



CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DE SUSPENSIÓN DE LOS  
VEHÍCULOS DE PASAJEROS DEL METRO DE MEDELLÍN

MARCELO PALACIO JARAMILLO

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
MEDELLÍN  
2006

CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DE SUSPENSIÓN DE LOS  
VEHÍCULOS DE PASAJEROS DEL METRO DE MEDELLÍN

Marcelo Palacio Jaramillo

Proyecto de Grado

Como parte de los requerimientos para la obtención del título de  
Ingeniero Mecánico

Asesor:

Ingeniero Mecánico Fabio Pineda.

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
MEDELLÍN

2006

A mis padres por su especial apoyo y a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCION .....	8
1. OBJETIVOS .....	10
1.1 OBJETIVO PRINCIPAL .....	10
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	10
2. DESCRIPCION DE COMPONENTES .....	11
3. DESCRIPCION DEL PROCESO .....	16
3.1 DESCRIPCION DE LA PRUEBA .....	16
3.2 DESCRIPCION DEL PROCESAMIENTO DE DATOS.....	18
3.2.1 Protocolo .....	19
4. DESCRIPCION DE EQUIPOS .....	20
4.1 MAQUINA SHENCK TREBEL .....	21
4.2 MAQUINA GCTS .....	22
4.3 MAQUINA HUMBOLDT .....	23
4.4 DISPOSITIVOS DE SOPORTE .....	24
5. RECOMENDACIONES .....	25
6. RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS.....	27
6.1 BUJE DE SUSPENSION PRIMARIA .....	27
6.1.1 Carga Radial .....	27
6.1.2 Carga Axial .....	28
6.1.3 Carga de Torsión .....	29
6.1.4 Carga Cónica .....	30
6.1.5 Carga de Flexión .....	31
6.2 RESORTE HELICOIDAL DE SUSPENSION PRIMARIA .....	32
6.3 RESORTE AUXILIAR DE SUSPENSION SECUNDARIA .....	33
6.4 BARRA DE ACOPLE DEL BOGGIE .....	34
6.5 SOPORTE DE MOTOR DE TRACCION .....	34
6.6 AMORTIGUADOR VERTICAL PRIMARIO .....	35
6.7 AMORTIGUADOR LATERAL SECUNDARIO .....	39
6.8 AMORTIGUADOR VERTICAL SECUNDARIO.....	41
7. CONCLUSIONES .....	42
8. BIBLIOGRAFIA .....	46
8.1 CLASICA .....	46
8.2 INTERNET .....	47
9. ANEXOS .....	48
9.1 TABLAS DE FUNCIONES DE LAS PRUEBAS.....	48
9.2 GRÁFICAS DE COMPORTAMIENTO DE FABRICANTE .....	58
9.3 PLANOS DE DISPOSITIVOS DE MONTAJE .....	61

## ILUSTRACIONES

Pág.

Ilustración 1 Boggie .....	11
Ilustración 2 Amortiguador Lateral Secundario .....	12
Ilustración 3 Biela de Tracción del Boggie .....	12
Ilustración 4 Amortiguador Vertical Secundario .....	13
Ilustración 5 Resorte de Suspensión Secundaria .....	13
Ilustración 6 Amortiguador Vertical Primario .....	14
Ilustración 7 Bujes de Suspensión Primaria.....	14
Ilustración 8 Resorte Helicoidal.....	15
Ilustración 9 Soporte del Motor de Tracción.....	15
Ilustración 10 Arreglo para carga Radial .....	28
Ilustración 11 Arreglo Axial .....	29
Ilustración 12 Arreglo carga de Torsión .....	30
Ilustración 13 Carga Cónica .....	30
Ilustración 14 Arreglo carga de Flexión .....	31
Ilustración 15 Arreglo Resorte Helicoidal .....	32
Ilustración 16 Arreglo Resorte Auxiliar de Suspensión Secundaria .....	33
Ilustración 17 Arreglo Barra Acople Boggie .....	34
Ilustración 18 Soporte de Motor de Tracción .....	35
Ilustración 19 Grafica Amortiguador Fuerza vs Desplazamiento .....	36
Ilustración 20 Ejemplo Gráfica Velocidad vs Fuerza para Amortiguadores .....	37
Ilustración 21 Gráfica Velocidad vs Coeficiente Amortiguador x .....	39
Ilustración 22 Gráfica Velocidad vs Coeficiente Amortiguador y .....	39
Ilustración 23 Gráfica Velocidad vs Coeficiente Amortiguador usado .....	40
Ilustración 24 Gráfica Velocidad vs Coeficiente Amortiguador nuevo .....	40
Ilustración 25 Gráfica Velocidad vs Coeficiente Amortiguador Lateral .....	41

## TABLAS

Pág.

Tabla 1. Datos Técnicos Maquina SCHENCK .....	20
Tabla 2. Datos Técnicos Maquina GCTS .....	21
Tabla 3. Datos Técnicos Maquina HUMBOLDT .....	21

## INTRODUCCIÓN

El Metro de Medellín, conjuntamente con Colciencias y la Universidad EAFIT se encuentra desarrollando un proyecto de caracterización de los vehículos de pasajeros del Metro de Medellín. El proyecto esta a cargo del Grupo de Estudios de Mantenimiento Industrial GEMI de EAFIT y este informe es el resultado de su trabajo. La caracterización consiste en identificar claramente el comportamiento estático y dinámico de los componentes fundamentales del vehículo férreo con la ayuda de un modelo matemático asistido por computador. La caracterización es útil para la proyección de consumo de repuestos, mantenimiento y evaluación de sustitución de repuestos importados.

Dentro de los diversos elementos que requieren caracterización, se encuentran algunos elementos específicos como son: Amortiguador Vertical Primario, Amortiguador Vertical Secundario, Resorte Vertical Primario, Resorte Vertical Secundario, Buje de Suspensión Primaria, Biela de Tracción del Boggie, Amortiguador Lateral Secundario y Soporte del Motor de Tracción. Éste informe tiene como objetivo principal describir y mostrar los resultados de las pruebas realizadas a los elementos mecánicos mencionados anteriormente. Las pruebas efectuadas son indispensables para obtener los datos requeridos en el modelo matemático de la caracterización que podrá ser realizada después del análisis de los resultados de estas pruebas.

Las pruebas realizadas se atienen a los protocolos diseñados por el Ingeniero Peter E. Klauser, los cuales describen paso a paso los procedimientos necesarios incluyendo Objetivos, Normas de Seguridad, Equipos Requeridos, Pre Prueba y procedimiento.

Los Laboratorios de Ingeniería de la Universidad EAFIT fueron escogidos para realizar las pruebas por tener las máquinas, personal y características necesarias.

A cada una de las pruebas realizadas le corresponde un informe que contiene la descripción de cada proceso y las graficas de la información recopilada por las maquinas durante el transcurso de las pruebas. Estos informes no son incluidos en este documento por su gran extensión, sin embargo están disponibles para las personas involucradas en este proyecto. Los informes contienen una gran cantidad de información que fue comprimida en este informe final.

## 1. OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de este documento es describir y mostrar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas para la caracterización de elementos fundamentales de la suspensión de los vehículos de transporte de pasajeros del Metro de Medellín.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

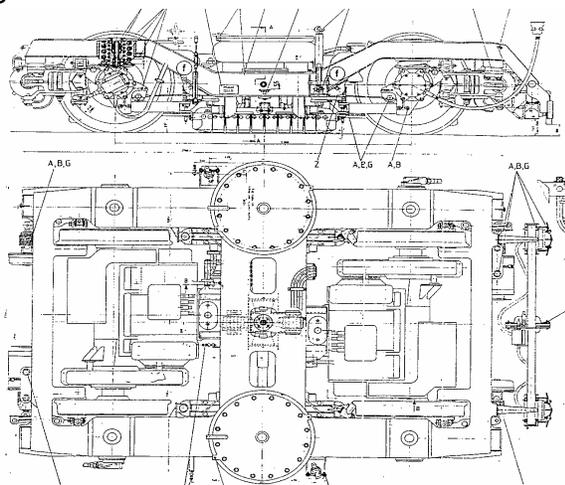
- Realizar pruebas de carga a elementos fundamentales de la suspensión de los vehículos de transporte de pasajeros del Metro de Medellín.
- Documentar los procedimientos y resultados de las pruebas realizadas.
- Anotar recomendaciones para futuras pruebas de estos mismos elementos o similares.

