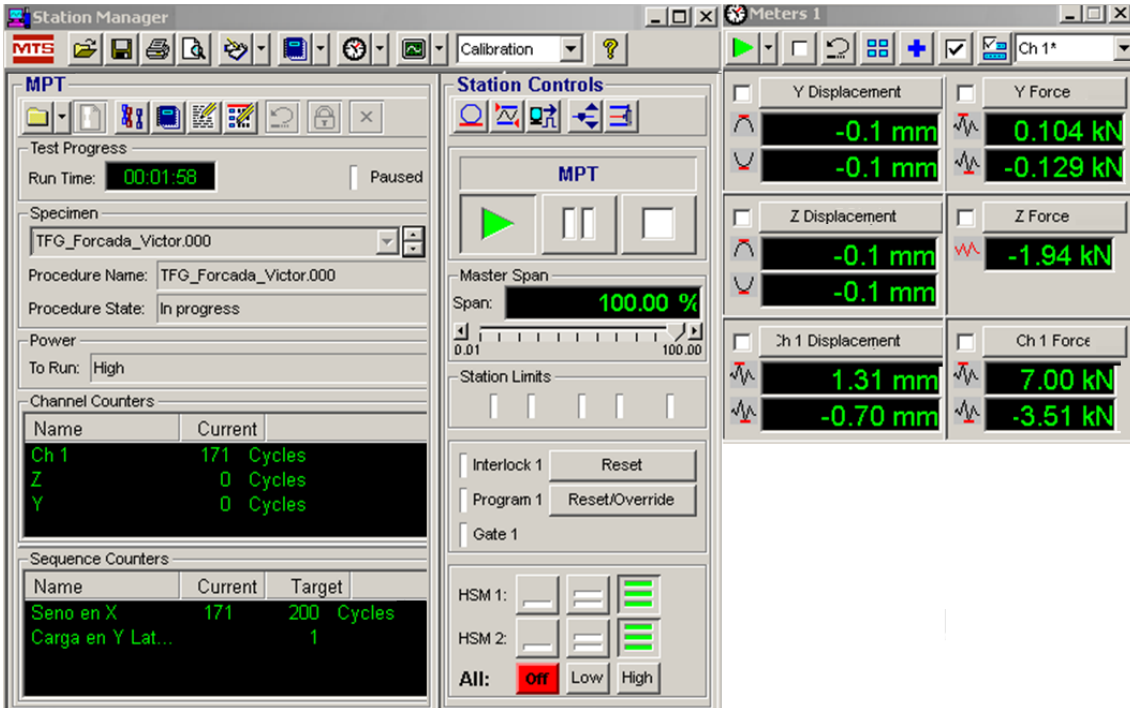


Figura 4.21: Información instantánea durante el ensayo

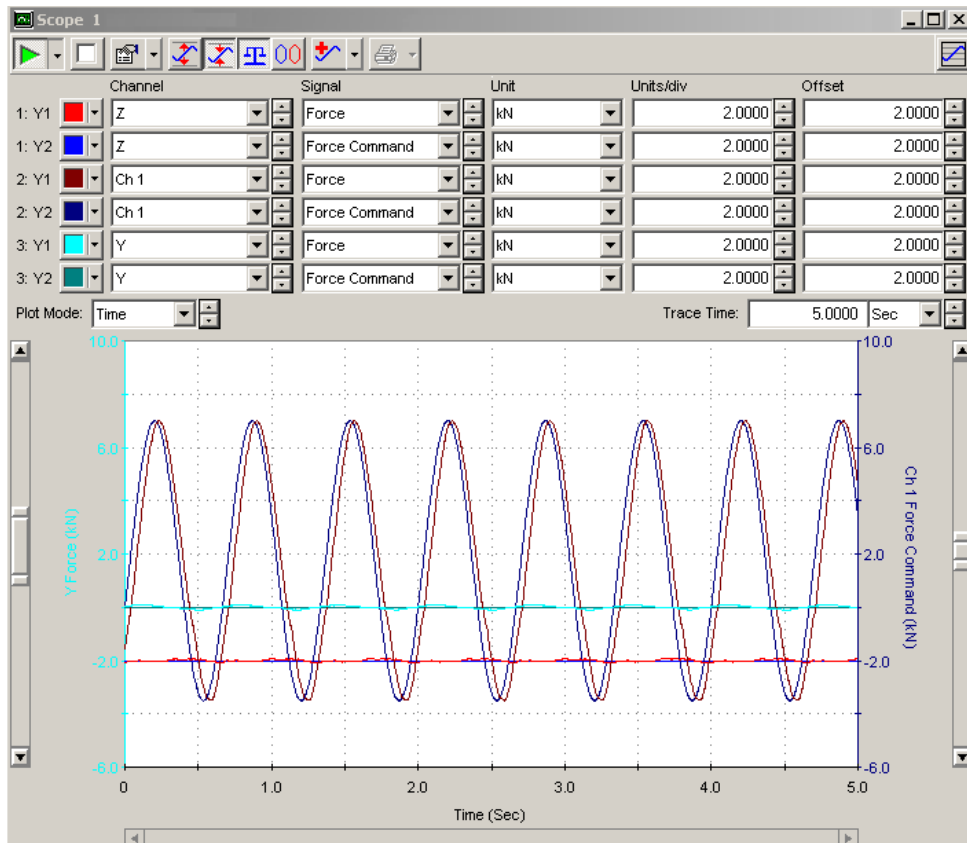


Figura 4.22: Gráficas durante el ensayo

El ensayo finalizará cuando cumpla con todos los ciclos o porque algún interlock se ha sobrepasado.

4.4 Análisis de datos y resultados

Tras finalizar el ensayo de la disposición longitudinal a fatiga, se han creado dos archivos “Trend” y “Cyclic” que contienen todos los datos correspondientes al mismo. El ensayo requirió 275 segundos habiendo realizado 475 ciclos.

El controlador se encuentra a una frecuencia de 2 kilohercios por lo que se adquieren 2000 puntos por segundo y al definir un tiempo intervalo de 5 segundos se registran 10.000 puntos por cada parámetro (desplazamiento máximo, mínimo...) definido para cada actuador. De estos 10.000 puntos se recoge el valor máximo absoluto (o mínimo, en relación a la línea de tendencia) y es ese punto el que se ve reflejado en el archivo “Trend”. En total se han obtenido 55 puntos para cada línea de tendencia.

En esta gráfica (figura 4.23) están presentes la fuerza máxima, mínima y media del actuador Ch 1 (X) frente a los ciclos durante todo el ensayo.

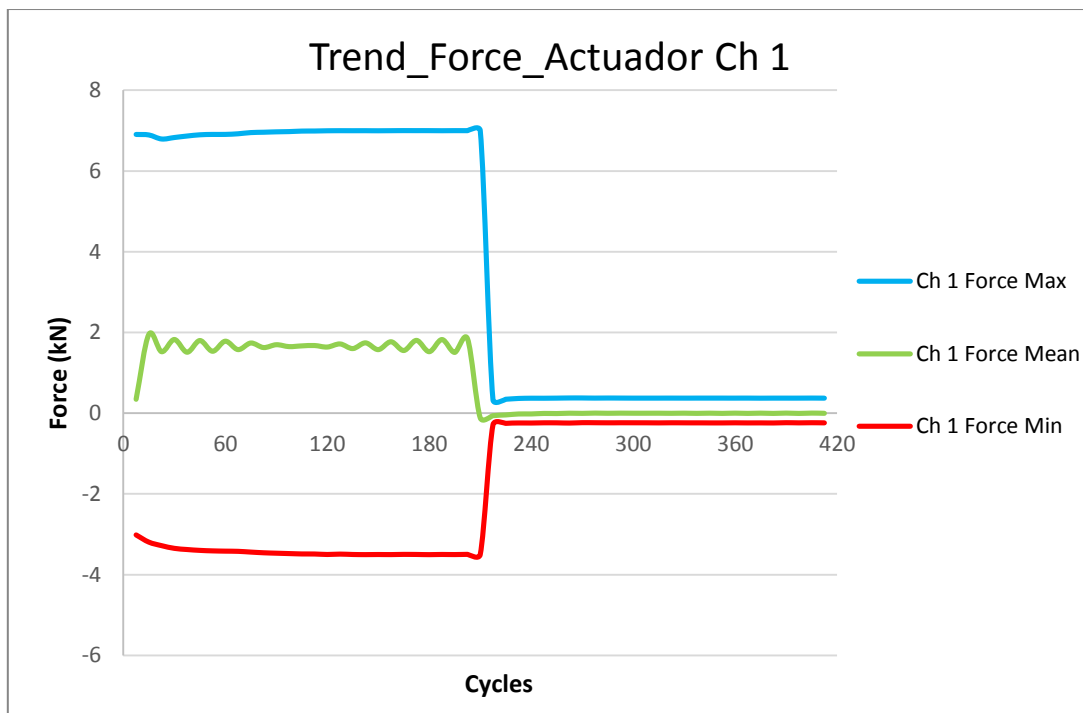


Figura 4.23: Gráfica de tendencia de la fuerza en el actuador Ch 1. Fuerza (kN) frente a ciclos.

Al comienzo del ensayo se observan pequeñas variaciones en las cargas aplicadas. Las holguras en la disposición del layout afectan directamente a los valores de fuerza y desplazamiento obtenidos. Es por ello que al principio las cargas no alcanzan los valores establecidos en el programa (+7 kN/-3,5 kN) y conforme se suceden los ciclos se estabiliza el layout y se alcanzan las cargas.

En la segunda parte del ensayo se observa que la carga del actuador oscila respecto a cero, a pesar de establecer un comando en el programa para mantener su valor en cero. La acción del actuador y exige al actuador cargarse y descargarse ligeramente.

En esta gráfica (figura 4.24) están presentes el desplazamiento máximo, mínimo y media del actuador Ch 1 (X) frente a los ciclos durante todo el ensayo.

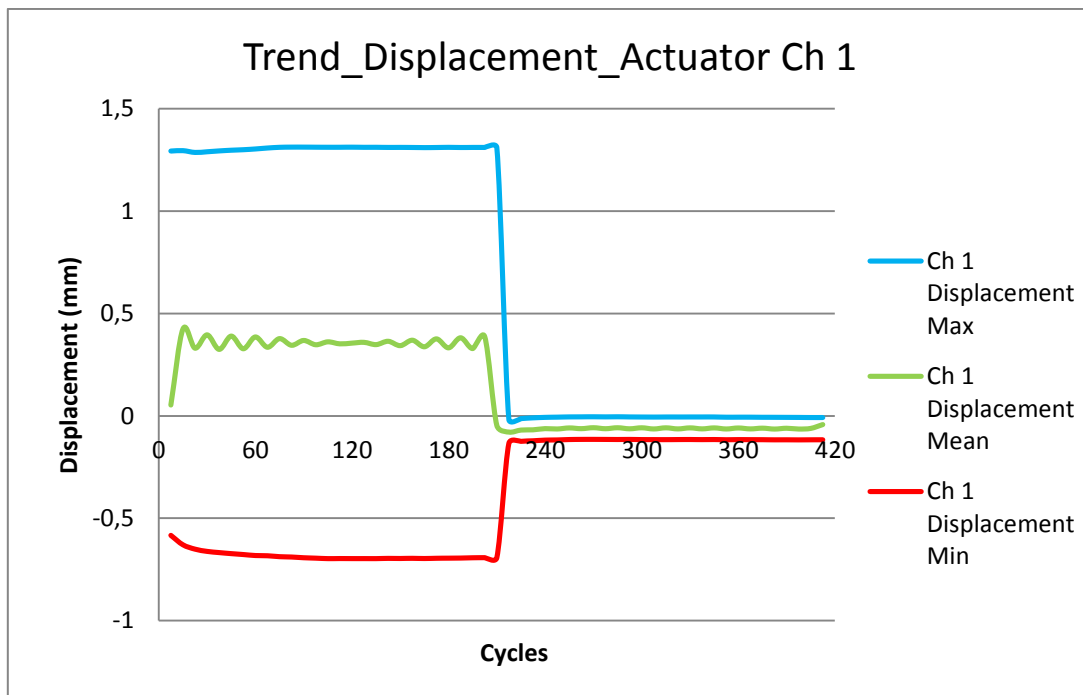


Figura 4.24: Gráfica de tendencia del desplazamiento en el actuador Ch 1. Desplazamiento (mm) frente a ciclos.

Al comienzo del ensayo se observa que los desplazamientos tratan de estabilizarse. En el caso del desplazamiento mínimo este adquiere una tendencia negativa que se estabiliza al final de los 200 ciclos. Esta tendencia se debe a holguras presentes en las rótulas/swivels y en el layout completo que necesitan un tiempo hasta que estabilizan. En el desplazamiento superior se ha estabilizado con mayor rapidez.

Lo más llamativo en esta gráfica se presenta a mitad del ensayo ya que corresponde con el cambio de fatiga al actuador Y. Se observa en esa zona que el valor máximo de desplazamiento está muy próximo a cero aunque el valor mínimo se aleja ligeramente. Este hecho es aceptable ya que es normal que se desplace el actuador Ch 1 debido a la acción del actuador Y. Además, observando la escala de desplazamiento se aprecia que estos valores mínimos rondan los -0,1 milímetros.

En el archivo "Cyclic" se han registrado puntos cada 0,02 segundos para cada parámetro (fuerza, fuerza comandada, desplazamiento...) definido para cada actuador. El estudio de estos datos permite conocer el comportamiento durante todo el ensayo de los distintos parámetros.

La primera gráfica (figura 4.25) representa el ensayo completo desde el punto de vista del actuador Ch 1. En la primera etapa se suceden los ciclos entre los valores programados (+7kN/-3,5kN) sin apreciarse la onda senoidal que los comanda. En la segunda etapa (a partir de la mitad del ensayo) se aprecia que la señal comandada del actuador es 0 kN aunque la señal respuesta no responde de igual manera ya que se ve afectada por alteraciones producidas por el otro actuador.

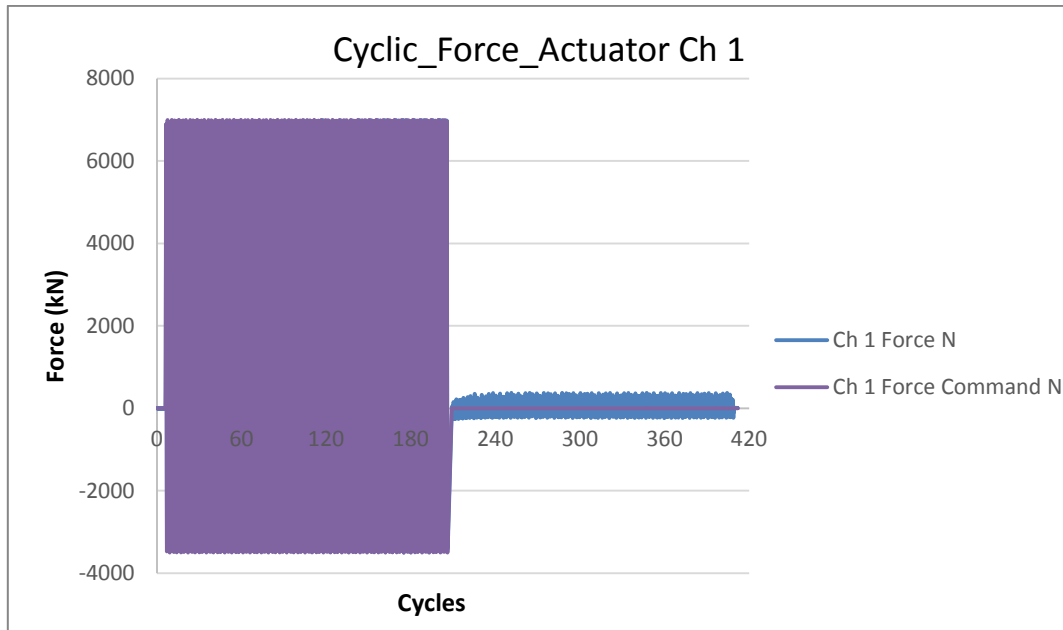


Figura 4.25: Gráfica cíclica de la fuerza del actuador Ch 1 durante todo el ensayo. Fuerza (kN) frente a ciclos.

En la segunda gráfica (figura 4.26) se observa un periodo de 5 ciclos las ondas senoidales que describe el actuador Ch 1 en la primera parte del ensayo. En color morado se representa la señal comandada y en azul la señal respuesta. Se aprecian pequeñas perturbaciones en las ondas de la señal respuesta que en ningún caso interfiere en alcanzar los máximos y mínimos establecidos.

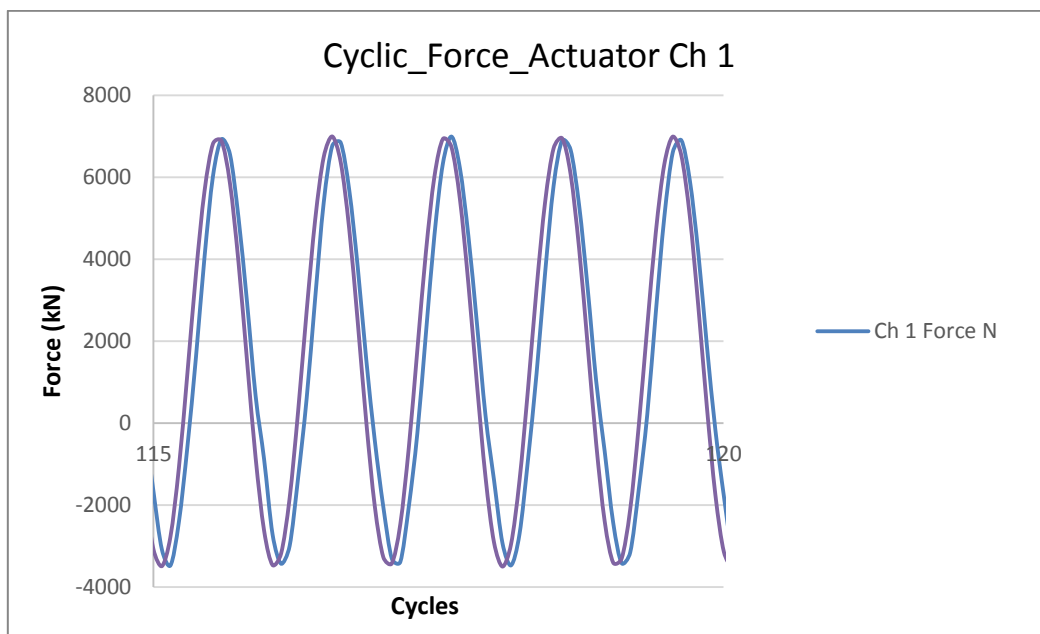


Figura 4.26: Gráfica cíclica de la fuerza del actuador Ch 1 durante 5 ciclos. Fuerza (kN) frente a ciclos.

En la figura 4.27 se representa el desplazamiento del actuador Ch 1 durante todo el ensayo. Como se ha comentado anteriormente en la figura 4.24, en la segunda mitad del ensayo el desplazamiento se ha originado como consecuencia de la acción del actuador Y. Este desplazamiento no es significativo y por lo tanto no afecta a los resultados obtenidos.

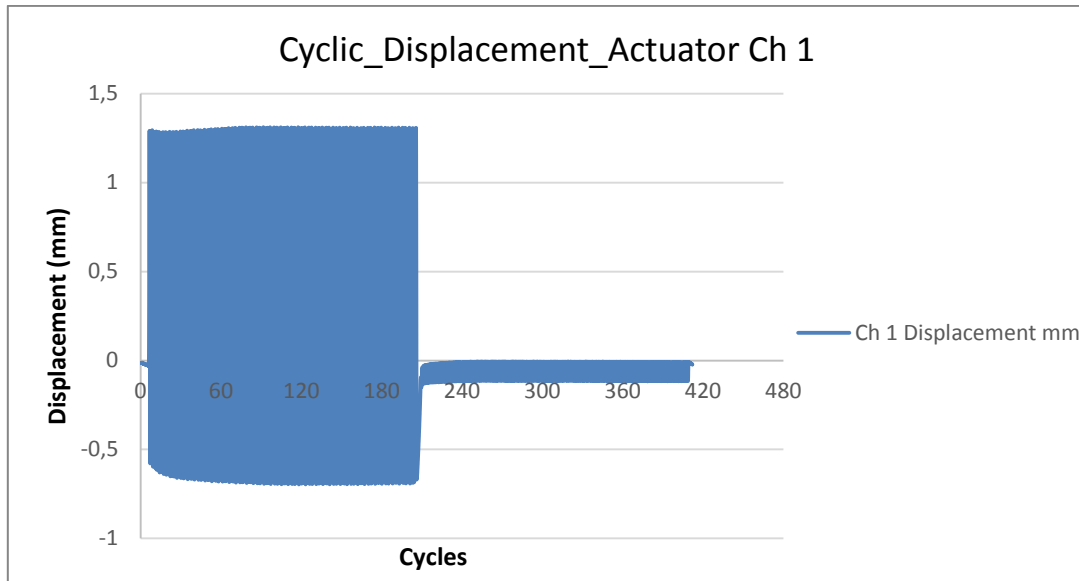


Figura 4.27: Gráfica cíclica del desplazamiento actuador Ch 1 en el ensayo. Desplazamiento (mm) frente a ciclos.

Durante un periodo de 20 ciclos se observa en la figura 4.28 las ondas de desplazamiento en el actuador Ch 1. No se aprecia ninguna anomalía siendo la amplitud constante.

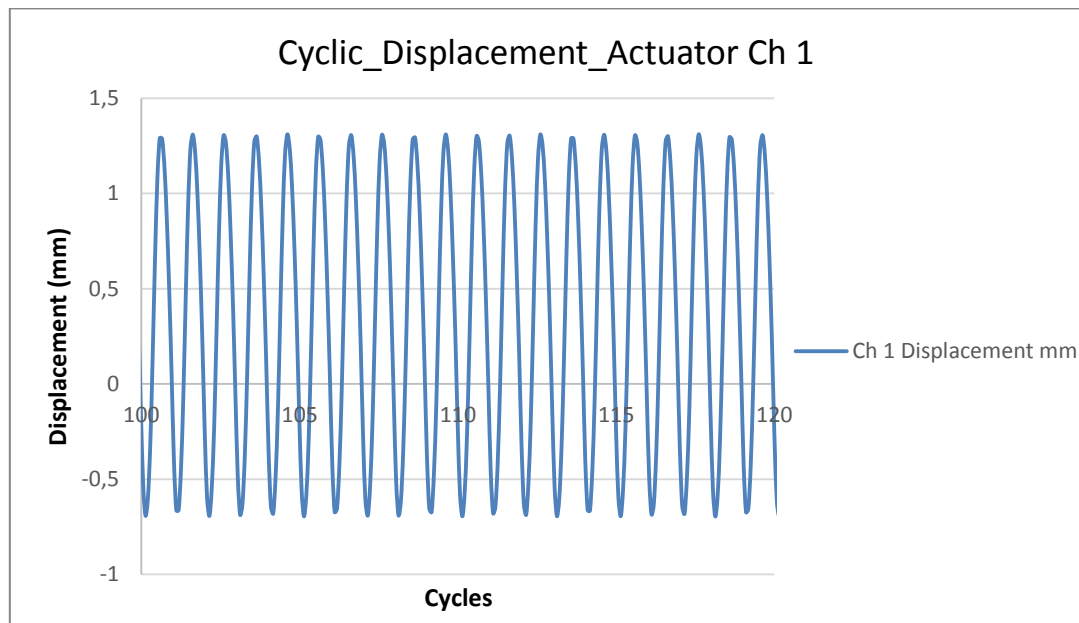


Figura 4.28: Gráfica cíclica del desplazamiento actuador Ch 1 en 20 ciclos. Desplazamiento (mm) frente a ciclos

Tras observar las gráficas realizadas durante estos 400 ciclos se puede observar que las señales son correctas y uniformes, y las señales respuesta son correctas. En las gráficas de tendencia en desplazamiento no es posible observar la progresión de ninguna grieta al tratarse de un ensayo previo para la comprobación de funcionamiento.

En el apartado de Anexo se han incluido el resto de gráficas pertenecientes a los otros dos actuadores. El resultado del ensayo se ha realizado teniendo en cuenta todas las gráficas.

5 Conclusiones y líneas abiertas

Mediante el desarrollo del presente proyecto se incrementan las capacidades del área de Mecánica de CEMITEC en lo relativo a la ejecución de ensayos de validación estructural sobre componentes de suspensión. Hasta la fecha, las capacidades existentes dentro de los sistemas de suspensión -a nivel de componente y para vehículo turismo- se centraban en la validación de rótulas, links, trapecios de suspensión y cubo de rueda.

En lo relativo a la validación experimental a fatiga de la mangueta, se utilizan bancos uniaxiales que hacen necesaria la configuración de un “setup” distinto para cada punto de amarre de la mangueta (lower ball joint, strut tube, steering arm, etc...). Es por esto que el desarrollo e implementación de un banco de fatiga triaxial permite evolucionar los bancos de validación existentes hacia una configuración de banco más completa, permitiendo reproducir un estado de tensiones en el componente más ajustado a la realidad.

A modo de resumen, las capacidades del centro quedan actualizadas de la siguiente manera:

Validación de sistemas de suspensión	
Componente/Sistema	Capacidad
Trapecios	OK
Rótulas	OK
Links	OK
Cubo de rueda	OK
Mangueta	OK
Suspensión completa	OK

Figura 5.1: Capacidades actualizadas del área para validación de sistemas de suspensión

El ensayo de fatiga con una duración de 400 ciclos ha permitido comprobar que el comportamiento del banco durante la ejecución de los distintos eventos de ensayo es correcto. Esto queda patente en las adquisiciones obtenidas, ya que reflejan una señal correcta y una respuesta uniforme adecuándose a los valores máximos y mínimos por lo que se da por válida la señal obtenida del banco. En pasos futuros, en función de las especificaciones del

cliente plantea la ejecución de ensayos completos de fatiga (hasta un millón de ciclos) donde se comprobará y validará el comportamiento del banco ante ensayos de larga duración. Así mismo, la ejecución de ensayos de fatiga completos permitirá, por un lado, evaluar si los modos de fallo obtenidos en el espécimen son representativos de la realidad. Por otro lado si las adquisiciones programadas permiten la detección temprana de la aparición de grieta en el espécimen de ensayo.

En el proyecto realizado solo se han considerado ensayos a fatiga para las configuraciones establecidas. Estas mismas configuraciones son válidas para esfuerzos estáticos o de resistencia donde se mide la capacidad de la pieza frente a cargas máximas. Estos ensayos “Strength Test” se realizan con las misma disposición de actuadores pero ejerciendo la carga de forma individual.

Una línea abierta para el futuro sería aportar a la configuración de escalabilidad, es decir, que el layout establecido en los planos sirviera para vehículos más pesados e industriales. El aumento de tamaño supondría un nuevo dimensionamiento que consistiría en la modificación de actuadores (a unos con mayor capacidad de carga), nuevo diseño del cubo de rueda y de utillajes de adaptación al mismo.

Un punto débil en el diseño se produce en los actuadores Longitudinal/Braking y Vertical. El actuador Lateral cuenta con el reenvío por lo que no requiere modificación.

Parte del peso de los citados actuadores afecta al propio cubo de rueda ya que el montaje se realiza mediante rótulas (swivels). Como posible aspecto de mejora en el diseño, con el objetivo de dotar de más realismo y evitar efectos parásitos sobre la configuración, sería la modificación en el guiado propio del vástago del actuador con lo que se conseguiría que la componente del peso no interviniese.

Cada actuador se amarraría a dos columnas por la culata delantera con lo que la parte trasera quedaría en voladizo. Se sustituirían las swivels del actuador por una barra birrotulada para acompañar en deformación a la muestra de ensayo u poder absorber los momentos de fuerzas a flexión.



Figura 5.2: Barra birrotulada para la mejora en el diseño de la configuración

6 Bibliografía

Referencias bibliográficas

Miguel Ángel Pérez Belló (2004), *Tecnología de la suspensión, dirección y ruedas: Circuitos hidráulicos y neumáticos*, Cie Inversiones Editoriales Dossat 2000 S.L., pp 207-266.

Reimpell, J., Stoll, H., Betzler, J., W. (2001), *The Automotive Chassis: Engineering Principles*, Butterworth-Heinemann, pp 7-19

Eduardo Torrecilla Insagurbe (2010), *El gran libro de CATIA*, Ediciones técnicas Marcombo S.A.,

Material docente

Apuntes de la asignatura *Automoción*, 4º curso del Grado en Ingeniería Mecánica UPNA

Apuntes de la asignatura *Vibraciones Mecánicas*, 4º curso del Grado en Ingeniería Mecánica UPNA

Apuntes de la asignatura *Cálculo y Diseño de Máquinas*, 3º curso del Grado en Ingeniería Mecánica UPNA

Páginas web consultadas

RAE (2014). Diccionario de la Lengua Española (23.ª Edición). [Fuente en línea] Disponible en: <<http://www.rae.es/recursos/diccionarios/drae>> [Consulta: 13 de Marzo de 2018]

AFICIONADOS A LA MECÁNICA. *Suspensión*. Disponible en: <<http://www.aficionadosalamecanica.net/suspension1.htm>> [Consulta: 14 de Marzo de 2018]

VARBANOV, K. (2012). *F1 Aero Glossary*. Disponible en: <<http://f1framework.blogspot.com.es/2012/08/f1-aero-glossary.html>> [Consulta 14 de Marzo de 2018]

INGEMECÁNICA. *Cálculo de muelles helicoidales*. Disponible en: <<http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn129.html>> [Consulta: 15 de Marzo de 2018]

MECÁNICA AUTOMOTRIZ. *Barra de torsión*. Disponible en: <<http://suspensionautomotriz1993.blogspot.com.es>> [Consulta: 16 de Marzo de 2018]

ULTRA RACING. *How it works. Anti-Roll Bar*. Disponible en: <<http://ultraracing.my/v1>> [Consulta: 16 de Marzo de 2018]

AUTOFLUIDS. *Twin-Tube Shock Absorber and Mono-Tube Shock Absorber*. Disponible en: <<http://autofluids.ru>> [Consulta: 19 de Marzo de 2018]

BENZ WORLD. *Mercedes Benz 190D Rear Multi-link Suspension*

Disponible en: <<http://www.MBZ190D.com>>

[Consulta: 20 de Marzo de 2018]

Catálogo MOOG. *Complete knuckle assemblies.*

Disponible en: <<http://www.moogparts.com/parts/wheel-end/complete-knuckle-assemblies.html>>

[Consulta: 20 de Marzo de 2018]

Catálogo CARID. *Wheel hub.*

Disponible en: <<https://www.carid.com/dorman/wheel-hub.html>>

[Consulta: 20 de Marzo de 2018]

CLEAR MECHANIC. *McPherson Strut Assembly.*

Disponible en: <<https://clearmechanic.com>>

[Consulta: 22 de Marzo de 2018]

CLEAR MECHANIC. *McPherson Strut Assembly.*

Disponible en: <<https://www.actualidadmotor.com/la-suspension-mcpherson/>>

[Consulta: 22 de Marzo de 2018]

BEST SUSPENSION. *Links in multilink suspension.*

Disponible en: <<http://metize.us/5-link-suspension-design/>>

[Consulta: 23 de Marzo de 2018]

AUDI TECHNOLOGY PORTAL. *Wheel suspension.*

Disponible en: <<https://www.audi-technology-portal.de/en/>>

[Consulta: 23 de Marzo de 2018]

Catálogo MONROE. *Solid Axle Rear Suspension.*

Disponible en: <<https://www.monroe.com.au/trade-corner/tech-info/suspension-systems.html>>

[Consulta: 23 de Marzo de 2018]

Catálogo MTS Systems Corporation. *Servo hydraulic Test Systems.*

Disponible en: <<https://www.mts.com/en/index.htm>>

[Consulta: 10 de Abril de 2018]

INSTRUCTURABLES. *Material's properties from its stress/strain curve.*

Disponible en: <<http://www.instructables.com/id/Steps-to-Analyzing-a-Materials-Properties>>