## 2. DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES

Antes de iniciar la descripción de las pruebas realizadas a elementos fundamentales de la suspensión del vehículo de transporte de pasajeros del Metro de Medellín, se mencionará brevemente la ubicación y la función principal de estos elementos. Este primer capítulo facilitara al lector ubicar las piezas montadas en el Boggie y comprenda las pruebas realizadas.

2.1 Bastidor: La base del vehículo es el bastidor del boggie que esta construido con vigas y largueros de tal forma que conforman una caja compacta. Los largueros tienen soldados consolas, agujeros y roscas para poder instalar todos los componentes incluyendo los elementos de suspensión, dentro de los cuales se encuentran los elementos a los que se hace referencia en este informe.

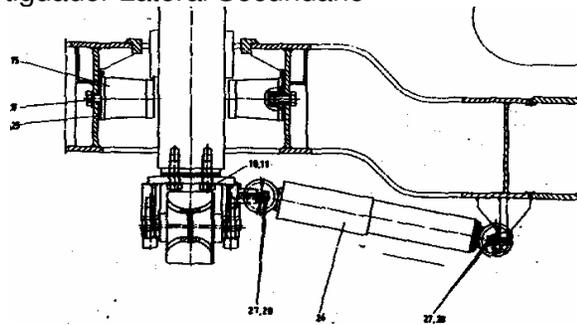
Ilustración 1 Boggie



(Plano No X81360MAE-MF150/F)

2.2 Amortiguador Lateral Secundario: Uno de los elementos a los que se le realizó pruebas y se indica en este informe es el Amortiguador Lateral Secundario, cuya función principal es reducir las vibraciones transversales producidas en el desplazamiento del boggie sobre los rieles.

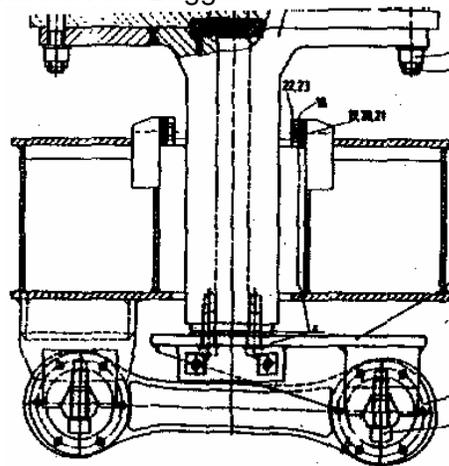
Ilustración 2 Amortiguador Lateral Secundario



(Plano No X80000MAE-CP001/C)

2.3 La Biela de tracción del Boggie: actúa como una guía que evita mayores descargas de fuerza de las ruedas al habitáculo durante el frenado y arranque, este sistema es llamado sistema de articulación baja.

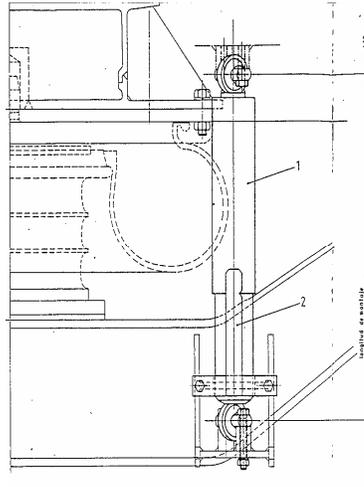
Ilustración 3 Biela de Tracción del Boggie



(Plano No X80000MAE-MP001/C)

2.4 Amortiguador Vertical Secundario: Cada uno de los boggie tiene un sistema de suspensión secundaria compuesta por dos Amortiguadores Verticales Secundarios, estos amortiguadores tienen la tarea de disminuir las oscilaciones que se producen, especialmente las amplitudes de resonancia del habitáculo y logran un amortiguamiento más rápido de las vibraciones del boggie excitado por el riel.

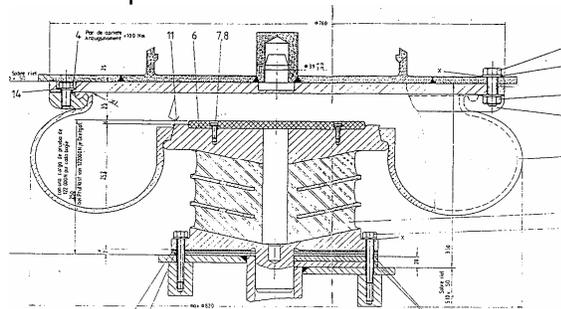
#### Ilustración 4 Amortiguador Vertical Secundario



(Plano No X81340MAE-MF003/C)

2.5 Resorte Auxiliar: El cubículo de pasajeros, se apoya en el bastidor del boggie por medio de un fuelle neumático el cual está soportado por un Resorte de Suspensión Secundaria, para cada fuelle hay un Resorte y para cada boggie hay dos fuelles. Este sistema se encarga de absorber los movimientos de giro y desplazamientos transversales del boggie frente al habitáculo.

#### Ilustración 5 Resorte de Suspensión Secundaria



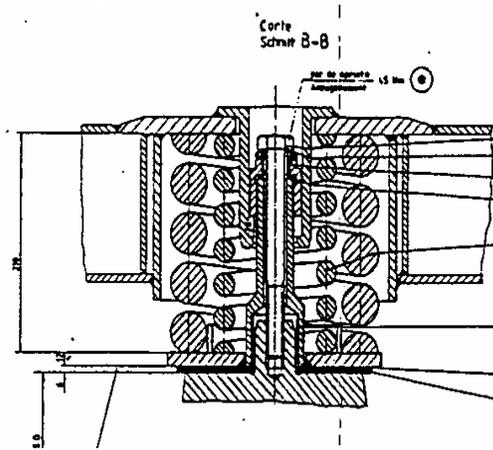
(Plano No X81340MAE-MF002/C)

2.6 El Amortiguador Vertical Primario: tiene la función de minimizar las vibraciones ocasionadas por el movimiento de las ruedas del boggie sobre el riel. Este Amortiguador se diferencia del lateral y del vertical secundario por ser considerablemente mas corto.



los resortes. Estos resortes se componen de un para, en el que un resorte de diámetro menor se inserta dentro de otro con mayor diámetro.

Ilustración 8 Resorte Helicoidal

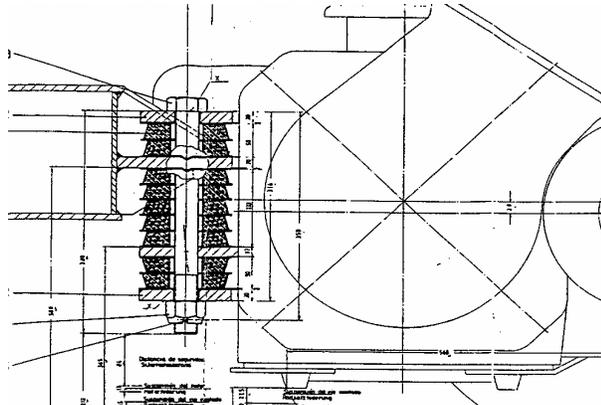


(Plano No X81330MAE-MF001/e)

2.9 Soporte del Motor de Tracción: El motor de tracción esta montado rígidamente en suspensiones por la nariz del eje motor y elásticamente en el bastidor del boggie. Las fuerzas de arranque y frenado del motor de tracción son transmitidas al bastidor del boggie a través del Soporte de Motor de Tracción. El soporte esta compuesto por una serie de placas elásticas, las cuales fueron objeto de pruebas en este informe.

(Manual de mantenimiento)

Ilustración 9 Soporte del Motor de Tracción



(Plano No X81360MAE-MF250)

### 3. DESCRIPCION DEL PROCESO

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA

Antes de realizar cualquiera de las pruebas es indispensable leer cuidadosamente todo el protocolo de la prueba, con el fin de comprender los procedimientos y determinar los requerimientos en términos de equipos, personal, seguridad, montaje, entre otros. Este primer paso permite una correcta planeación y suprimir contratiempos inesperados.

Al tener claros los requerimientos de la prueba se debe asegurar que el laboratorio presente todas las condiciones necesarias para realizar la prueba. Es de vital importancia asegurarse que las máquinas cumplan con las dimensiones suficientes para el montaje de la pieza, además que cumpla con los rangos de fuerza y frecuencia estipuladas en el protocolo.

Antes de realizar la prueba se debe verificar que los transductores estén bien calibrados, con el fin de que los datos obtenidos en la prueba sean lo más precisos posibles. De este procedimiento depende en gran medida la confiabilidad de la información que se entrega en el reporte.

El montaje de la pieza en la máquina universal es un tópico importante al que se le debe prestar la importancia que se merece. La pieza debe quedar instalada de tal manera que cumpla los requerimientos del protocolo y que las fuerzas que se apliquen coincidan con las estipuladas para la prueba. Este montaje debe cumplir con requerimientos de seguridad tanto para los equipos como para el personal involucrado en la prueba.

Las pruebas deben iniciar con los procedimientos de seguridad que deben incluir suministro de elementos de seguridad como gafas o guantes si se

Considera necesario, determinar las variables críticas que pueden ser monitoreadas para determinar el riesgo de un accidente como lo son temperatura, presión y fuerza máxima entre otras. Es pertinente ubicar los extintores en buen estado más cercanos y tener a la mano los números telefónicos de emergencia.

Los protocolos de las pruebas establecen procedimientos que deben ser realizados antes de la prueba, estos procedimientos son denominados **Pre-Test** y establece básicamente para todas las pruebas la utilización de una libreta de apuntes donde se listen todos los acontecimientos de la prueba, en esta instancia se realiza el montaje de la pieza en la máquina universal y se verifican las condiciones del laboratorio, en especial que la temperatura este por encima de los 20 grados centígrados. Además, se realizan varias pruebas para comprobar el funcionamiento de los equipos, para calentarlos y encontrar la temperatura adecuada de funcionamiento y para establecer los valores límites de deformación o fuerza que se deberán aplicar en el procedimiento de la prueba.

El procedimiento de cada una de las pruebas es descrito claramente paso a paso en los protocolos de las pruebas realizados por el Ingeniero Peter E. Klauser. Este procedimiento debe ser seguido al pie de la letra siguiendo las indicaciones y almacenando la información recolectada por el recolector de datos en archivos independientes.

Al finalizar las pruebas el protocolo establece procedimientos de post prueba en el que se recalca la importancia de obtener **back up** de la información recopilada y elaborar un informe de cada una de las pruebas.

### 3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESAMIENTO DE DATOS

Las pruebas fueron realizadas con tres diferentes máquinas, cada una de ellas cuenta con un recolector de datos diferente. La principal consecuencia de este hecho es que la información queda almacenada con extensiones diferentes (.bin, .xls, .dat). Para poder procesar esta información es indispensable unificar todo los archivos bajo una única extensión de archivo.

Por consenso se decide en este caso que los archivos sean convertidos a archivos de *Matlab* con la extensión (.m) debido a la facilidad y versatilidad de este programa para graficar los datos de cada una de las pruebas. Es por esta razón por la cual todas las gráficas de los informes de resultados están hechas con *Matlab*.

Aunque el procedimiento de convertir los archivos a otras extensiones es relativamente fácil, se debe prestar especial atención ya que en algunas ocasiones si no se realiza de la manera adecuada los números pueden variar drásticamente sin que quién realiza el cambio se percate, por lo tanto al realizar cada uno de los cambios de extensión se debe verificar que coincidan exactamente los datos del archivo original y el archivo final.

Como se menciona anteriormente, se utiliza *Matlab* para graficar los datos recolectados en la prueba. De acuerdo al protocolo, se grafica el desplazamiento versus la fuerza. Para agilizar y estandarizar las gráficas de los resultados de las pruebas se programa un protocolo corto y sencillo que permite reducir el tiempo y desgaste del procesamiento de los datos.

### 3.2.1 Protocolo

```
% PROTOCOLO UTILIZADO PARA GRAFICAR PRUEBAS  
% REALIZADAS A ELEMENTOS DE SUSPENSIÒN DEL METRO DE MEDELLÌN  
% AGOSTO 25  
% INGENIERO FABIO PINEDA
```

```
clc; % LIMPIA LA INFORMACIÒN DE LA PANTALLA  
clear all; % LIMPIA LA INFORMACIÒN MEMORIZADA  
clf; % ELIMINA FIGURAS ANTERIORES
```

```
NOMBRE; % LLAMA EL ARCHIVO .M QUE CONTIENE LA INFORMACIÒN DE LA PRUEBA  
plot(datos(:,4),datos(:,3));% GRAFICA TODAS LAS FILAS DE LAS COLUMNAS ELEGIDAS  
grid on % GENERA LA REJILLA  
title('AVPY10R')% SE INTRODUCE ELNOMBRE DE LA GRÀFICA  
xlabel('DISPLACEMENT(mm)')% NOMBRE DE EL EJE X  
ylabel('FORCE (N)')% NOMBRE DEL EJE Y
```

#### 4. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

En este documento se mencionó con anterioridad que para la realización de las pruebas se utilizó tres máquinas universales diferentes, todas ubicadas en los laboratorios de Ingeniería de la Universidad EAFIT. En el informe individual de cada prueba se indica cual de las máquinas fue empleada, sin embargo con el ánimo de ampliar la información de los equipos se listan a continuación los datos técnicos más relevantes de estos equipos. Además de las máquinas Universales también se menciona en este capítulo los elementos fabricados para el montaje de algunas piezas.

Las máquinas universales GTS y Humboldt tienen incorporado el sistema de recolección de datos, sin embargo la máquina Shenck Trebel no tiene este sistema incorporado por lo que fue necesario acoplarle un equipo auxiliar de recolección de datos que transmite por diferentes canales las lecturas de los transductores a un computador que almacena la información.

#### 4.1 MÀQUINA SHENCK TREBEL

Tabla 1 Datos Técnicos Máquina Schenck

ITEM	DESCRIPCIÓN
Marca	Schenck Trebel
Tipo	Máquina Universal Hidráulica
Modelo	UPM 120
Serie	D 73484
Capacidad Nominal	0-120kN
Número de Inventario	8010100
Escala	0-12kN
Resolución	0,004kN
Escala	0-24kN
Resolución	0,010kN
Escala	0-60kN
Resolución	0,020kN
Direcciones de carga	Tensión y Compresión
Resolución	1/10 División de escala
Fecha de Calibración	2006-08-22
Transductor de fuerza extensiométrico	HBM, U1, 20kN
Transductor de fuerza extensiométrico	HBM, Z4A-H, 200kN
Indicador digital	HBM, MGC plus
Termo higrómetro	Marca LUF

(Informe de calibración. Agosto 23 2006)

Esta es una maquina universal de ensayos, que permite realizar pruebas de tensión y compresión, en esta máquina se realizaron las pruebas del Buje de Suspensión primaria, El Acople de de Barra de Tracción, Los Soportes de Motor y los Resortes Helicoidales.

## 4.2 MÀQINA GCTS

Tabla 2 Datos Técnicos Máquina GCTS

ITEM	DESCRIPCIÓN
Modelo	FRM-20-1
Capacidad de carga	22kN
Recorrido	50mm
Servo válvula	11 LPM
Estándar HPS	3 H.P
Max apertura vertical	765 mm
Max apertura horizontal	340mm
Modelo Celda triaxial	TRX 100
Diámetro máximo cilindro	75mm
Diámetro de pistón	15.9mm
Recorrido LVDT	50mm
Volumen estándar	2.3 metros cúbicos
Peso estándar	750 kg

(gcts@)

La maquina GCTS es una maquina triaxial que permite aplicar fuerzas de forma sinusoidal como se requiere en las pruebas de los amortiguadores para poder simular las condiciones de operación, en la actualidad esta maquina se encuentra en los laboratorios de Ingeniería civil de la Universidad EAFIT. Los elementos probados en esta màquina fueron los Amortiguadores Verticales Principales, Amortiguadores Verticales Secundarios y Amortiguador Lateral Secundario.

### 4.3 MÀQUINA HUMBOLDT

Tabla 3 Datos Técnicos Máquina Humboldt

ITEM	DESCRIPCIÓN
Dimensiones	(430x480x1500)mm
Recorrido	100mm
Peso	110kg
Rango de velocidad	0-75.0000 mm/min
Capacidad de Carga	50kN
Espacio vertical	1000mm
Espacio Horizontal	380mm
Voltaje	110/220 VAC 50/60Hz
Corriente	8.5 amp
Convertor Análogo a digital	16 Bit
Almacenamiento de información	4000 lectura
Rata recoger información	100 ms
Puerto de computador	RS232
Celda de carga	50kN
Transductor de desplazamiento	25 mm
Canales	4
Frecuencia de lectura	0.1 segundos/lectura

(humboldtmg@)

Esta es una maquina de ensayos de tensión y compresión que se encuentra ubicada en los laboratorios de Ingeniería civil de la universidad EAFIT. Esta maquina tiene incorporado el sistema de adquisición de datos y la extensión de los archivos es (.xls). En esta maquina se realizaron las pruebas de los Resortes Auxiliares secundarios.