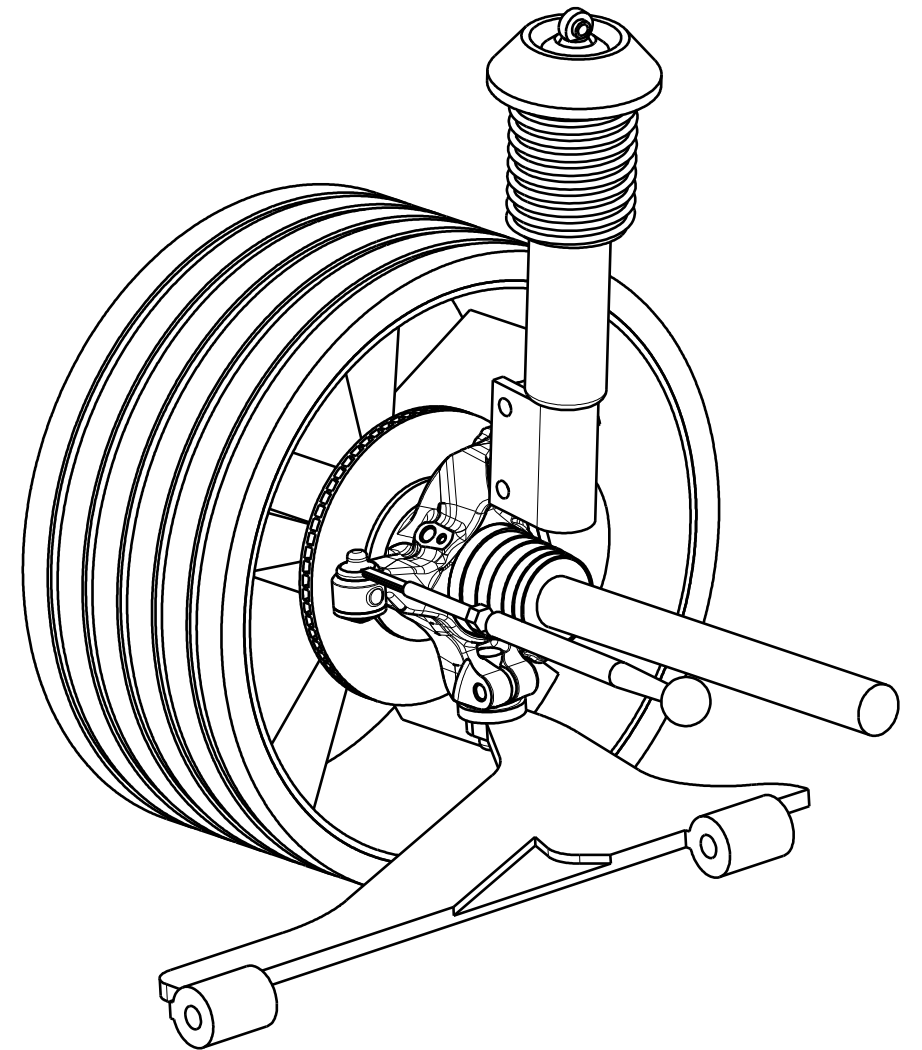
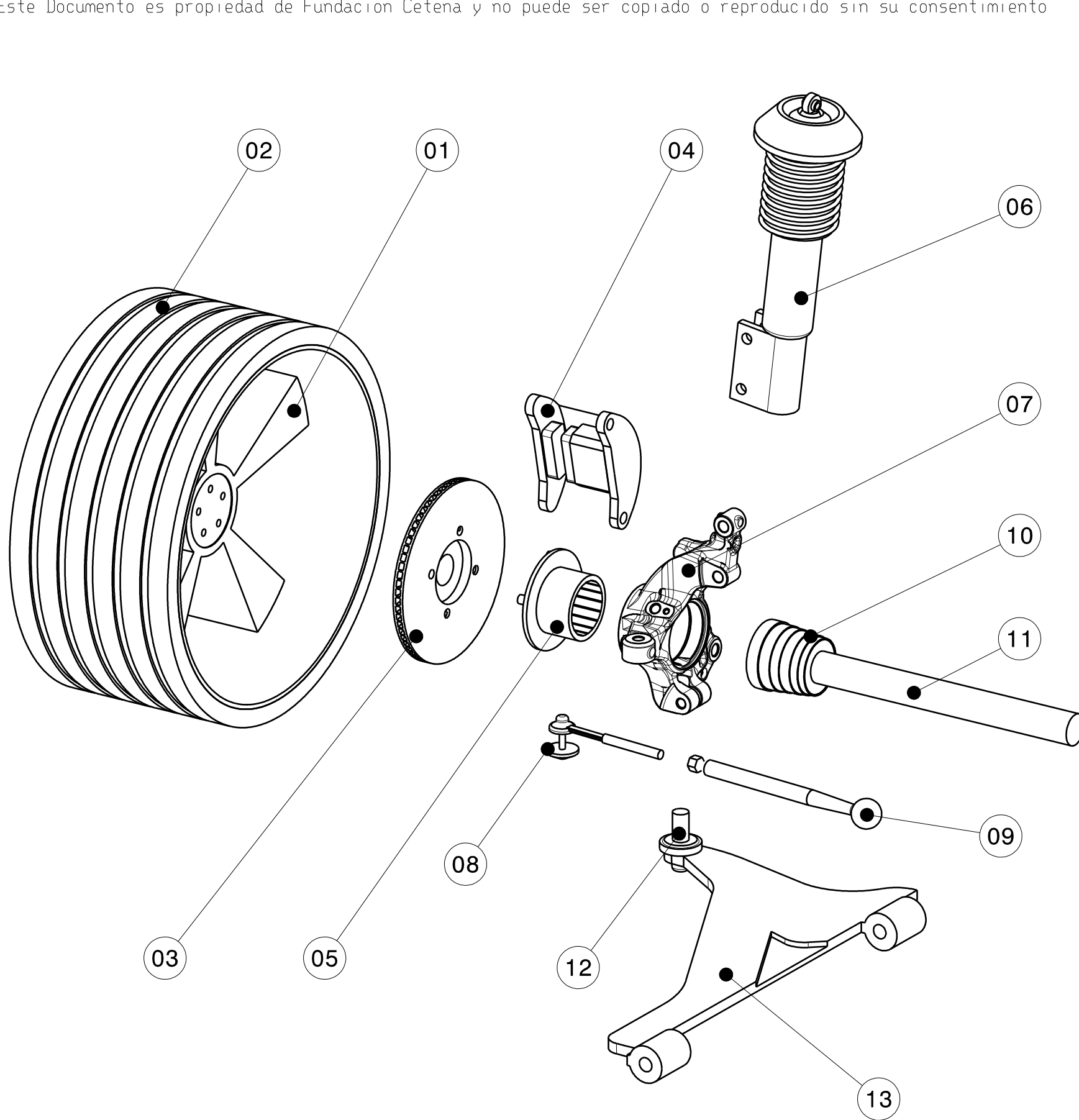
[Consulta: 13 de Abril de 2018]

7 ANEXOS

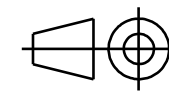
- **PLANOS**

Índice de Planos

1. Suspensión McPherson_Diseño Conceptual
2. Montaje_ Cubo de rueda
3. Placa de amarre
4. Plano de fabricación_ Utillaje de unión
5. Plano de montaje_ Disposición Longitudinal 01
6. Plano de montaje_ Disposición Longitudinal 02
7. Plano de montaje_ Disposición Longitudinal 03
8. Plano de montaje_ Disposición Braking 01
9. Plano de montaje_ Disposición Braking 02
10. Plano de montaje_ Disposición Braking 03



POS	QTY	Part Number	Part Name
1	1	01	Llanta
2	1	02	Neumático
3	1	03	Disco de freno
4	1	04	Pinza de freno
5	1	05	Buje
6	1	06	Columna de suspensión McPherson
7	1	07	Mangueta
8	1	08	Rótula exterior del brazo de dirección
9	1	09	Rótula interior del brazo de dirección
10	1	10	Junta homocinética
11	1	11	Palier de transmisión
12	1	12	Rótula del trapecio inferior
13	1	13	Trapecio inferior



Tolerancias Generales:
ISO 2768 - mK
Estados Superficiales:
ISO 1302 78
Roscas:
ISO 261
Soldaduras:
UNE 14-009-84
Aristas:
ISO 1715
Unidades:
mm.

ESPECIFICACIONES



CEMITEC

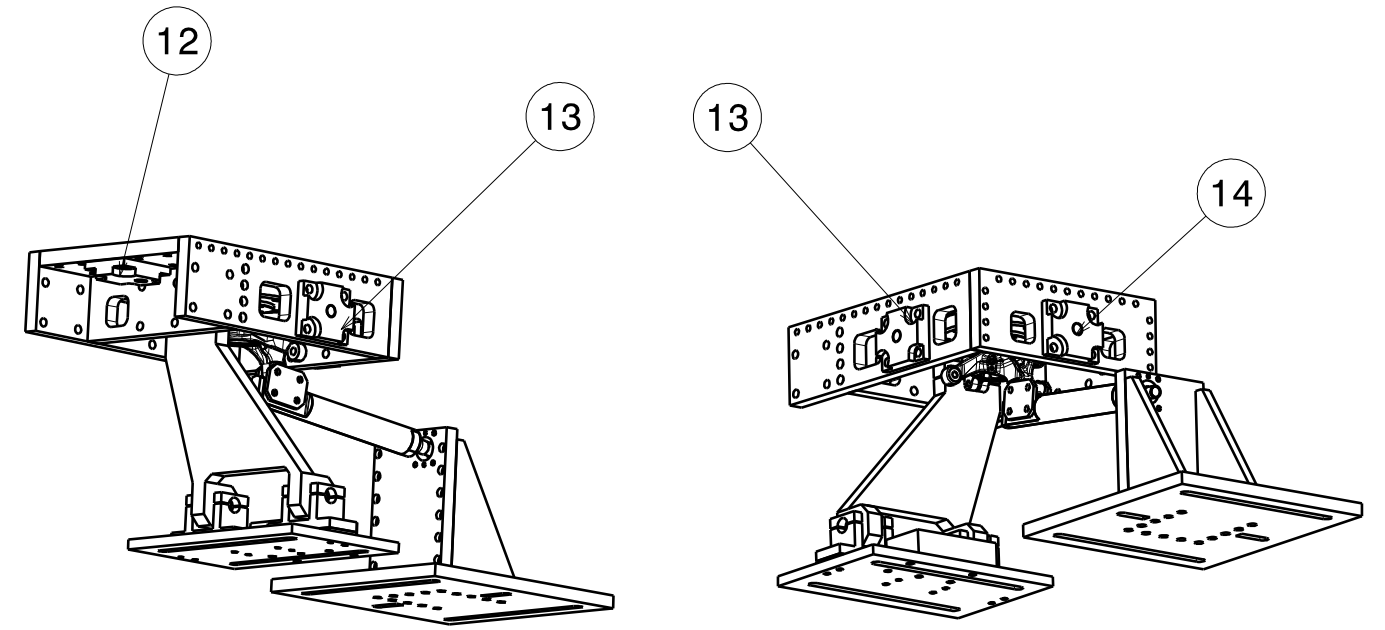
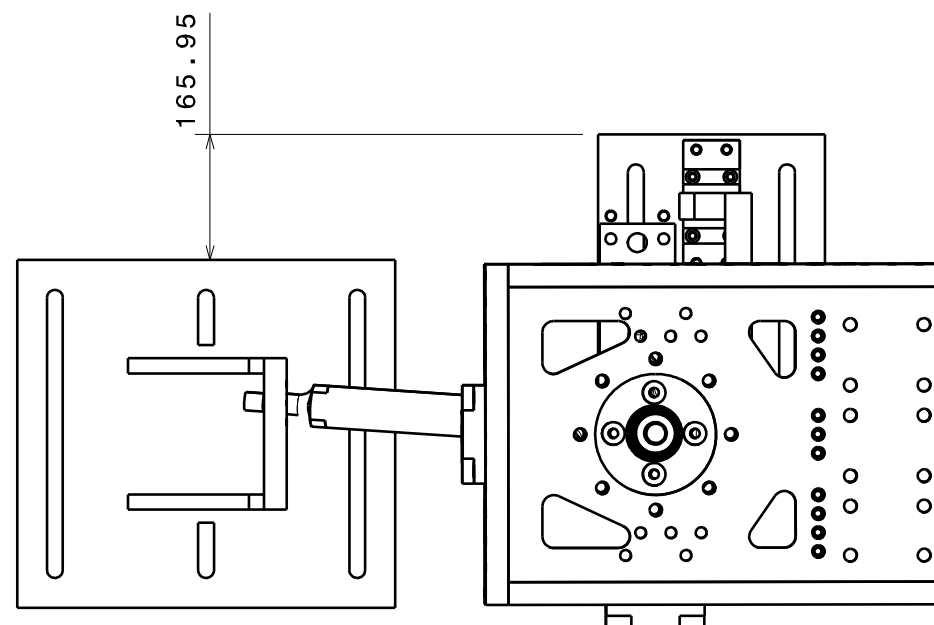
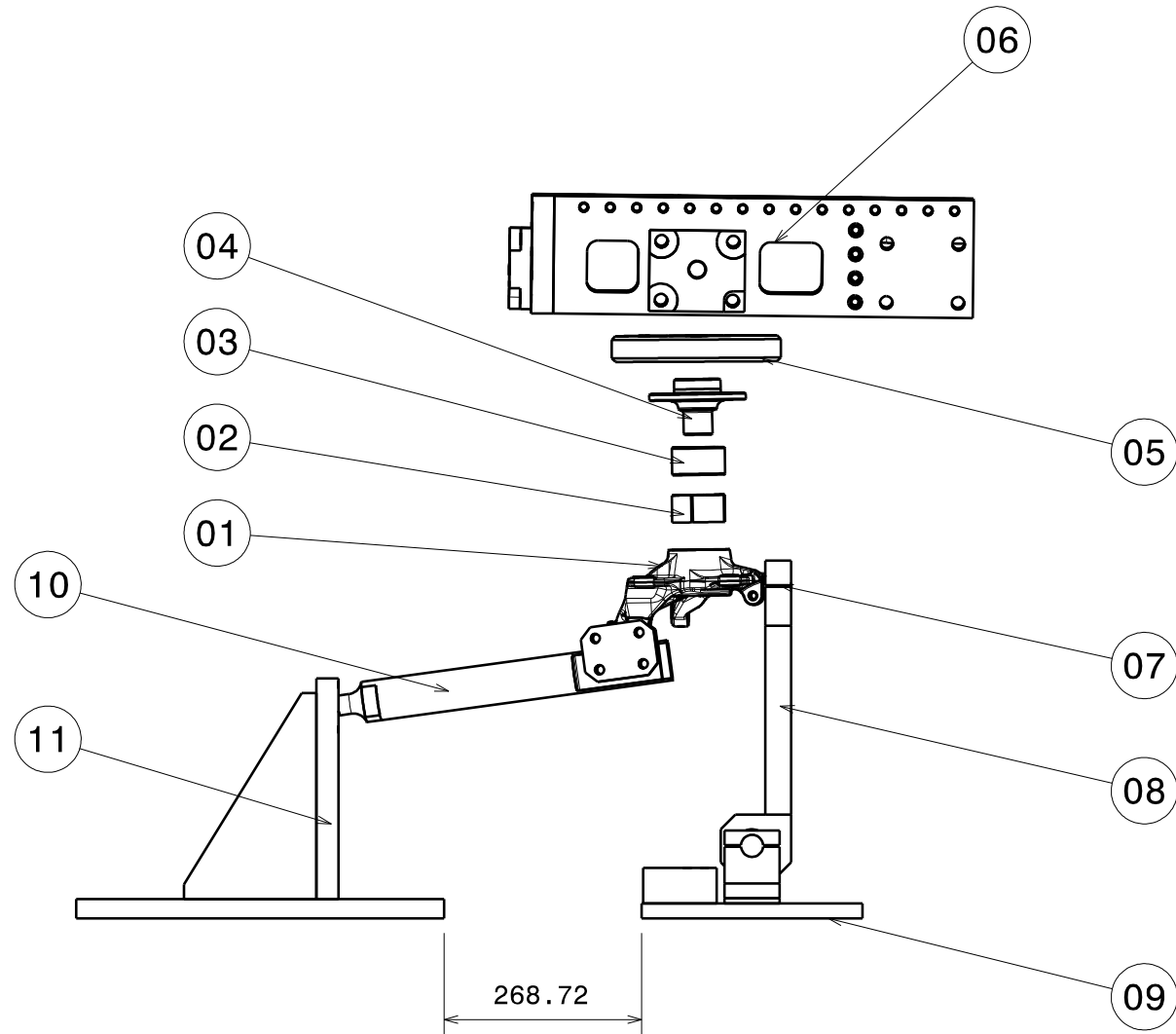
Centro Multidisciplinar de Tecnologías para la Industria

TITULO:

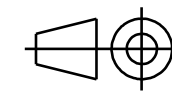
Suspensión McPherson_Diseño Conceptual

Dibujado: VICTOR FORCADA	Fecha: 27/04/2018	Cliente/Proveedor: X	
Aprobado: X	Fecha: XX/XX/XXXX	Escala: 1:5	Código de Proyecto: X
Tamaño: A3	Versión: 0	Código Dibujo: X	Hoja: 1/1

REV	MODIFICACION	FECHA	NOMBRE
-----	--------------	-------	--------



POS	QTY	Part Number	Part Name
1	1	01	Mangueta
2	1	02	Arandela cónica
3	1	03	Rodamiento
4	1	04	Acoplamiento cónico
5	1	05	Aro
6	1	06	Caja
7	1	07	Unión
8	1	08	Soporte
9	1	09	Base soporte
10	1	10	Cilindro
11	1	11	Soporte rígido
12	1	12	Placa de amarre
13	1	13	Placa de amarre 2
14	1	14	Placa de amarre 3



Tolerancias Generales:
ISO 2768 - mK
Estados Superficiales:
ISO 1302 78
Roscas:
ISO 261
Soldaduras:
UNE 14-009-84
Aristas:
ISO 1715
Unidades:
mm.

ESPECIFICACIONES



CEMITEC

Centro Multidisciplinar de Tecnologías para la Industria

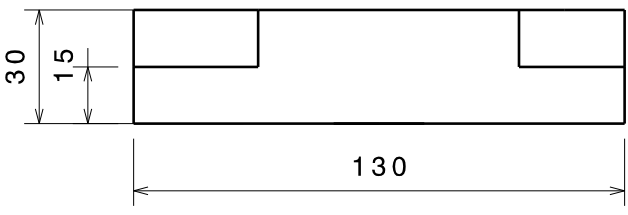
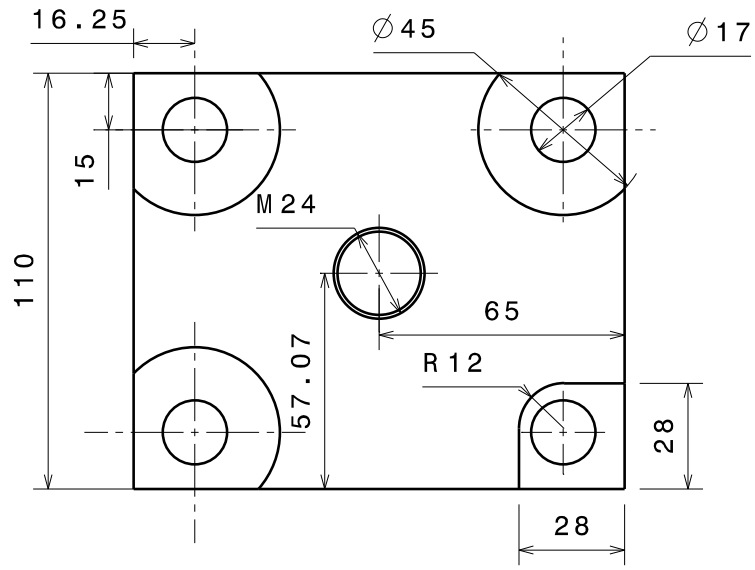
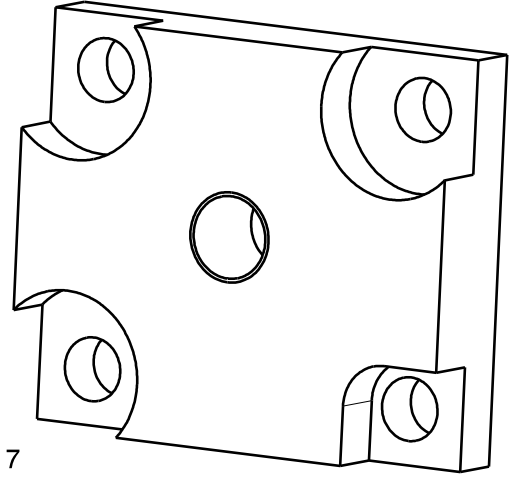
TITULO:

Montaje Cubo de rueda

Dibujado: VICTOR FORCADA	Fecha: 07/05/2018	Cliente/Proveedor: X
Aprobado: X	Fecha: XX/XX/XXXX	Escala: 1:10, 1:15
Tamaño: A3	Versión: 0	Código de Proyecto: X
Código Dibujo: X		Hoja: 1/1

Este Documento es propiedad de Fundación Cetena y no puede ser copiado o reproducido sin su consentimiento

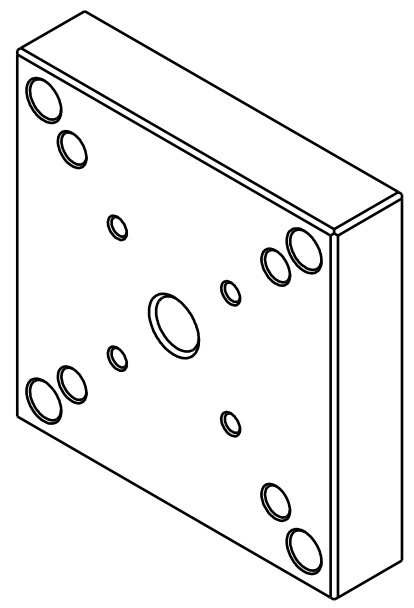
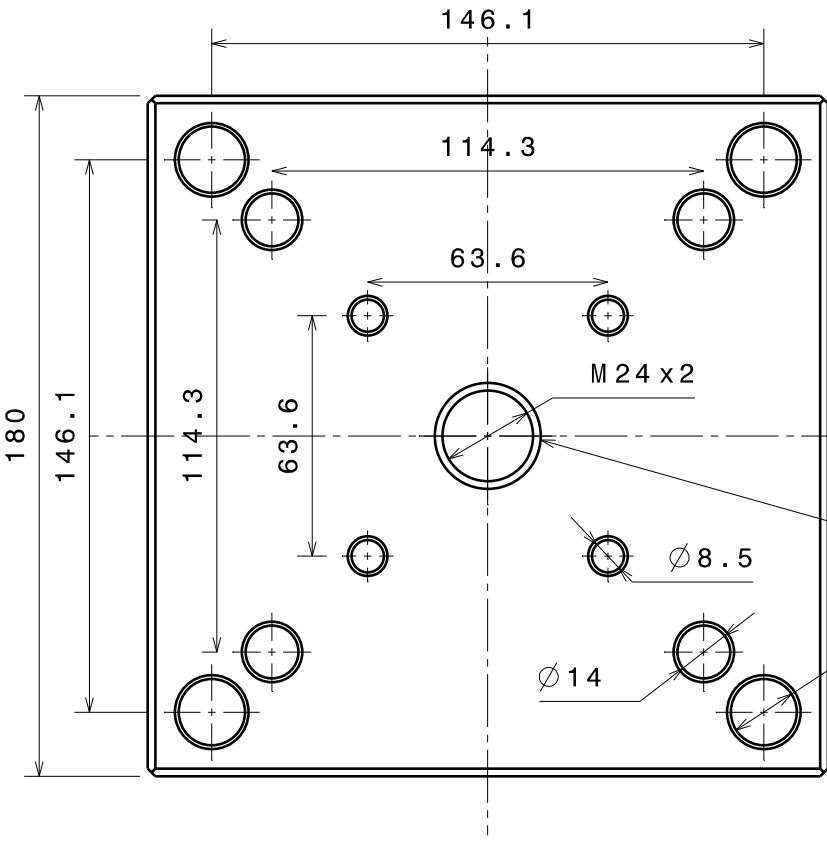
HISTORICO DE MODIFICACIONES			
REV	MODIFICACION	FECHA	NOMBRE



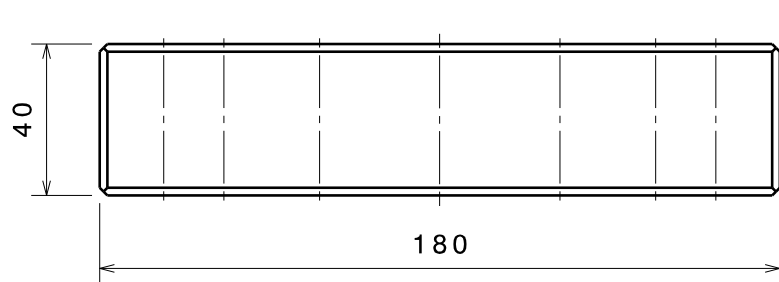
<p>Tolerancias Generales: ISO 2768 - mK Estados Superficiales: ISO 1302 78 Roscas: ISO 261 Soldaduras: UNE 14-009-84 Aristas: ISO 1715 Unidades: mm.</p>	<h2 style="text-align: center;">CEMITEC</h2> <p style="text-align: center;">Centro Multidisciplinar de Tecnologías para la Industria</p>			
	<p>TITULO:</p> <h1 style="text-align: center;">Placa de amarre</h1>			
	<p>Dibujado:</p> <p style="text-align: center;">VICTOR FORCADA</p>	<p>Fecha:</p> <p style="text-align: center;">19/04/2018</p>	<p>Cliente/Proveedor:</p> <p style="text-align: center;">X</p>	
	<p>Aprobado:</p> <p style="text-align: center;">X</p>	<p>Fecha:</p> <p style="text-align: center;">XX/XX/XX</p>	<p>Escala:</p> <p style="text-align: center;">1:2</p>	
	<p>Código de Proyecto:</p> <p style="text-align: center;">Part Number 12 y 13</p>		<p>Hoja:</p> <p style="text-align: center;">1/1</p>	
<p>ESPECIFICACIONES</p>		<p>Tamaño:</p> <p style="text-align: center;">A4</p>	<p>Versión:</p> <p style="text-align: center;">0</p>	<p>Código Dibujo:</p> <p style="text-align: center;">X</p>

Este Documento es propiedad de Fundación Cetena y no puede ser copiado o reproducido sin su consentimiento

HISTORICO DE MODIFICACIONES			
REV	MODIFICACION	FECHA	NOMBRE

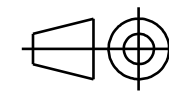
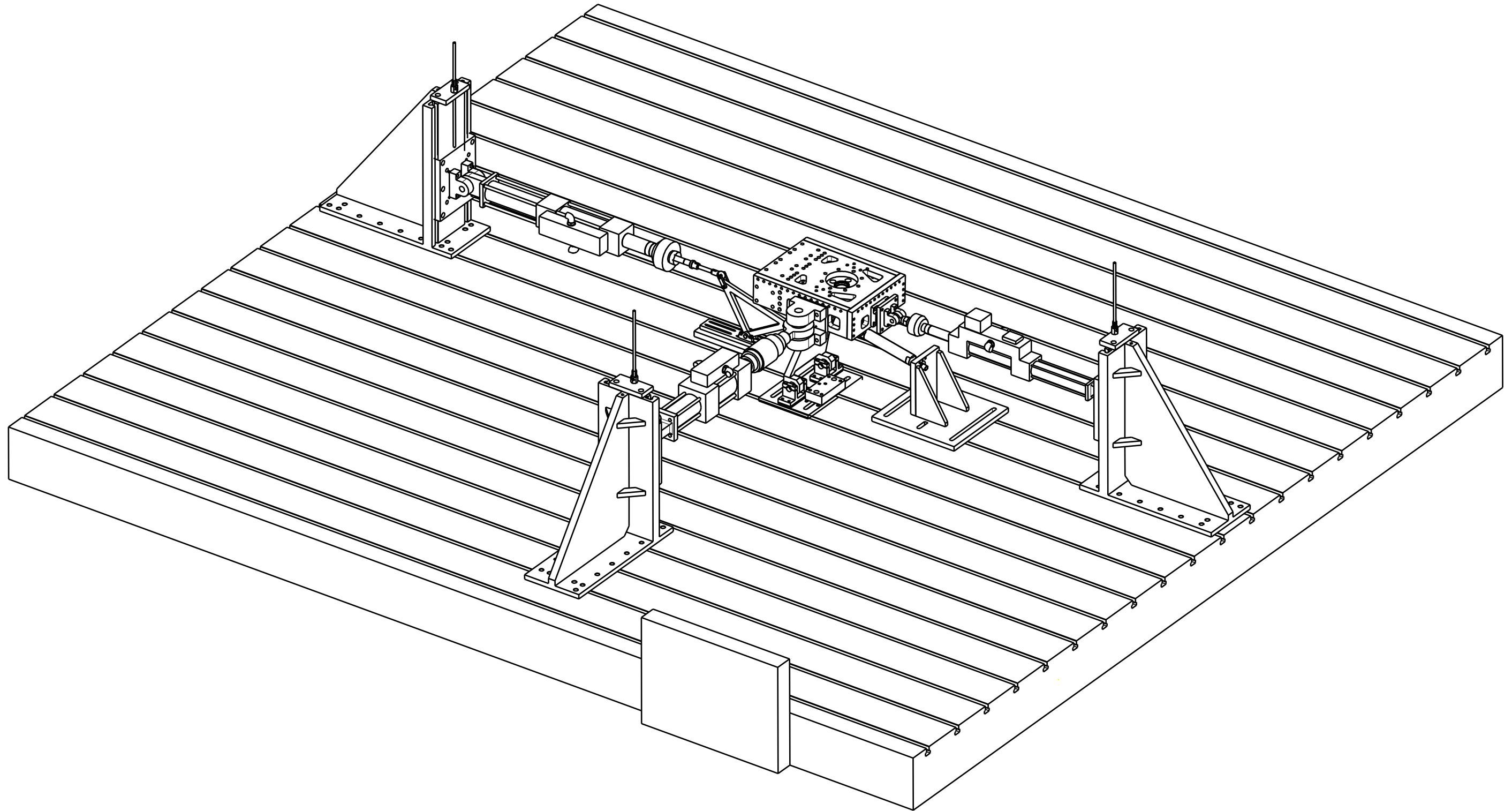


Avellanado en todos los orificios. 2x45°



Eliminación de aristas vivas en contorno exterior

<p>Tolerancias Generales: ISO 2768 - mK Estados Superficiales: ISO 1302 78 Roscas: ISO 261 Soldaduras: UNE 14-009-84 Aristas: ISO 1715 Unidades: mm.</p>	<h2 style="margin: 0;">CEMITEC</h2> <p style="margin: 0;">Centro Multidisciplinar de Tecnologías para la Industria</p>		
	<p>TITULO:</p> <h3 style="margin: 0;">Plano fabricación_Utillaje de unión</h3>		
	<p>Dibujado:</p> <p style="text-align: center;">VICTOR FORCADA</p>	<p>Fecha:</p> <p style="text-align: center;">07/05/2018</p>	<p>Cliente/Proveedor:</p> <p style="text-align: center;">X</p>
	<p>Aprobado:</p> <p style="text-align: center;">X</p>	<p>Fecha:</p> <p style="text-align: center;">XX/XX/XX</p>	<p>Escala:</p> <p style="text-align: center;">1:2</p>
	<p>Tamaño:</p> <p style="text-align: center;">A4</p>	<p>Versión:</p> <p style="text-align: center;">0</p>	<p>Código Dibujo:</p> <p style="text-align: center;">X</p>
<p>ESPECIFICACIONES</p>		<p>Hoja:</p> <p style="text-align: center;">1/1</p>	



Tolerancias Generales:
ISO 2768 - mK
Estados Superficiales:
ISO 1302 78
Roscas:
ISO 261
Soldaduras:
UNE 14-009-84
Aristas:
ISO 1715
Unidades:
mm.

ESPECIFICACIONES



CEMITEC

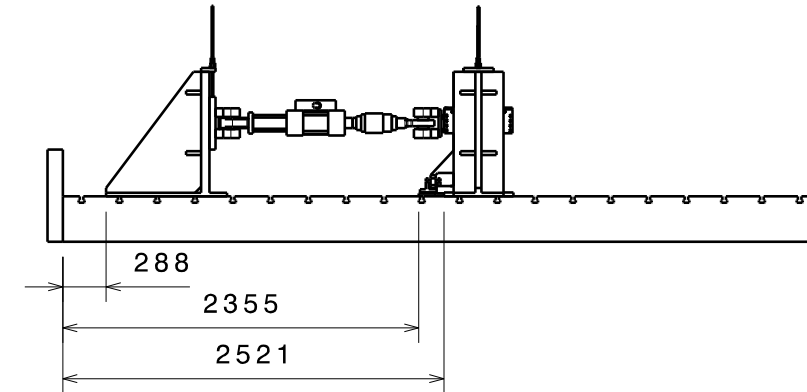
Centro Multidisciplinar de Tecnologías para la Industria

TITULO:

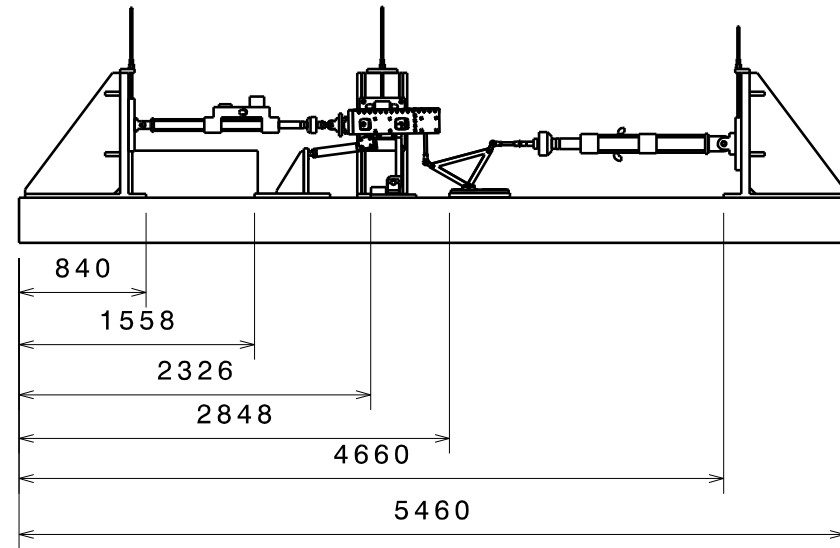
Montaje_Layout Longitudinal_01

Dibujado: VICTOR FORCADA	Fecha: 06/06/2018	Cliente/Proveedor: X	
Aprobado: X	Fecha: XX/XX/XXXX	Escala: 1:20	Código de Proyecto: X
Tamaño A3	Versión: 0	Código Dibujo: X	Hoja: 1/3