#### 4.4 DISPOSITIVOS DE SOPORTE

Algunos de los elementos sometidos a prueba tienen una geometría que de acuerdo a la configuración de la prueba y a los puntos de aplicación de la fuerza, requieren dispositivos especiales para poder ser instalados en la máquina universal.

Específicamente para las pruebas de caracterización de los bujes de suspensión primaria del Metro de Medellín se utilizaron varios dispositivos. Se diseñó una pieza que fue utilizada en las pruebas de carga radial, carga torsional y en las pruebas de la barra del acople de tracción del Boggie. Se diseñó otra pieza para la prueba de carga cónica y por último una pieza para la prueba de flexión y torsión del buje. Los planos de estas piezas y las piezas fabricadas para el montaje de los amortiguadores en las máquinas se encuentran anexos a este documento. El montaje de las piezas se describe claramente en los informes de resultados, en donde se ilustra por medio de fotografías la ubicación de los dispositivos y de los elementos en la máquina universal. Se considera importante mostrar los planos de los dispositivos de soporte para garantizar la repetibilidad de las pruebas en posteriores investigaciones. El resto de dispositivos que se observan en los montajes ilustrados en los informes de resultados hacen parte del inventario de herramientas de las máquinas universales.

## 5. RECOMENDACIONES

Durante el proceso de la realización de estas pruebas, se recopilaron valiosas experiencias que pueden ser importantes para quien en cualquier momento desee realizar estas mismas pruebas o pruebas similares. Las recomendaciones que a continuación se listan buscan ahorro de tiempo, mejorar la calidad de los resultados y en general hacer mas versátil todo el procedimiento.

- Antes de iniciar las pruebas de elementos que contengan materiales elásticos como elastómeros, amortiguadores o resortes es indispensable realizar las pruebas por lo menos dos o tres veces y descartar estos resultados, esto se debe básicamente a que el material debe acomodar su estructura hasta que se estabilice el comportamiento del elemento, en estas dos pruebas iniciales los resultados no son muy consistentes pero a partir de la tercera prueba los resultados son consistentes y son estos los que deberán ser almacenados y analizados.
- Se recomienda realizar los informes de ser posible, inmediatamente después de terminar las pruebas en el laboratorio, de esta manera la información estará mas presente y no se olvidarán datos que pueden ser significativos en los resultados de la prueba.
- Se recomienda trabajar en grupo, ya que de esta manera el trabajo y los resultados podrán estar listos lo mas rápido posible, una correcta distribución de tareas beneficia los resultados en tiempo y calidad.
- La experiencia del operario de la máquina universal es invaluable, por esto se debe tener en cuenta cualquier recomendación ya que esto puede implicar ahorro de tiempo, seguridad para los equipos y personal.
- Es importante verificar que las piezas a las que se le realizan las pruebas estén funcionando adecuadamente, de no ser así los resultados de las pruebas podrán ser afectados drásticamente.

- Si las pruebas se realizan en un laboratorio diferente al propio, es importante exigir los certificados de calibración de las máquinas universales para asegurar la veracidad de los datos recolectados.
- Si después de realizar las pruebas, los datos no coinciden con lo que se espera de la prueba o se intuye un posible error en los resultados se deberá repetir la prueba y corroborar los datos obtenidos. Se deberá determinar un rango de tolerancia para decidir si los resultados concuerdan con la información del fabricante o no.
- Se recomienda llevar un orden estricto en el almacenamiento de toda la información debidamente etiquetada y no eliminar ningún archivo ya que tarde o temprano se requerirá de nuevo.
- Se recomienda graduar la frecuencia de recolección de datos, en donde las pruebas que duren menos tiempo tengan una mayor frecuencia de recolección y las pruebas que se demoren mas tiempo tengan una menor frecuencia de recolección de datos, este procedimiento permite disminuir la cantidad de datos en las pruebas largas ya que en algunos casos es demasiada y su procesamiento se vuelve engorroso y en las pruebas cortas aumenta la resolución de las graficas resultantes.
- En algunas ocasiones el recolector de datos recopila información antes de iniciar la prueba o después de haberla realizado, estos datos interfieren en la graficación, por lo tanto se recomienda eliminar estos datos de la matriz de números antes de graficarlos, de esta manera las gráficas solo tendrán información pertinente a la prueba.
- Cuando se realiza una prueba a algún elemento, se recomienda realizarla a un elemento nuevo y a otro usado del mismo tipo, esto dará un parámetro para determinar el desgaste de los elementos y como se altera el comportamiento con el desgaste.

## 6. RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

### 6.1 BUJE DE SUSPENSIÓN PRIMARIA

El Bujete de Suspensión primaria es un elemento que soporta diferentes tipos de carga cuando está instalado en el Boggie del vehículo de pasajeros del Metro de Medellín. Estas fuerzas son aplicadas en los sentidos radiales, axiales, de torsión, cónica y de flexión. Para cada uno de los tipos de fuerza se realizaron pruebas en el laboratorio de Materiales con la máquina universal Shenck Trebel, de las cuales se obtuvo la información que muestra la función de comportamiento de los elementos en términos de Fuerza (kN) versus deformación (mm). Las funciones que representan el comportamiento de cada uno de los tipos de prueba realizados al Bujete de Suspensión Primario están anexas a este documento. Estas funciones se obtuvieron con las herramientas estadísticas de regresión de *Microsoft Excel*. Los arreglos de montaje del Bujete de suspensión Primario se realizaron de acuerdo al protocolo propuesto por el Ingeniero Peter E. Klauser.

6.1.1 Carga radial: El Bujete de Suspensión Primario fue sometido a prueba cuatro veces consecutivas, de estas pruebas se almacenaron los datos y se graficó la información de Fuerza (kN) vs Deformación (mm). A Las gráficas resultantes se les realizó una regresión lineal ya que las funciones de estas gráficas son de la forma  $F=K*X$  donde  $F$  es la fuerza,  $X$  es el desplazamiento y  $K$  es la constante de fuerza. La constante de fuerza del Bujete de Suspensión Primario se encuentra realizando un promedio entre las Constantes de las cuatro funciones correspondientes a las cuatro pruebas de carga radial.

*K radial*: 4.107 kN/mm

Ilustración 10. Arreglo para carga Radial



6.1.2 Carga Axial: Para la realización de la prueba Axial del Buje de Suspensión Primaria del Metro de Medellín se utilizó un dispositivo cilíndrico que permite simular las fuerzas que actúan en esta dirección cuando está instalado en el Boggie como se muestra en la Ilustración 11.

Las funciones resultantes de la información de Fuerza (kN) vs Desplazamiento (mm) recopilada durante las pruebas tienen tendencias lineales. La constante de fuerza axial se encontró promediando las constantes de las funciones de las cuatro pruebas realizadas al Buje de Suspensión Primaria.

*K axial:* 3.89 kN/mm

Ilustración 11. Arreglo Axial

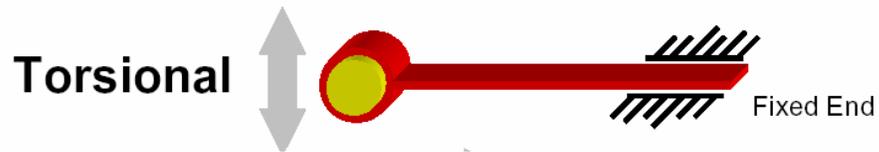


6.1.3 Carga de Torsión: En estas pruebas se sujeta el Bujes por los extremos y se aplica una fuerza en la placa que genera un momento en el buje. El comportamiento que muestra las funciones obtenidas con la información recopilada durante las pruebas es lineal como se muestra en las funciones que se listan en los anexos de este documento.

Al aplicar la fuerza se tuvo en cuenta los valores máximos estipulados en el protocolo de prueba, de tal manera que no excediera 20 kN o 25 mm de deformación. A este elemento se le realizaron cuatro pruebas de carga de Torsión de las cuales se obtuvo para cada una de ellas una función de Fuerza en (Kn) y Desplazamiento en (mm), promediando la constante de fuerza resultante de las funciones se encontró la constante de fuerza de Torsión para el Bujes de Suspensión Primaria.

*K torsión:* 0.0163 kN/mm

Ilustración 12. Arreglo Carga de Torsión

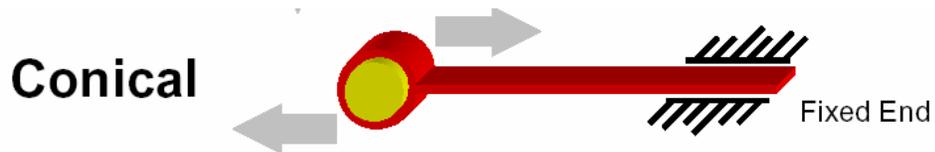


6.1.4 Carga Cónica: El montaje del Buje de Suspensión Primaria en la máquina universal para la prueba de carga cónica requirió de la elaboración de un dispositivo, este dispositivo permite sujetar firmemente el Buje a la máquina y también permite ubicar la fuerza en el lugar correcto.

El procedimiento para encontrar la constante de fuerza Cónica en el Buje de Suspensión Primaria es igual que para los procedimientos anteriores, el único cambio es que para esta prueba solo se realizaron tres pruebas de las cuales se obtuvo la constante de fuerza cónica.

*K cónica:* 0.0403 kN/mm

Ilustración 13. Arreglo Carga Cónica

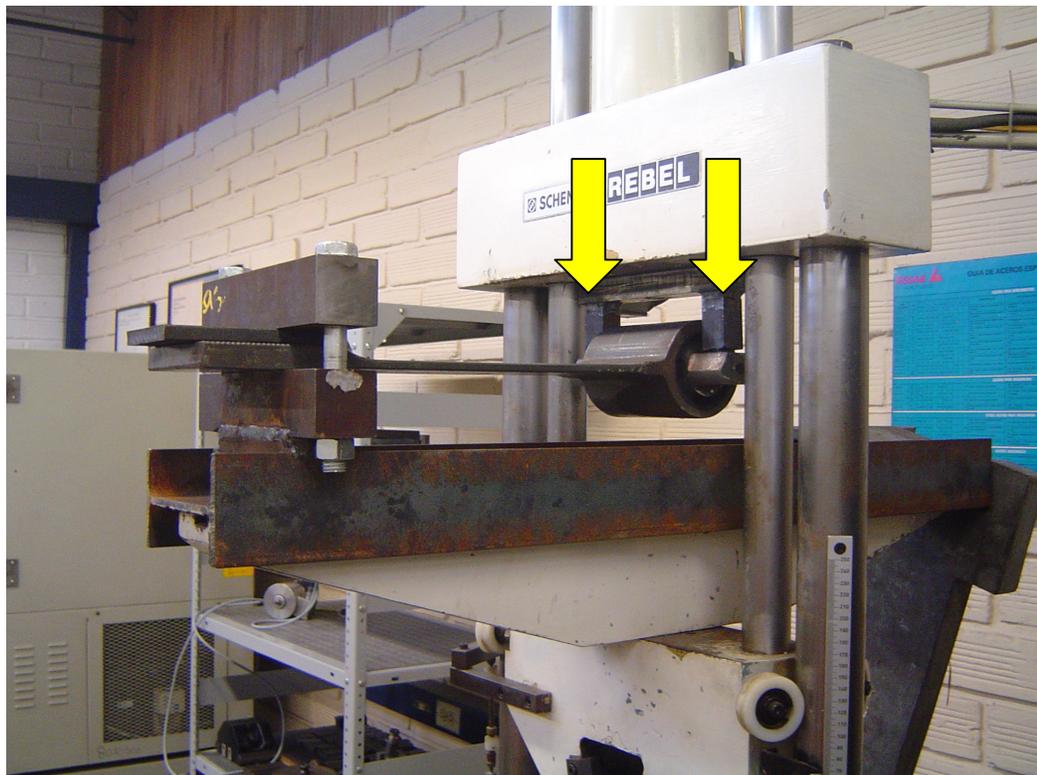


6.1.5 Carga de Flexión: La prueba de flexión corresponde a una de las pruebas complementarias solicitadas por el Ingeniero Peter E. Klauser. Esta prueba requirió de un dispositivo para el montaje de la pieza en la máquina universal.

En esta prueba la fuerza ejercida genera flexión en la placa del buje y torsión en el buje, las funciones resultantes de la información recopilada durante la prueba comprenden estos dos componentes. Estas funciones como las de las pruebas anteriores y el resto de las pruebas se encuentran anexas a este documento. El procedimiento para encontrar la constante es igual que en las pruebas anteriores.

*K flexión:* 0.0666 kN/mm

Ilustración 14. Arreglo Carga de Flexión



## 6.2 RESORTE HELICOIDAL DE SUSPENSION PRIMARIA

El resorte de suspensión primaria esta compuesto por un par de resortes helicoidales, uno con menor diámetro inserto en otro con mayor diámetro, las pruebas se realizaron independientemente para los resortes internos y externos, de un conjunto nuevo y otro usado. Las pruebas fueron realizadas en la máquina de ensayos Shenck Trebel. El comportamiento de los resortes corresponde al modelo elástico lineal representado por una función lineal de la forma  $y=kx+b$  en donde  $y$  es la Fuerza aplicada en (kN) y  $x$  es la deformación ocurrida en (mm) por la aplicación de la fuerza. Las funciones para los resortes internos y externos de los conjuntos nuevos y usados permiten encontrar las constantes de fuerza para cada una de los elementos probados a los que se les realizó un promedio de las constantes entre las pruebas realizadas a cada elemento.

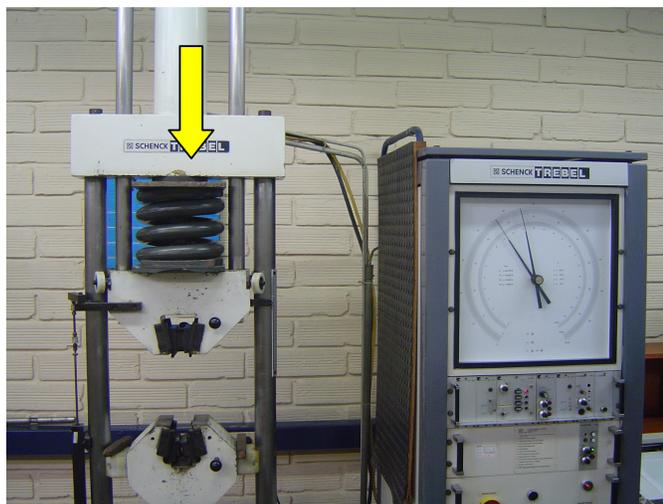
*K resorte interno usado: 0.34 kN/mm*

*K resorte externo usado: 1.128 kN/mm*

*K resorte interno nuevo: 0.33 kN/mm*

*K resorte externo nuevo: 1.04 kN/mm*

Ilustración 15. Arreglo Resorte Helicoidal



### 6.3 RESORTE AUXILIAR DE SUSPENSIÓN SECUNDARIA

El Resorte Auxiliar de la suspensión secundaria al igual que los componentes anteriores fue sometido en las pruebas a fuerzas y durante el procedimiento se almaceno la información de Fuerza (kN) versus Desplazamiento (mm).

Para la prueba se utilizó dos resortes, uno nuevo y otro usado a los cuales a cada uno se les realizó tres ensayos de los que se obtuvieron funciones lineales de la Fuerza (kN) vs Desplazamiento (mm). Promediando las constantes de las tres diferentes pruebas para cada Resorte so obtuvo las constantes para cada uno de los dos resortes.