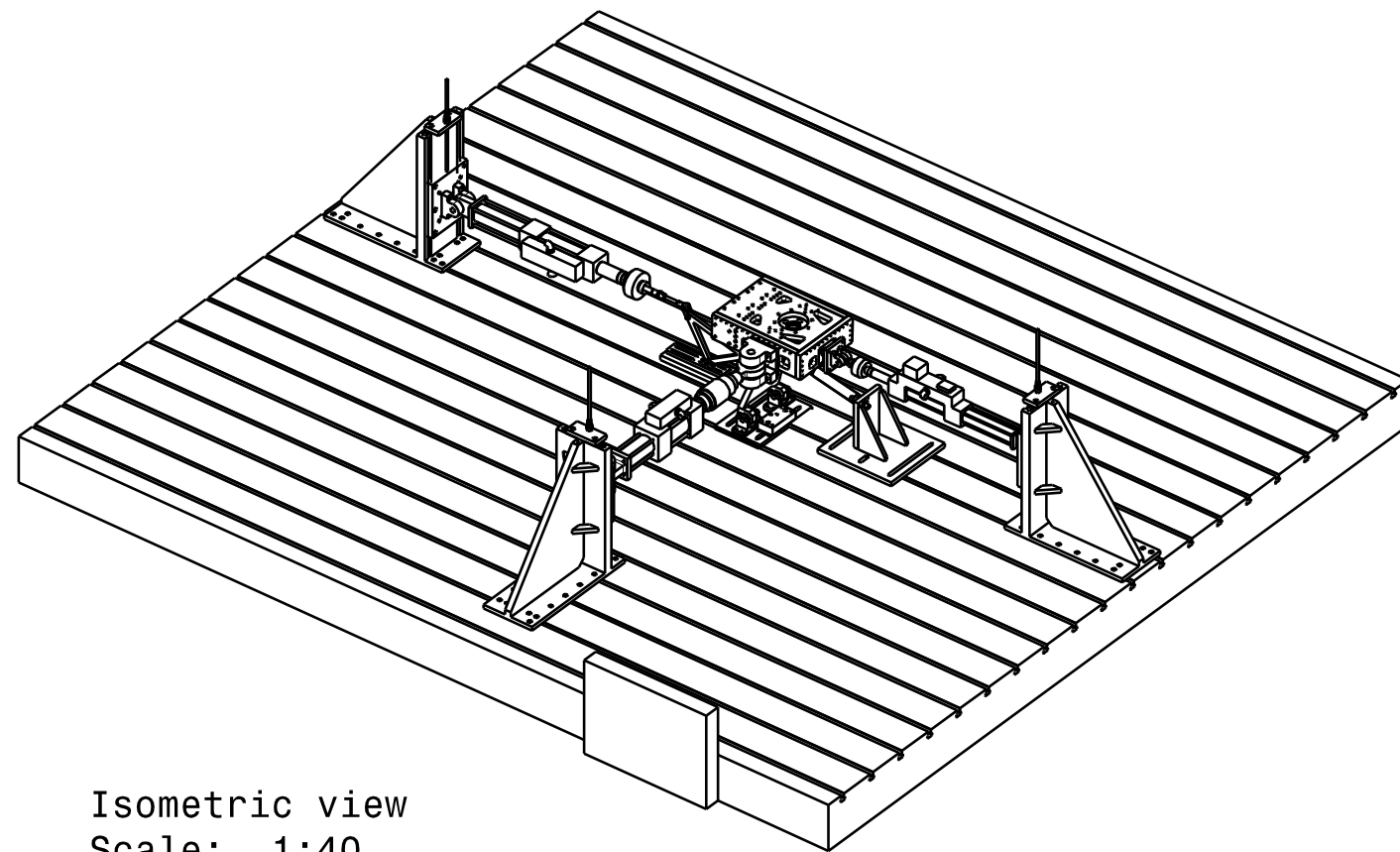
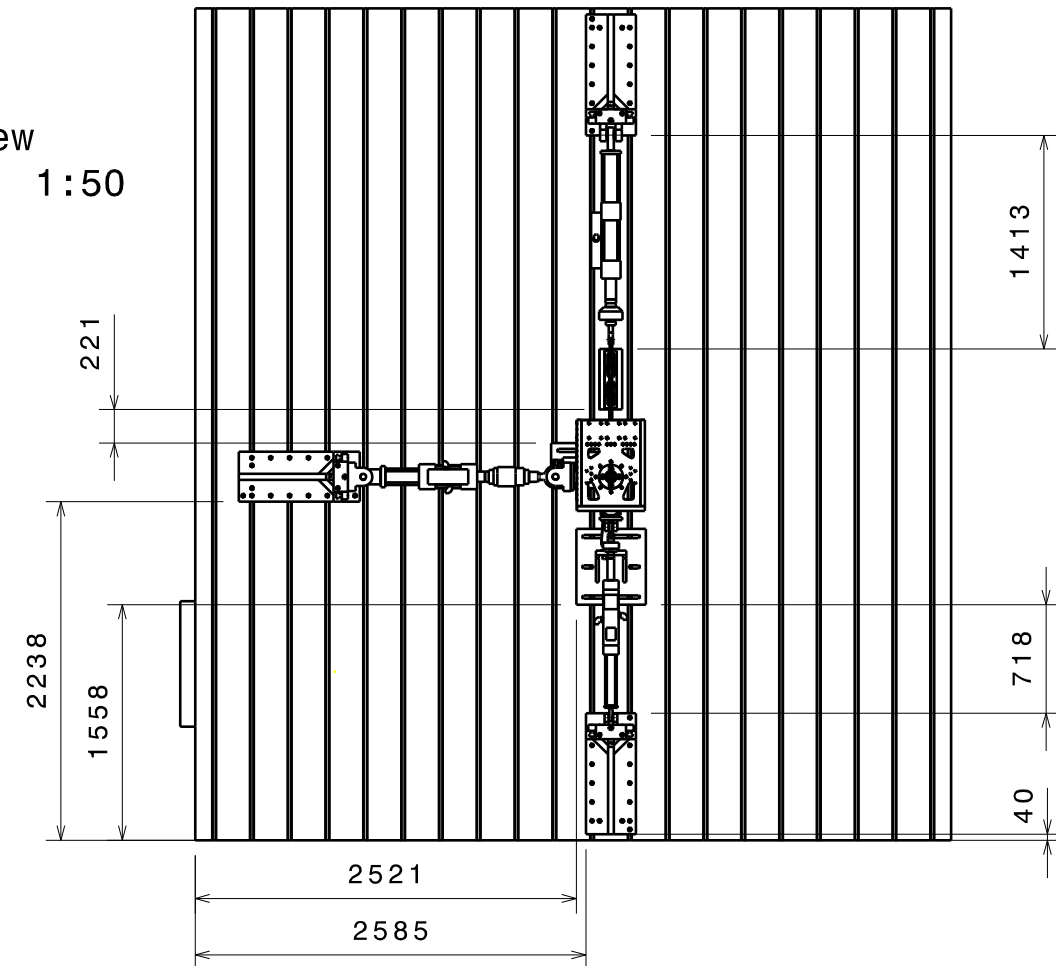
Front view
Scale: 1:50



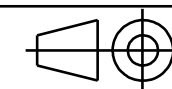
Right view
Scale: 1:50



Top view
Scale: 1:50



Isometric view
Scale: 1:40



Tolerancias Generales:
ISO 2768 - mK
Estados Superficiales:
ISO 1302 78
Roscas:
ISO 261
Soldaduras:
UNE 14-009-84
Aristas:
ISO 1715
Unidades:
mm.

ESPECIFICACIONES



CEMITEC

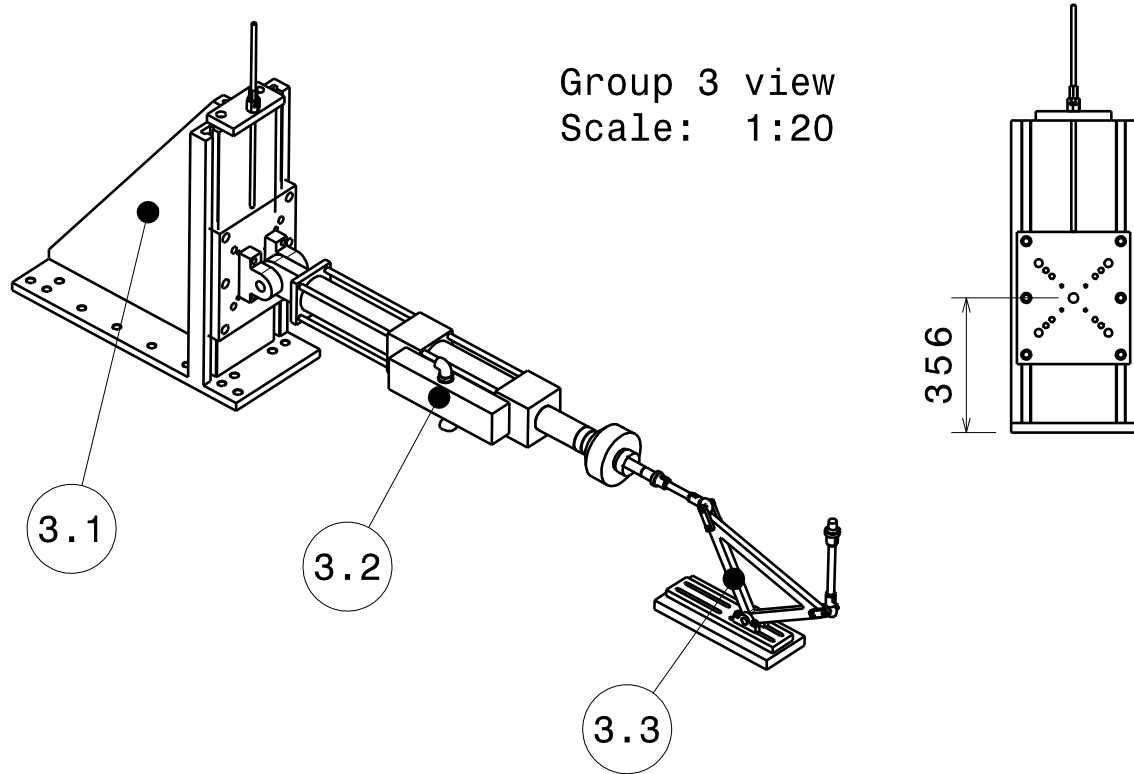
Centro Multidisciplinar de Tecnologías para la Industria

TÍTULO: Montaje_Layout Longitudinal_02

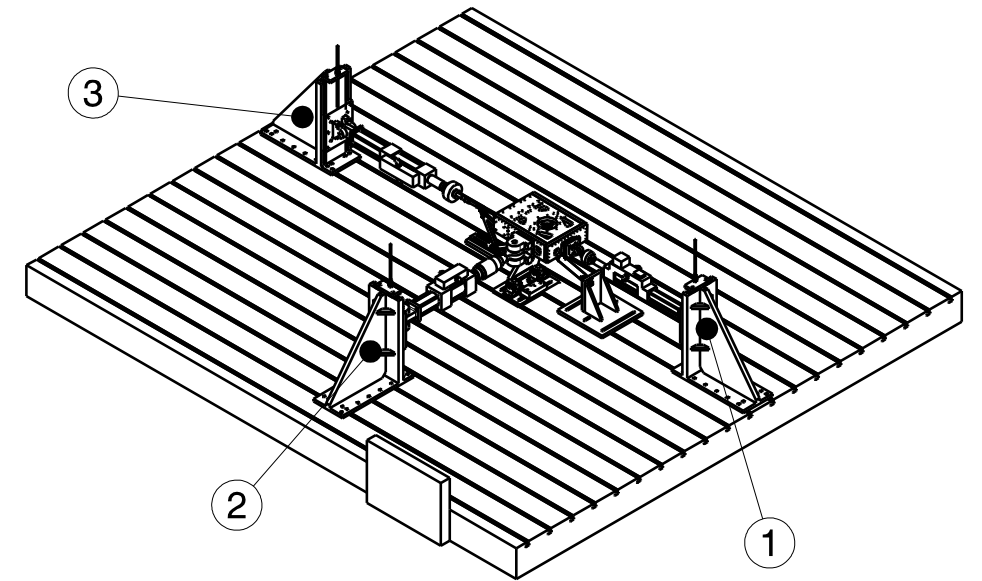
Dibujado: VICTOR FORCADA	Fecha: 06/06/2018	Cliente/Proveedor: X
Aprobado: X	Fecha: XX/XX/XXXX	Escala: 1: 40, 1: 50
Código de Proyecto: X		

Tamaño: A3	Versión: 0	Código Dibujo: X	Hoja: 2/3
---------------	---------------	---------------------	--------------

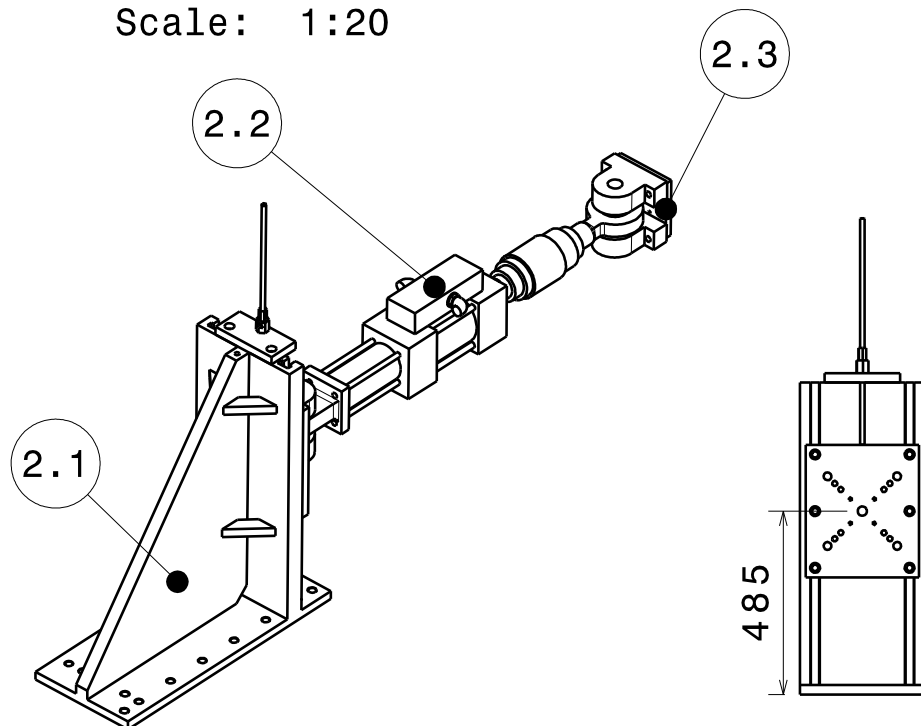
Group 3 view
Scale: 1:20



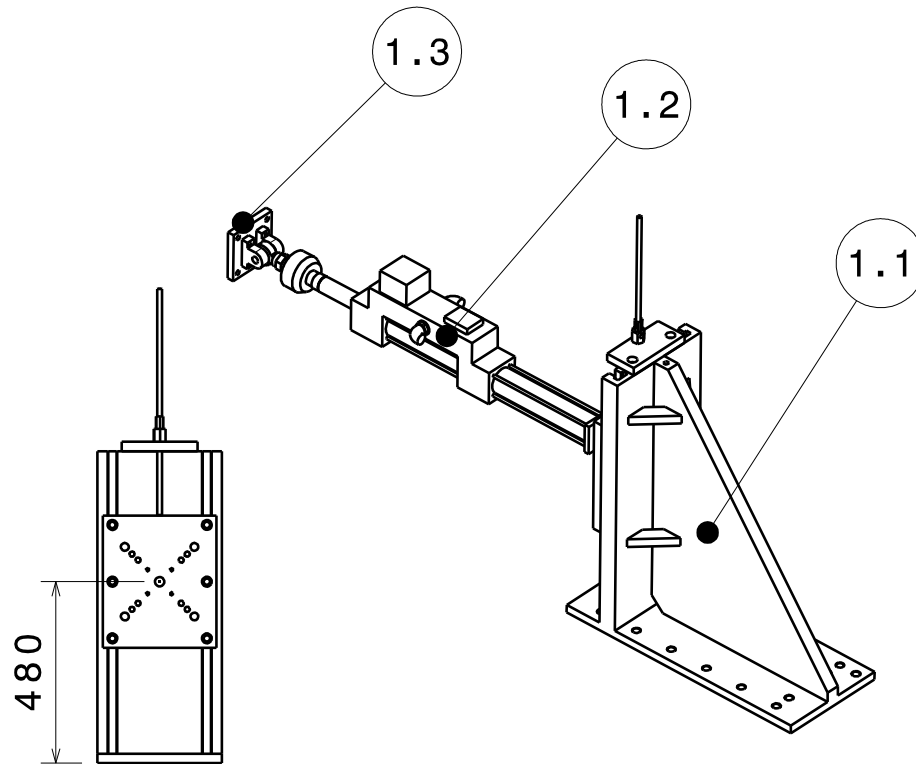
Isometric view
Scale: 1:60



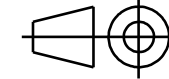
Group 2 view
Scale: 1:20



Group 1 view
Scale: 1:20



POS	QTY	Product Number	Product Name
1	1	Group 1	CEMITEC Test tool
2	1	Group 2	CEMITEC Test tool
3	1	Group 3	CEMITEC Test tool
POS	QTY	Part Number	Part Name
1.1	1	40-163 Escuadra regulable	CEMITEC Test tool
1.2	1	20-01-00-ACTUADOR 15-25kN_sw	CEMITEC Test tool
1.3	1	Ustillaje de unión_15-25kN	CEMITEC Test tool
POS	QTY	Part Number	Part Name
2.1	1	40-163 Escuadra regulable	CEMITEC Test tool
2.2	1	20-03-00-ACTUADOR 160kN_sw	CEMITEC Test tool
2.3	1	Ustillaje de unión_160kN	CEMITEC Test tool
POS	QTY	Part Number	Part Name
3.1	1	40-163 Escuadra regulable	CEMITEC Test tool
3.2	1	20-13-00-ACTUADOR 50kN_sw	CEMITEC Test tool
3.3	1	Reenvío	CEMITEC Test tool



Tolerancias Generales:
ISO 2768 - mK
Estados Superficiales:
ISO 1302 78
Roscas:
ISO 261
Soldaduras:
UNE 14-009-84
Aristas:
ISO 1715
Unidades:
mm.

ESPECIFICACIONES



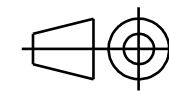
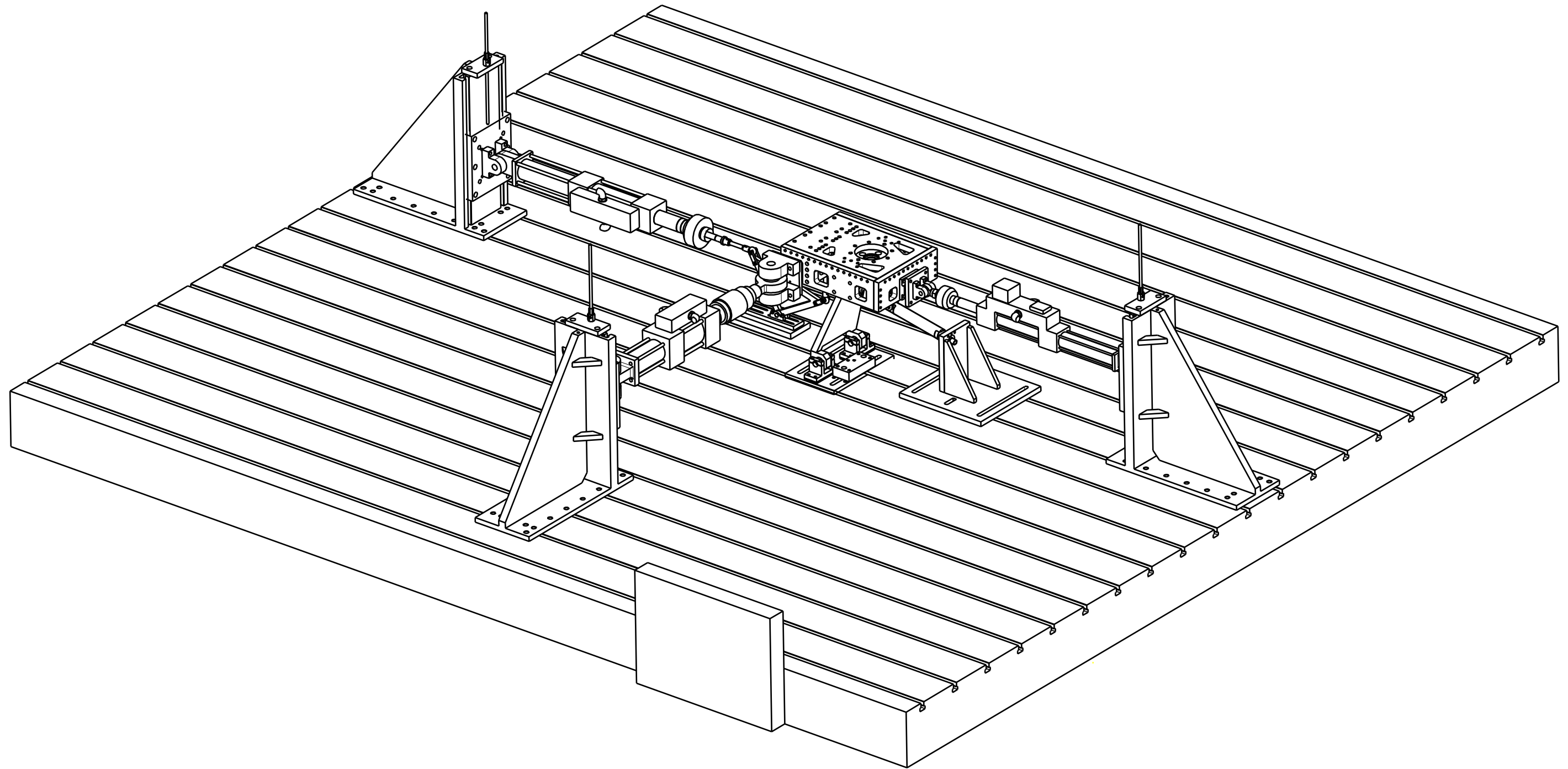
CEMITEC

Centro Multidisciplinar de Tecnologías para la Industria

TITULO:

Montaje_Layout Longitudinal_03

Dibujado:	Fecha:	Cliente/Proveedor:
VICTOR FORCADA	06/06/2018	X
Aprobado:	Fecha:	Escala:
X	XX/XX/XXXX	1:20, 1:60
Tamaño:	Versión:	Código Dibujo:
A3	0	X
		Hoja:
		3/3



Tolerancias Generales:
ISO 2768 - mK
Estados Superficiales:
ISO 1302 78
Roscas:
ISO 261
Soldaduras:
UNE 14-009-84
Aristas:
ISO 1715
Unidades:
mm.

ESPECIFICACIONES



CEMITEC

Centro Multidisciplinar de Tecnologías para la Industria

TITULO:

Montaje_Layout Braking_01

Dibujado:

VICTOR FORCADA

Fecha:

06/06/2018

Cliente/Proveedor:

X

Aprobado:

X

Fecha:

XX/XX/XXXX

Escala:

1: 20

Código de Proyecto:

X

Tamaño

A3

Versión:

0

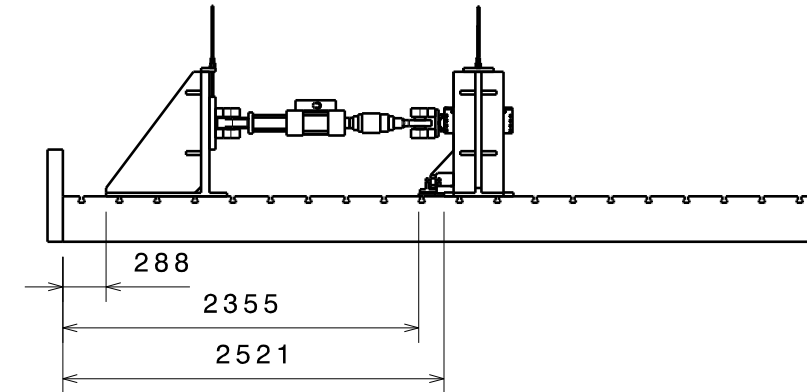
Código Dibujo:

X

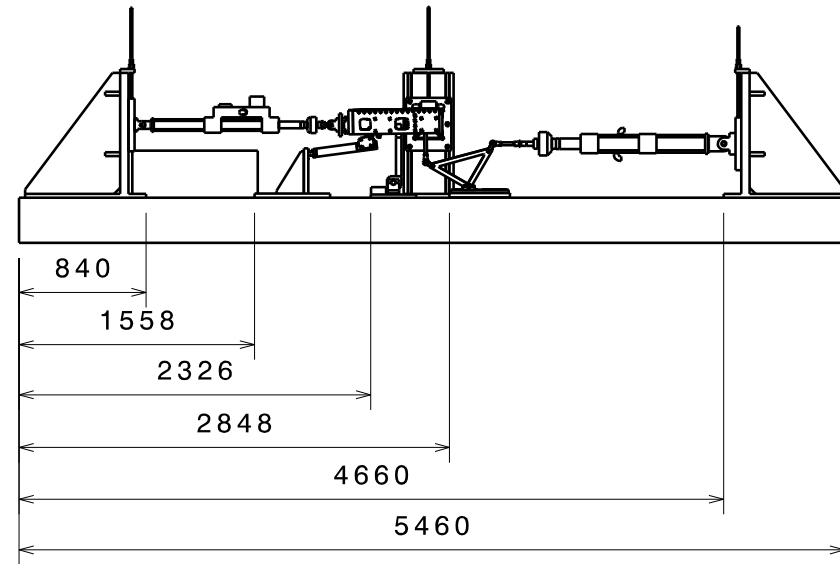
Hoja:

1/3

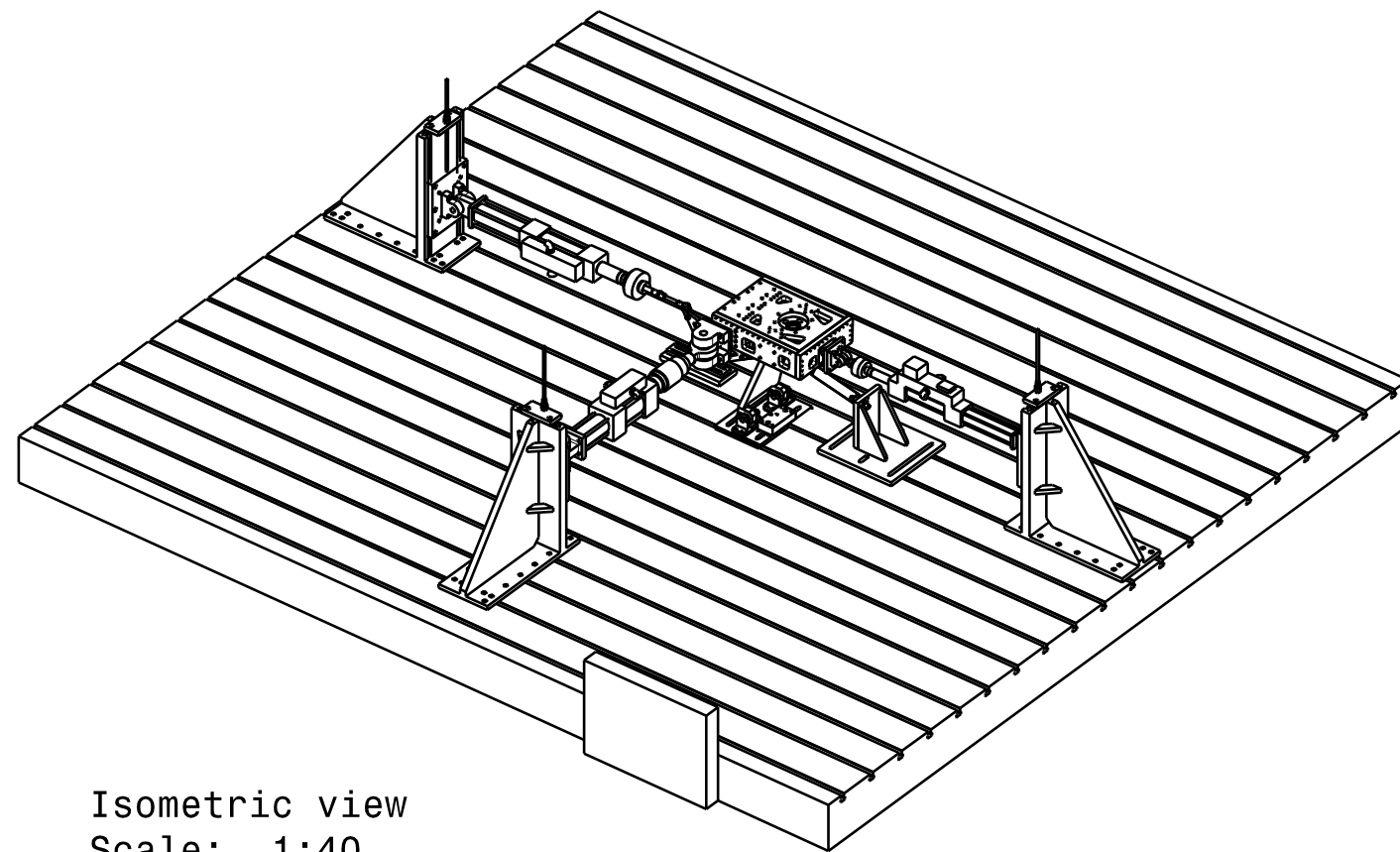
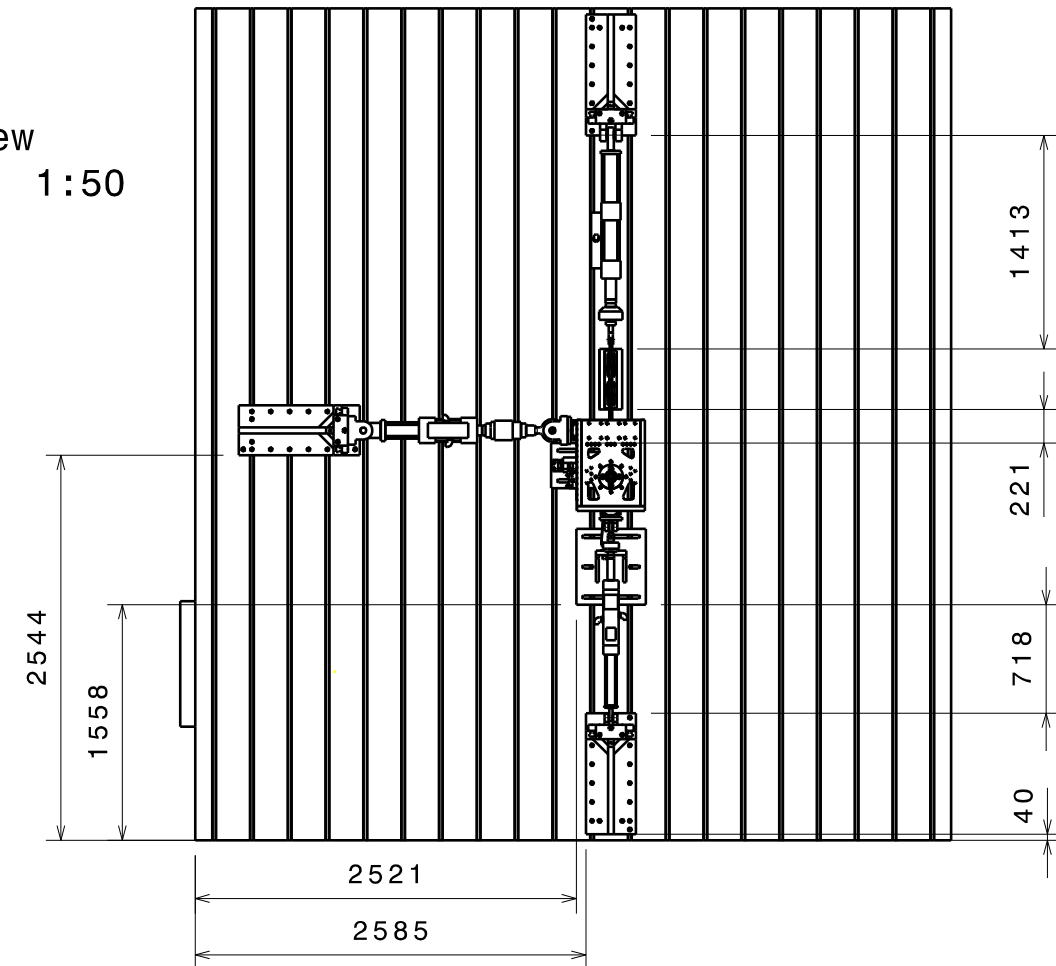
Front view
Scale: 1:50



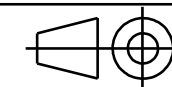
Right view
Scale: 1:50



Top view
Scale: 1:50



Isometric view
Scale: 1:40



Tolerancias Generales:
ISO 2768 - mK
Estados Superficiales:
ISO 1302 78
Roscas:
ISO 261
Soldaduras:
UNE 14-009-84
Aristas:
ISO 1715
Unidades:
mm.