*K resorte auxiliar usado: 6.76 kN/mm*

*K resorte auxiliar nuevo: 6.71 kN/mm*

Ilustración 16. Arreglo Resorte Auxilias de Suspensión secundaria



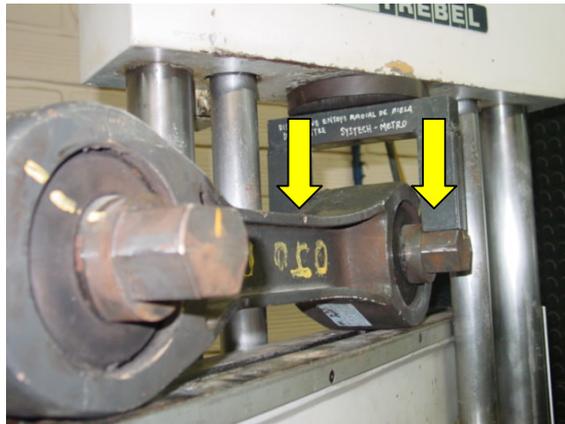
#### 6.4 BARRA DE ACOUPLE DEL BOGGIE

La Barra del Acople del Boggie tiene dos buje elásticos, uno en cada extremo de la barra, las pruebas realizadas a los bujes aplica las fuerzas en sentidos contrarios para simular las fuerzas de tensión y compresión a las que este es sometido cuando está instalado en el vehículo. Las constantes se encontraron mediante una regresión lineal a las funciones de Fuerza (kN) vs Desplazamiento (mm).

*K tensión:* 6.6 kN/mm

*K compresión:* 5.76 kN/mm

Ilustración 17. Arreglo Barra Acople del Boggie



#### 6.5 SOPORTE DE MOTOR DE TRACCIÓN

El Soporte del Motor de Tracción se compone de varias placas elásticas, las pruebas realizadas a este dispositivo consistieron en cargar placas independientes y determinar la deformación causada por la fuerza aplicada. Se probaron tres diferentes placas a las que se les realizó tres pruebas a cada una

de ellas. En primera instancia se realizaron las pruebas según el documento 06.205.TP.07 del 23 de Junio de 2006 propuesto por el Ingeniero Peter E. Klausner, sin embargo los resultados de las pruebas no fueron consistentes ni claros, por lo tanto se tomo la decisión de repetir las pruebas cuyos resultados se muestran a continuación. A diferencia de de las pruebas anteriores el comportamiento de las funciones Fuerza (Kn) vs Desplazamiento (mm) no es lineal sino polinòmica, las funciones para cada uno de los tres soportes probados son las siguientes:

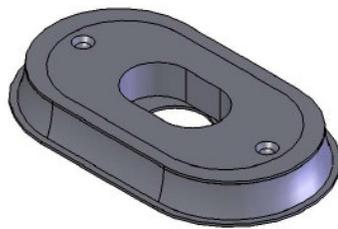
$$\text{Función Soporte 1: } y = 1.53X^2 + 0.44X + 1.11$$

$$\text{Función Soporte 2: } y = 1.40X^2 + 1.25X + 0.543$$

$$\text{Función Soporte 3: } y = 0.58X^2 + 2.44X + 1.11$$

Las funciones resultantes se obtienen encontrando la función promedio de las tres funciones correspondientes a cada uno de los soportes. En estas funciones el eje y corresponde a la fuerza y el eje x corresponde al desplazamiento.

Ilustración 18. Soporte de Motor de Tracción

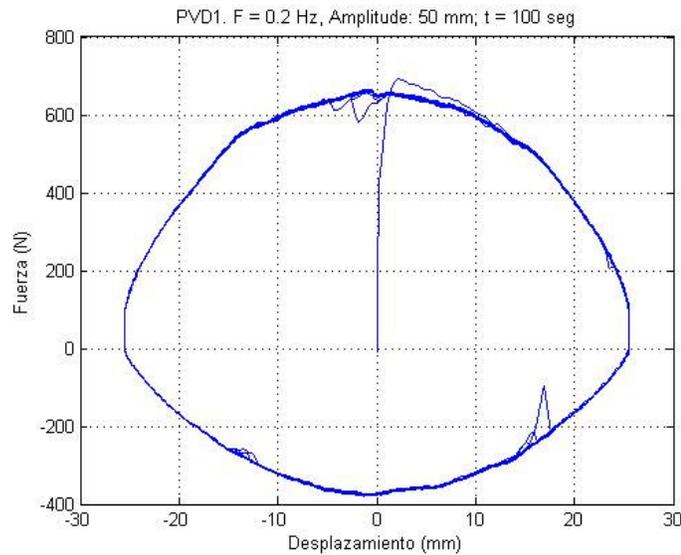


## 6.6 AORTIGUADOR VERTICAL PRIMARIO

Las pruebas realizadas a los Amortiguadores arrojaron resultados que fueron almacenados en archivos independientes, cada archivo contiene la información del tiempo en segundos, la fuerza en Neutons y el desplazamiento en milímetros.

Esta información recopilada fue graficada y cada una de las gráficas se presenta en los informes de resultados de las pruebas de los amortiguadores, estas gráficas tienen una tendencia cíclica ovoide como se ilustra a continuación.

Ilustración 19. Grafica Amortiguador Fuerza vs. Desplazamiento



El coeficiente para los amortiguadores se calcula a partir de una ecuación que involucra la fuerza (F), la velocidad de desplazamiento y por supuesto la constante del amortiguador (k), La ecuación es la siguiente:

$$F = K \dot{X} \quad \text{Ecuación 1}$$

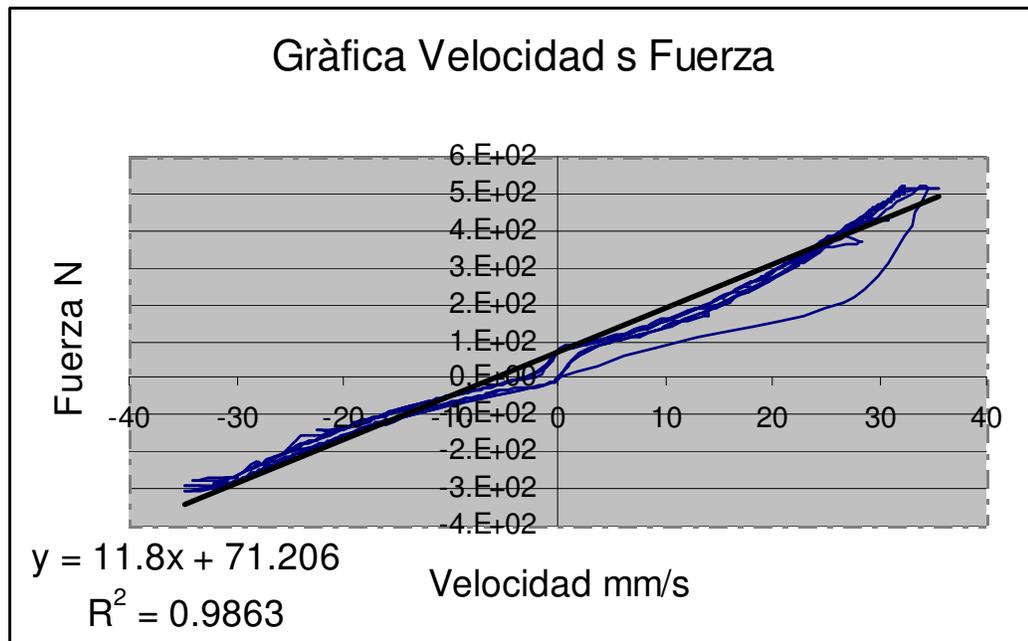
De la información recopilada en las pruebas ya se tiene la fuerza para cada uno de los instantes en que se toma los datos, y la velocidad de desplazamiento

$\dot{X}$  Se calculó utilizando la distancia recorrida en cada intervalo de tiempo de recolección de datos con la ecuación:

$$\dot{X} = \frac{DISTANCIA}{TIEMPO} = \frac{d_2 - d_1}{t_2 - t_1} \quad \text{Ecuación 2}$$

Después de calcular la velocidad en cada intervalo de tiempo se graficó la Fuerza (N) vs la Velocidad (mm/s). Las gráficas resultantes fueron aproximadas con las herramientas estadísticas de *Microsoft Excel* a una regresión lineal que indica la ecuación del Amortiguador de la forma  $F = K \dot{X}^*$  como se ilustra a continuación.

Ilustración 20. Ejemplo Gráfica Velocidad vs Fuerza para los Amortiguadores



La función resultante de la gráfica anterior corresponde a unas condiciones específicas ya que el procedimiento de las pruebas para los amortiguadores tiene varias variables que van cambiando a medida que el procedimiento avanza, estas variables son Frecuencia (Hz), Amplitud (mm) y tiempo de duración de la prueba (seg) ver Ilustración 20.