ESPECIFICACIONES



CEMITEC

Centro Multidisciplinar de Tecnologías para la Industria

TITULO:

Montaje_Layout Braking_02

Dibujado:

VICTOR FORCADA

Fecha:

06/06/2018

Cliente/Proveedor:

X

Aprobado:

X

Fecha:

XX/XX/XXXX

Escala:

1: 40, 1: 50

Código de Proyecto:

X

Tamaño

A3

Versión:

0

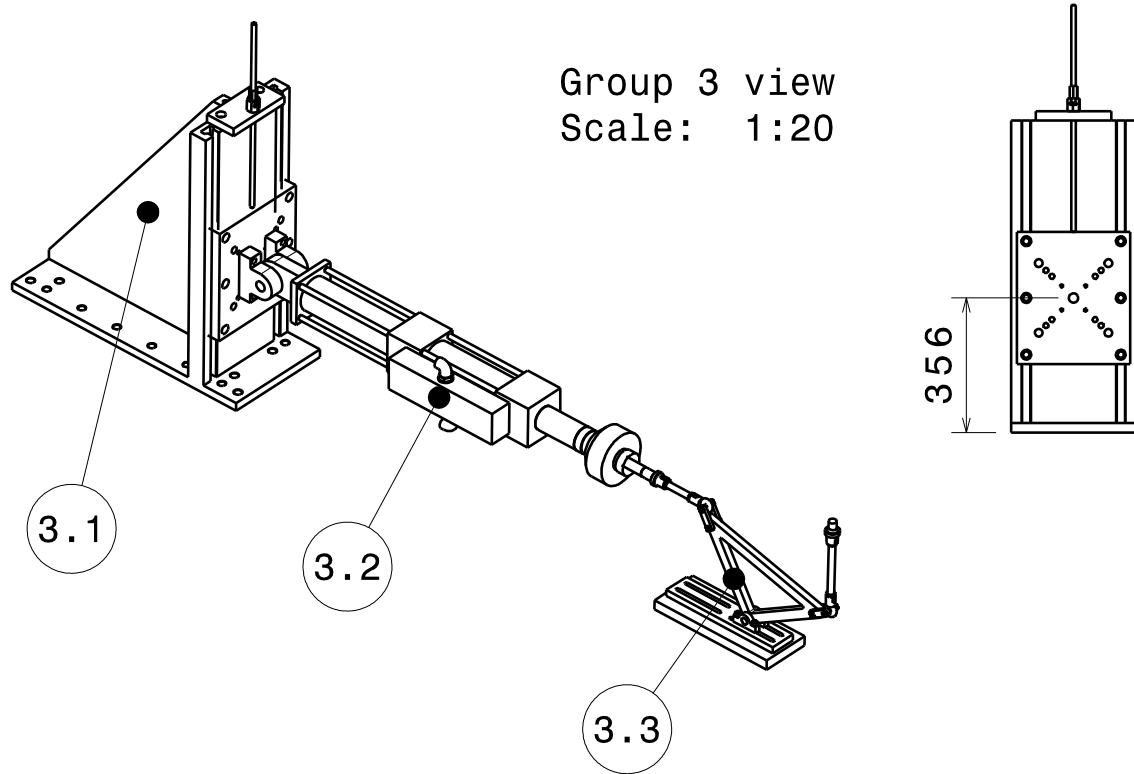
Código Dibujo:

X

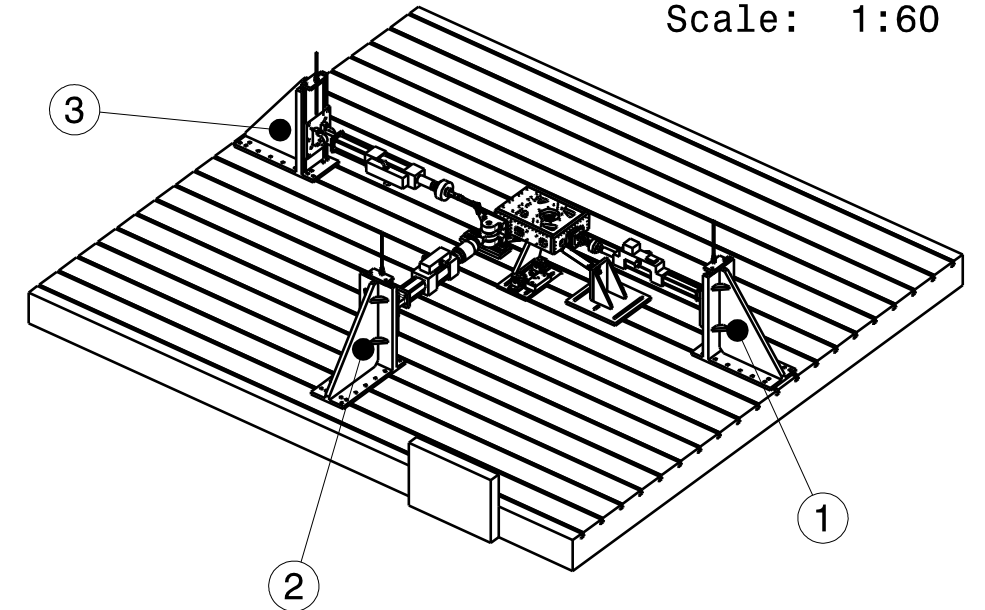
Hoja:

2/3

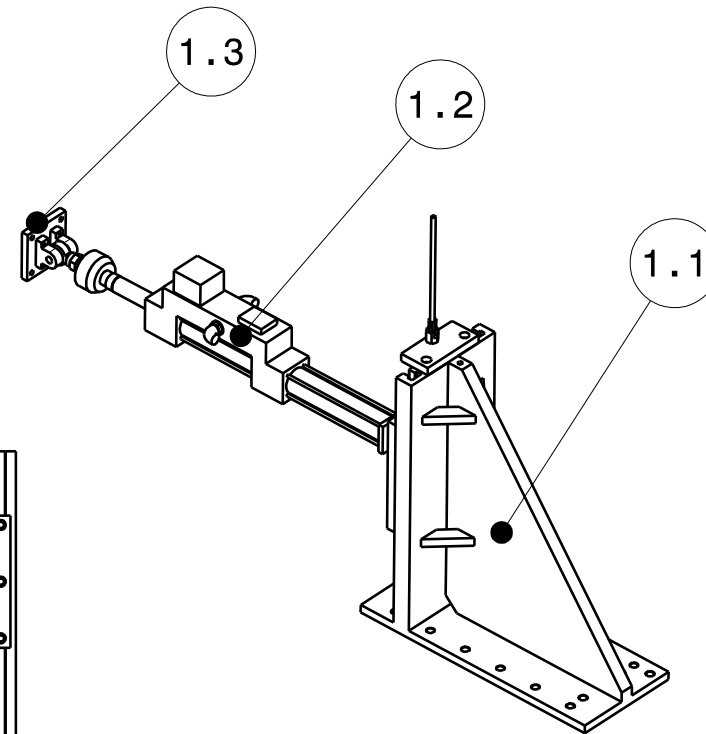
Group 3 view
Scale: 1:20



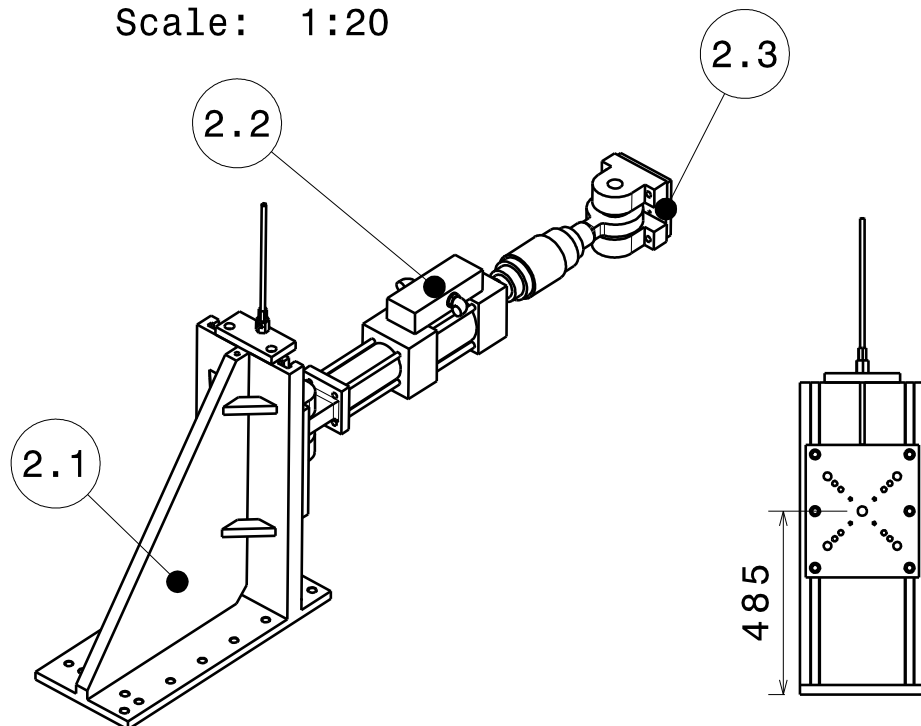
Isometric view
Scale: 1:60



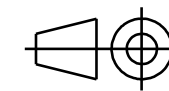
Group 1 view
Scale: 1:20



Group 2 view
Scale: 1:20



POS	QTY	Product Number	Product Name
1	1	Group 1	CEMITEC Test tool
2	1	Group 2	CEMITEC Test tool
3	1	Group 3	CEMITEC Test tool
POS	QTY	Part Number	Part Name
1.1	1	40-163 Escuadra regulable	CEMITEC Test tool
1.2	1	20-01-00-ACTUADOR 15-25kN_sw	CEMITEC Test tool
1.3	1	Ustillaje de unión_15-25kN	CEMITEC Test tool
POS	QTY	Part Number	Part Name
2.1	1	40-163 Escuadra regulable	CEMITEC Test tool
2.2	1	20-03-00-ACTUADOR 160kN_sw	CEMITEC Test tool
2.3	1	Ustillaje de unión_160kN	CEMITEC Test tool
POS	QTY	Part Number	Part Name
3.1	1	40-163 Escuadra regulable	CEMITEC Test tool
3.2	1	20-13-00-ACTUADOR 50kN_sw	CEMITEC Test tool
3.3	1	Reenvío	CEMITEC Test tool



Tolerancias Generales:
ISO 2768 - mK
Estados Superficiales:
ISO 1302 78
Roscas:
ISO 261
Soldaduras:
UNE 14-009-84
Aristas:
ISO 1715
Unidades:
mm.

ESPECIFICACIONES



CEMITEC

Centro Multidisciplinar de Tecnologías para la Industria

TITULO:

Montaje_Layout Braking_03

Dibujado:	Fecha:	Cliente/Proveedor:
VICTOR FORCADA	06/06/2018	X
Aprobado:	Fecha:	Escala:
X	XX/XX/XXXX	1:20, 1:60
Tamaño:	Versión:	Código Dibujo:
A3	0	X
		Hoja:
		3/3

• GRÁFICAS

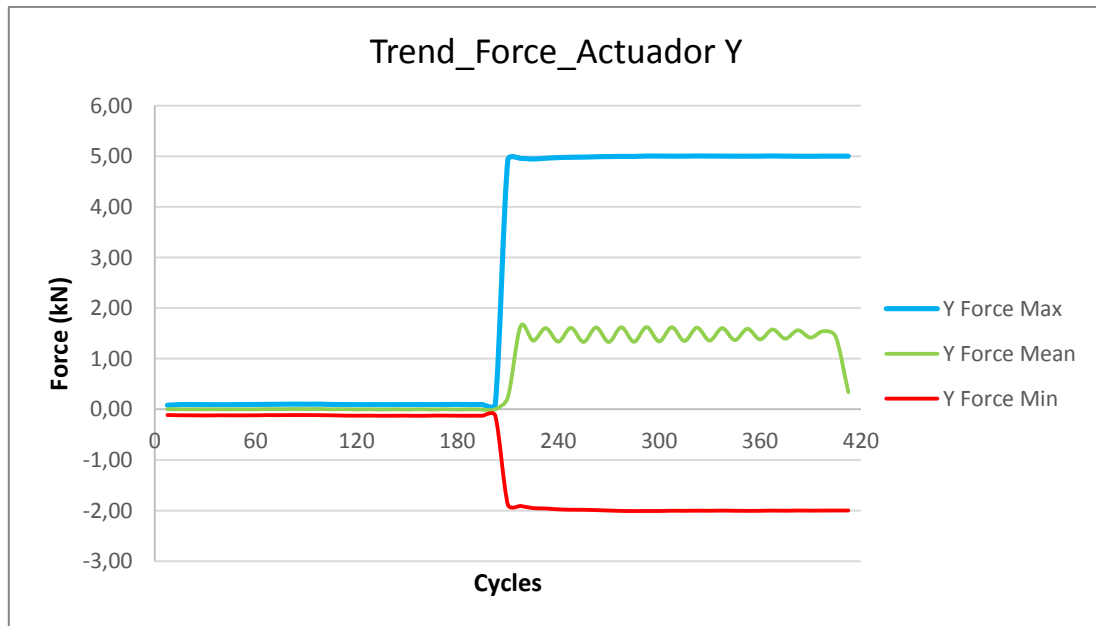


Figura 7.1: Gráfica de tendencia de la fuerza en el actuador Y. Fuerza (kN) frente a ciclos.

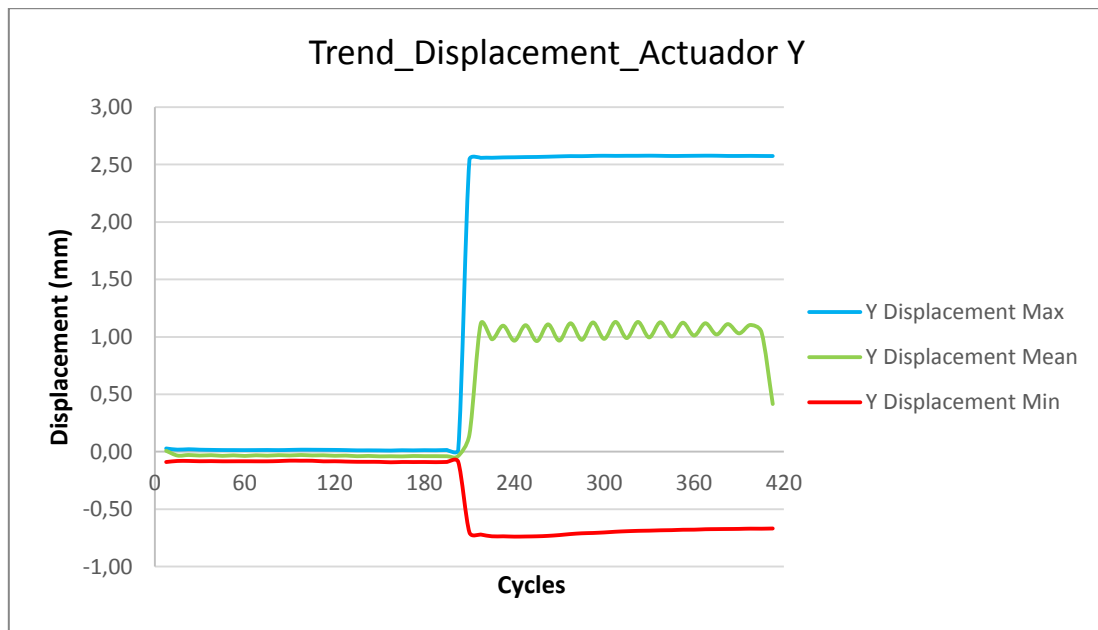


Figura 7.2: Gráfica de tendencia del desplazamiento en el actuador Y. Desplazamiento (mm) frente a ciclos.

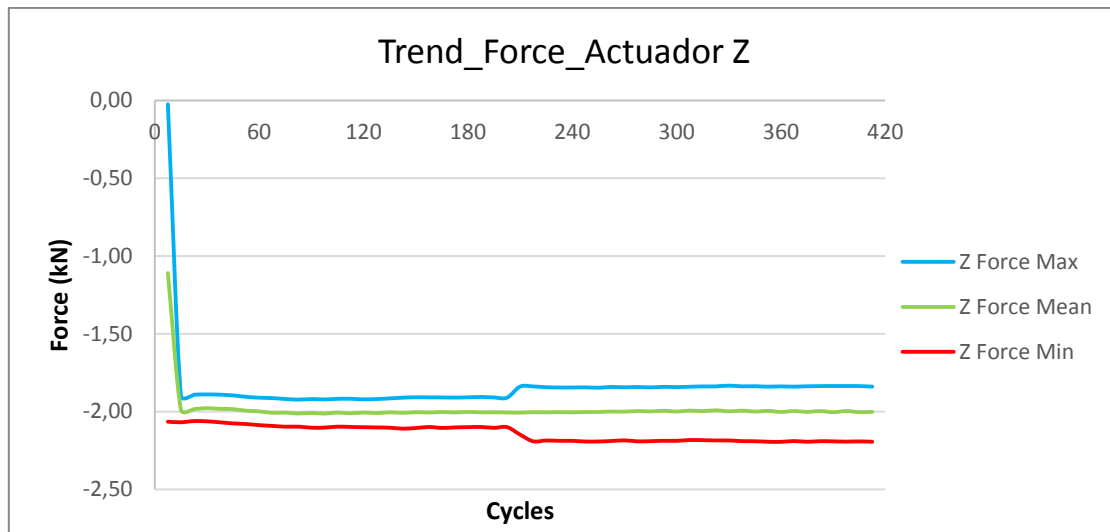


Figura 7.3: Gráfica de tendencia de la fuerza en el actuador Z. Fuerza (kN) frente a ciclos.

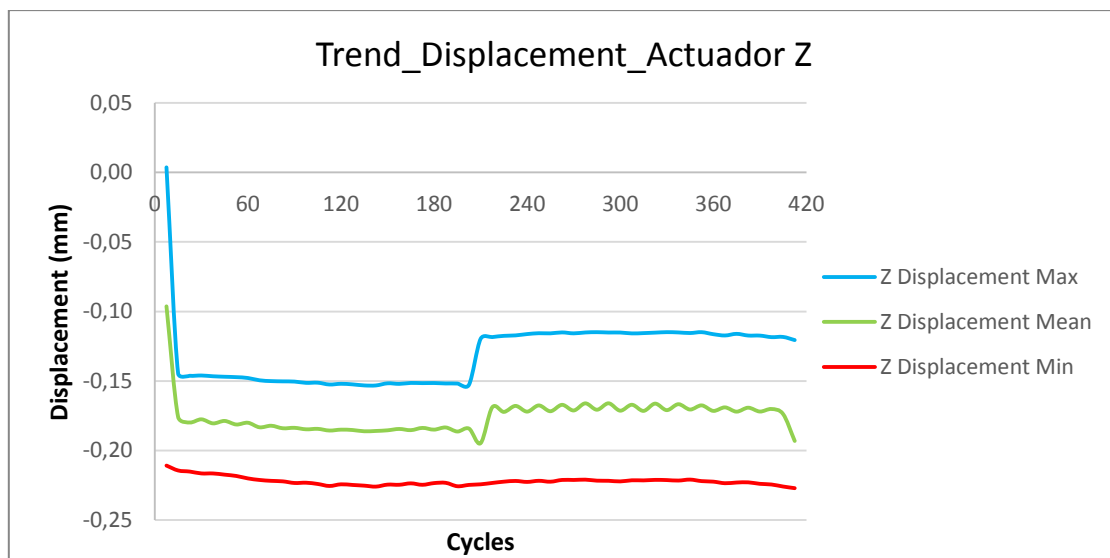


Figura 7.4: Gráfica de tendencia del desplazamiento en el actuador Z. Desplazamiento (mm) frente a ciclos.

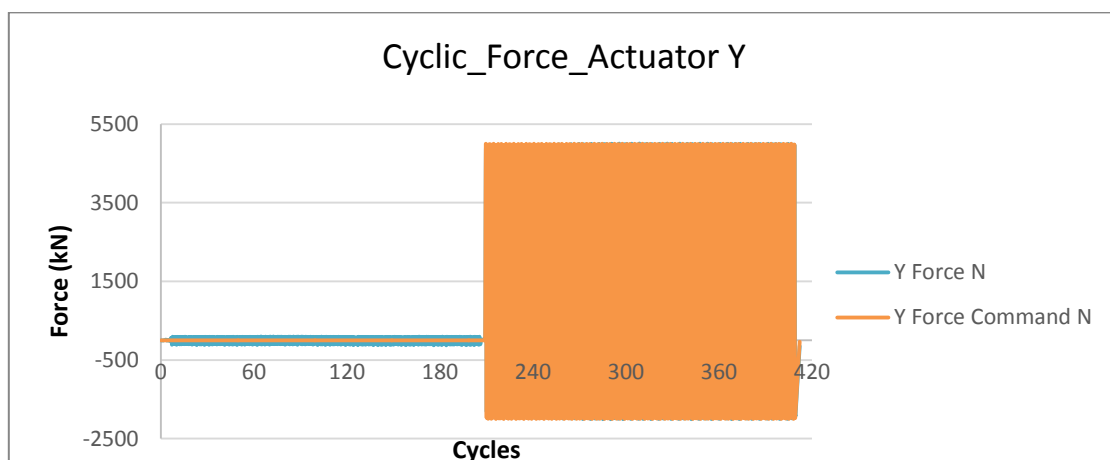


Figura 7.5: Gráfica cíclica de la fuerza del actuador Y durante todo el ensayo. Fuerza (kN) frente a ciclos.

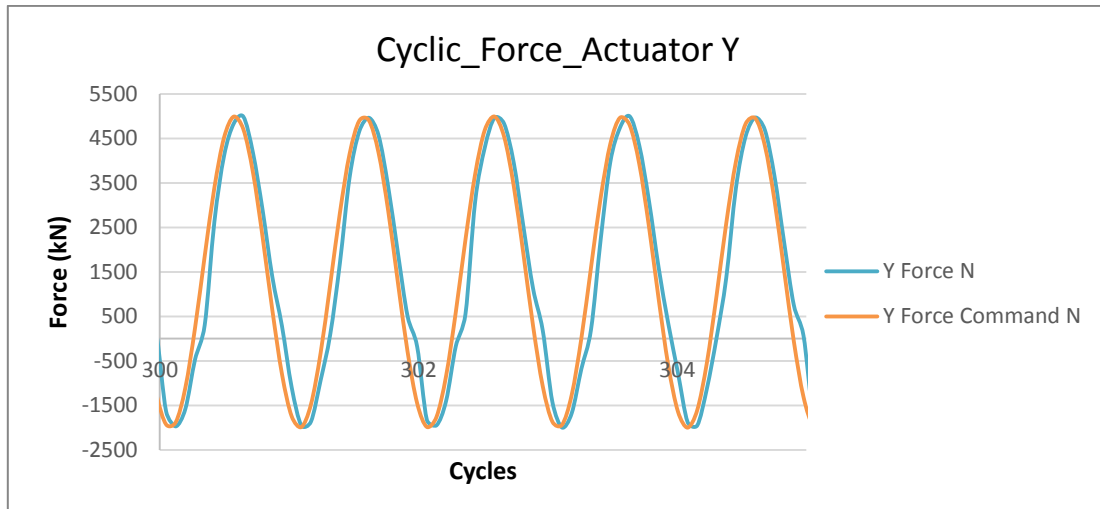


Figura 7.6: Gráfica cíclica de la fuerza del actuador Y durante 5 ciclos. Fuerza (kN) frente a ciclos.

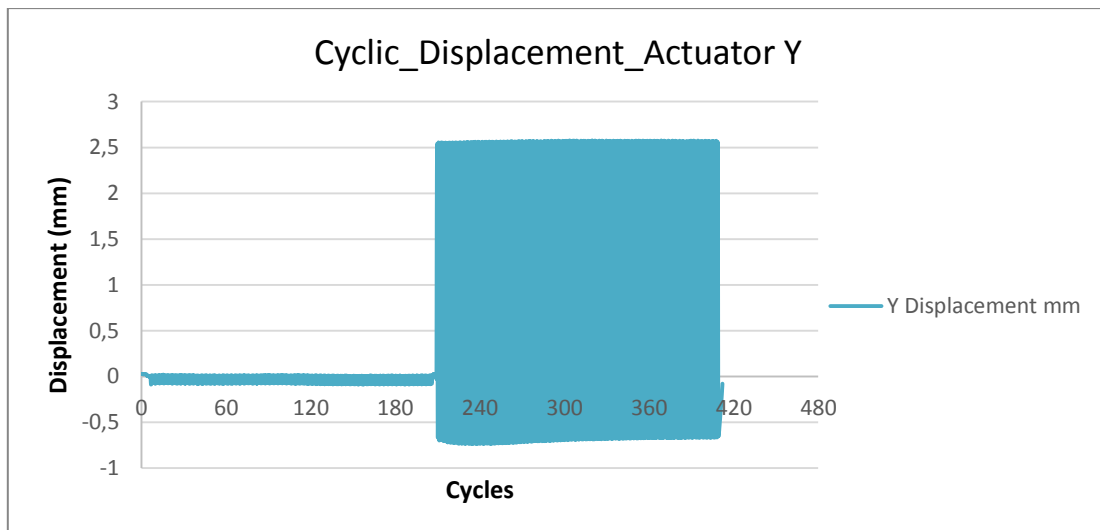


Figura 7.7: Gráfica cíclica del desplazamiento actuador Y en el ensayo. Desplazamiento (mm) frente a ciclos.

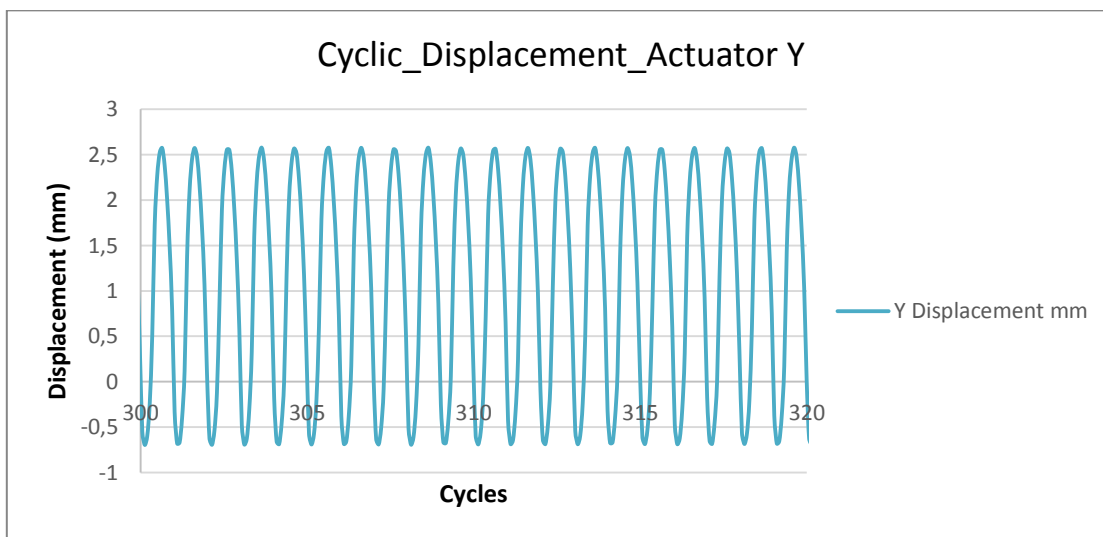


Figura 7.8: Gráfica cíclica del desplazamiento actuador Y en 20 ciclos. Desplazamiento (mm) frente a ciclos

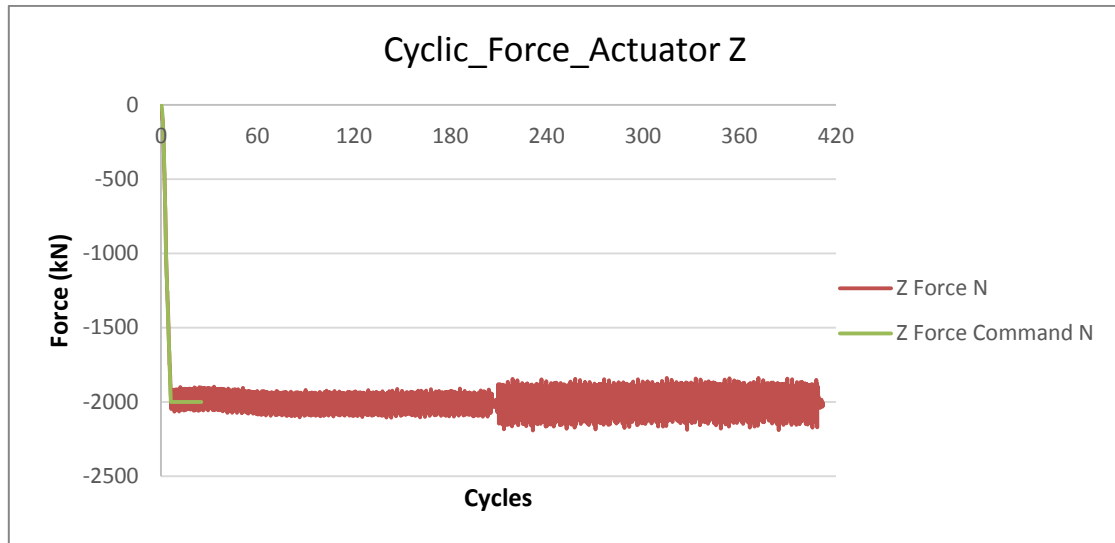


Figura 7.9: Gráfica cíclica de la fuerza del actuador Z durante el ensayo. Fuerza (kN) frente a ciclos.

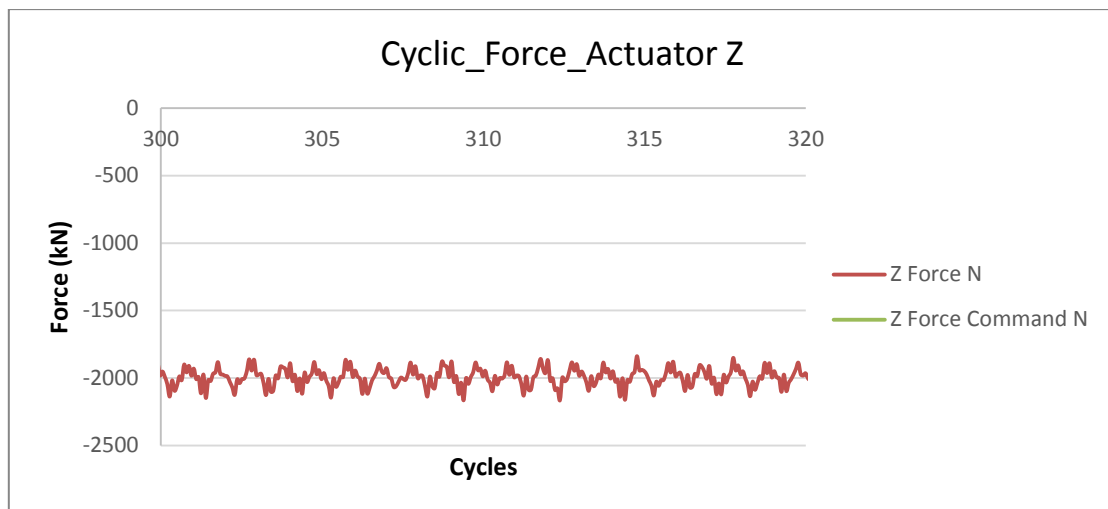


Figura 7.10: Gráfica cíclica de la fuerza del actuador Z durante 20 ciclos. Fuerza (kN) frente a ciclos.

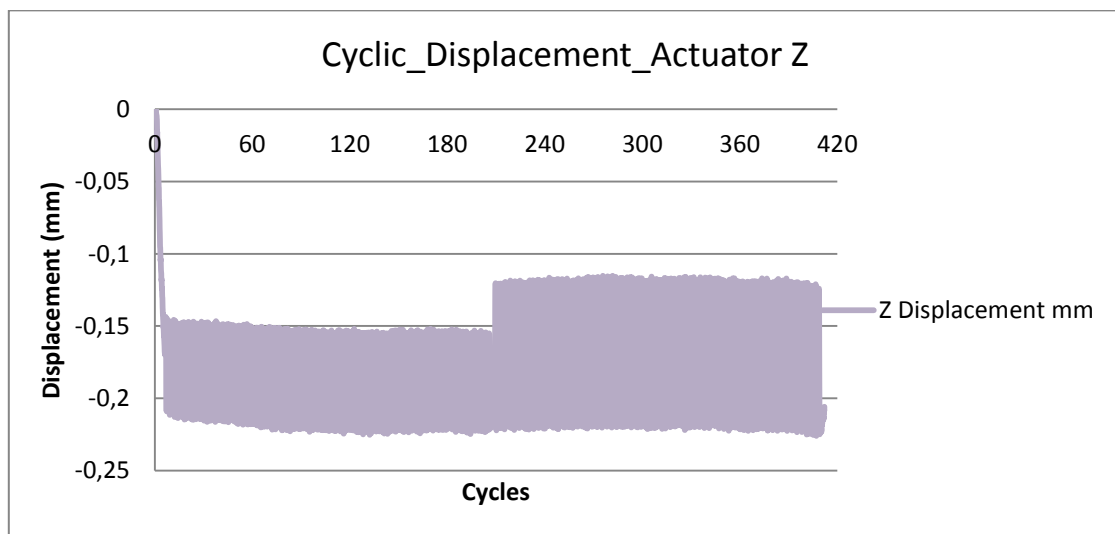


Figura 7.11: Gráfica cíclica del desplazamiento actuador Z en el ensayo. Desplazamiento (mm) frente a ciclos.