Después de encontrar todas las ecuaciones de la forma  $F = K \dot{X}^*$  para cada uno de los conjuntos de variables que se estipula en los planes de prueba realizados por el Ingeniero Peter E. Klauser, se advierte que la constante  $K$  del amortiguador varía o cambia en la medida en que se aumenta la frecuencia (Hz).

La variación de la frecuencia (Hz) hace que el tiempo en que el Amortiguador recorra un periodo cambie también, ya que si inicialmente el amortiguador recorre un periodo en un segundo ósea que tiene una frecuencias igual a uno y luego tiene que recorrer el mismo periodo en medio segundo ósea a una frecuencia igual a dos, la velocidad a la cual se desplaza el amortiguador varia también y es por esto que la constante obtenida en las funciones del Amortiguador varia mientras cambia la frecuencia ya que este está en función de la velocidad del amortiguador.

El paso a seguir consistió en encontrar las velocidades medias a lo largo de la prueba de cada uno de los conjuntos de variables, para encontrar la relación entre velocidad media de desplazamiento del amortiguador y constante del amortiguador.

Con los datos de frecuencia que indica cuantos periodos recorre por segundo y la amplitud, que indica la distancia que recorre por periodo se encuentra la velocidad media de la siguiente manera.

$$VELOCIDAD = \frac{DISTANCIA}{TIEMPO} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$DISTANCIA = 2 * AMPLITUD$$

$$TIEMPO^{-1} = FRECUENCIA$$

$$VELOCIDAD = (2 * AMPLITUD) * FRECUENCIA \quad \text{Ecuación 4}$$

Se realizaron las mismas pruebas para dos Amortiguadores Verticales principales que se nombraron Amortiguador (x) y Amortiguador (y) respectivamente, a los cuales se les aplicó el procedimiento que se menciona anteriormente, el resultado del comportamiento de la velocidad promedio con respecto al coeficiente de amortiguación se indican en las gráficas siguientes:

Ilustración 21. Gráfica Velocidad vs Coeficiente Amortiguador x

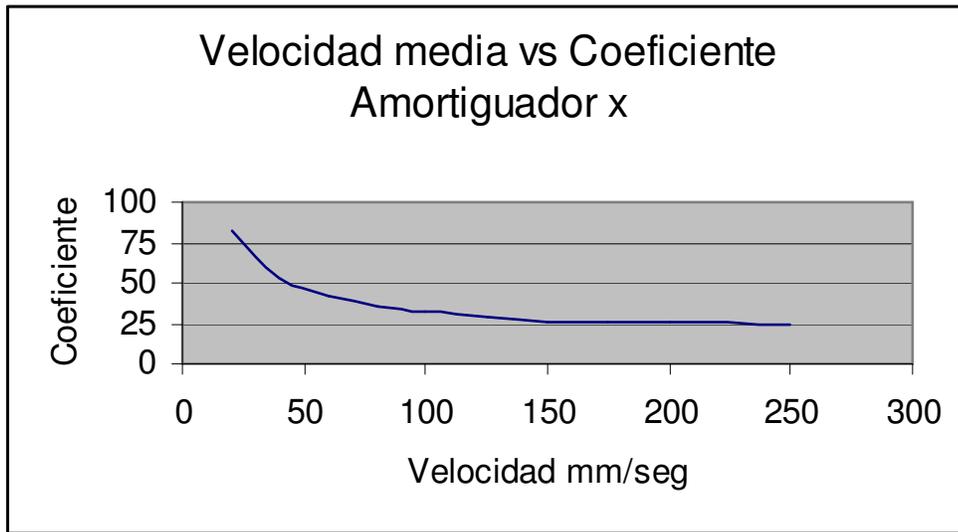
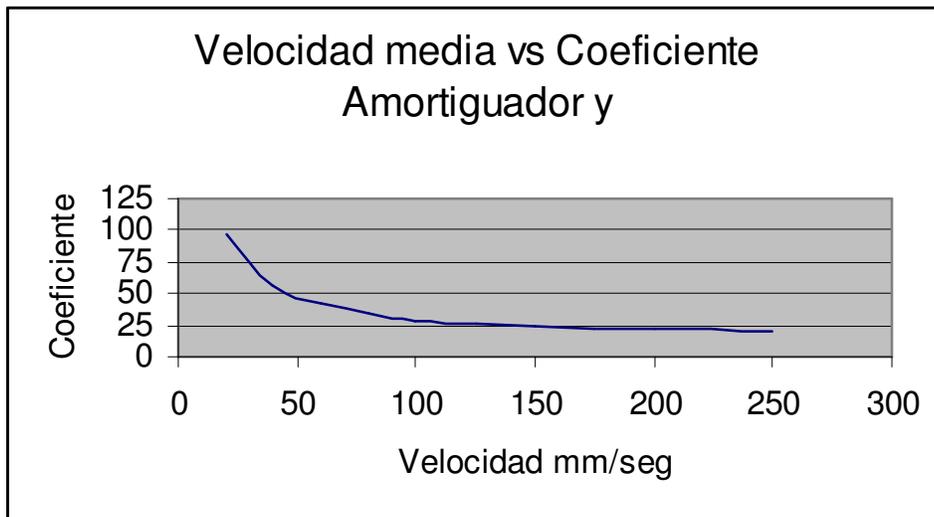


Ilustración 22. Gráfica Velocidad vs Coeficiente Amortiguador y



## 6.7 AMORTIGUADOR LATERAL SECUNDARIO

En la prueba del Amortiguador Lateral Secundario, al igual que en el Amortiguador Vertical Primario se utilizó dos diferentes amortiguadores, uno nuevo y otro usado. El procedimiento incluyendo Frecuencias, Amplitudes y tiempos que se utilizó durante las pruebas y el procedimiento con el cual se

obtuvieron los resultados en el numeral anterior, se aplica a el Amortiguador Lateral Secundario y las gráficas que muestran la relación entre la velocidad promedio del Amortiguador y el Coeficiente son:

Ilustración 23. Gráfica Velocidad vs Coeficiente Amortiguador usado

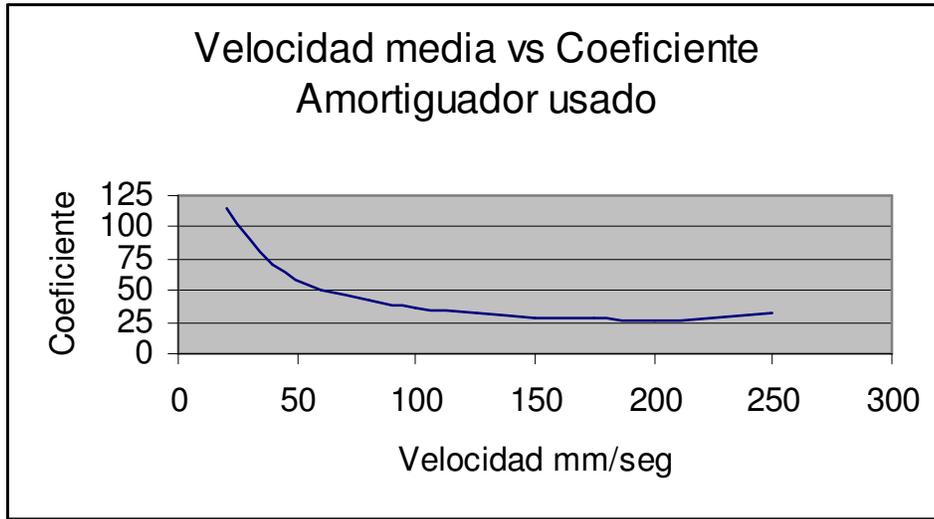
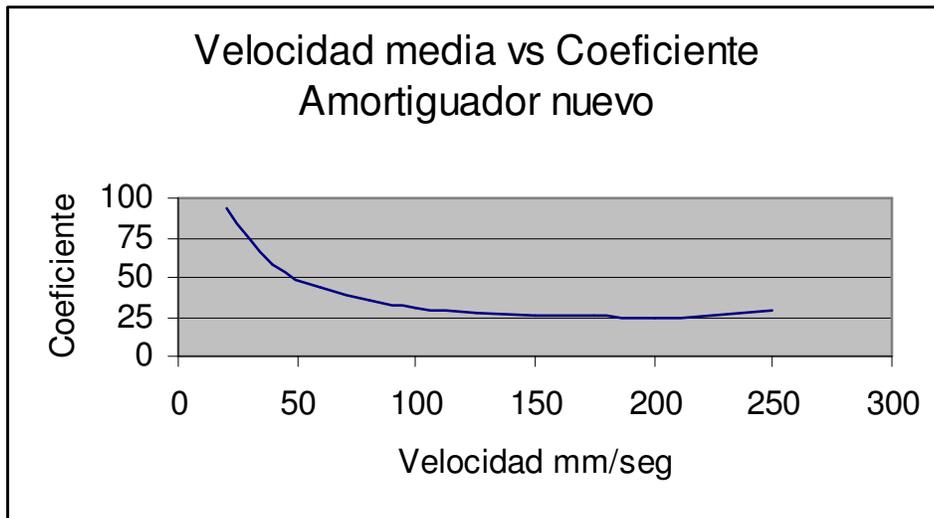


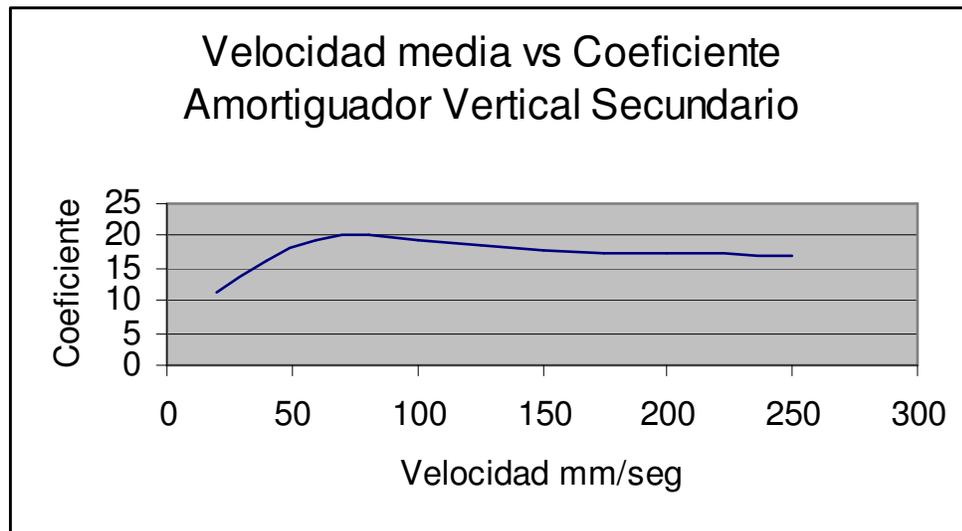
Ilustración 24. Gráfica Velocidad vs Coeficiente Amortiguador nuevo



## 6.8 AMORTIGUADOR VERTICAL SECUNDARIO

El procedimiento de prueba y de análisis de datos para el Amortiguador Vertical Secundario es el mismo que se utilizó para los amortiguadores de los numerales anteriores. En este caso solo se realizó la prueba a un amortiguador cuyos resultados son los que se muestran a continuación.

Ilustración 25. Velocidad vs Coeficiente Amortiguador Vertical Secundario



## 7. CONCLUSIONES

Después de haber realizado las pruebas, elaborado los informes y obtener los resultados de las funciones que describen el comportamiento de cada uno de los elementos que fueron sometidos a prueba durante este proyecto, se puede concluir varias cosas.

Se concluye que la linealidad del comportamiento de Fuerza versus Desplazamiento es predominante para la mayoría de las pruebas, incluyendo el Buje de Suspensión Primaria, Resorte Helicoidal de suspensión Primaria, Resorte Auxiliar de Suspensión Secundaria y Barra de Acople del Boggie, sin embargo los elementos como el Soporte de Motor de Tracción y los Amortiguadores describieron comportamientos no lineales en la relación fuerza desplazamiento.

El Buje de Suspensión Primaria, en cada una de las cinco pruebas realizadas permite realizar una aproximación lineal a la curva resultante en la relación fuerza vs desplazamiento. Tras realizar los promedios de los coeficientes para cada una de las pruebas se obtiene que las constantes para este elemento en cada una de las pruebas son:

K radial: 4.107 kN/mm

K axial: 3.89 kN/mm

K torsion: 0.0163 kN/mm

K conica: 0.0403 kN/mm

K flexion: 0.0666 kN/mm

Al comparar los resultados de los Resortes Helicoidales de Suspensión Primaria se encuentra que la diferencia del coeficiente de los resortes internos no varia considerablemente entre el nuevo y el usado.

K resorte interno usado: 0.34 kN/mm

K resorte interno nuevo: 0.33 kN/mm

Mientras que la diferencia del coeficiente entre los resortes exteriores es considerablemente mayor, de aproximadamente un 8.5%.

K resorte externo usado: 1.128 kN/mm

K resorte externo nuevo: 1.04 kN/mm

Al comparar los resultados de los Resortes Auxiliares de Suspensión Secundaria se encuentra que los resultados de los dos resortes, uno nuevo y otro usado son prácticamente iguales.

K resortes auxiliares: 6.73 kN/mm

La Barra del acople del Boggie presento leves diferencias en los resultados de los coeficientes de los bujes que representan un 15.5% entre ambas pruebas, los coeficientes fueron los siguientes:

K tensión: 6.6 kN/mm

K compresión: 5.76 kN/mm

El soporte de Motor de Tracción tiene un comportamiento no lineal en la relación fuerza vs desplazamiento, al comparar los resultados de las tres placas sometidas a prueba, se advierte que las dos primeras placas tienen un comportamiento similar, mientras que la tercera placa se comporta de manera singular, permitiendo una mayor deformación que las otras dos placas con el mismo valor de fuerza aplicada.

*Función Soporte 1:*  $y = 1.53X^2 + 0.44X + 1.11$

*Función Soporte 2:*  $y = 1.40X^2 + 1.25X + 0.543$

*Función Soporte 3:*  $y = 0.58X^2 + 2.44X + 1.11$

Al observar las curvas del comportamiento de los amortiguadores, que se muestra en los numerales anteriores de la relación entre velocidad media y coeficiente, se advierte que el Amortiguador Vertical Primario y el amortiguador Lateral Secundario tienen comportamientos muy similares en el que el coeficiente disminuye a medida que aumenta la velocidad hasta una asintota aproximada de coeficiente 25. Sin embargo el Amortiguador vertical secundario presenta un comportamiento completamente diferente a los dos mencionados anteriormente ver Ilustraciones 21,22,25.

En los Planes de Prueba elaborados por el Ingeniero Peter E. Klauser se relacionan los comportamientos pre establecidos para cada uno de los elementos que fueron sometidos a prueba en este proyecto. Unos de los elementos estuvieron sometidos a pruebas en TU Berlín, y la información de los restantes se encuentra en graficas suministradas por el fabricante.

El Buje de Suspensión primaria presenta información de un modelamiento del esfuerzo realizado con anterioridad en TU Berlín, sin embargo de estas pruebas solo se obtuvo las constantes de rigidez Radial 1.8 kN/mm y rigidez Axial 2.5 Kn/mm. Al comparar estos resultados con los obtenidos durante las pruebas realizadas en los laboratorios de la Universidad EAFIT, Radial 4.107 kN/mm y Axial 3.89 kN/mm, se aprecia una considerable diferencia especialmente en la constante de rigidez Radial. Ninguna consideración se pudo realizar de las otras pruebas realizadas a este elemento por no poseer información que permita parámetros de comparación.

Los Resortes Helicoidales de Suspensión Primaria, también tienen información previa del modelamiento por TU Berlín. Constante resorte Exterior 1.1 kN/mm e Interno 0.5 kN/mm, esta información es consistente con los resultados obtenidos en las pruebas realizadas para este informe que son: Constante resorte Exterior 1.084 kN/mm y Constante Resorte Interior 0.34 kN/mm.

El fabricante del Resorte Auxiliar de Suspensión Primaria facilita una gráfica que representa el comportamiento de Fuerza vs Desplazamiento en la cual se puede encontrar el coeficiente axial que es de 5.860 kN/mm. Las pruebas realizadas para este informe arrojaron resultados que indican que la constante es de 6.73 kN/mm.

La Barra de Acople de Tracción del Boggie tiene un comportamiento lineal que se aprecia en la grafica de comportamiento Fuerza (kN) vs Deformación (mm) esta gráfica establece un coeficiente de rigidez de 7.14 Kn/mm con un rango que permite constantes desde 5.75 Kn/mm hasta 8.82 Kn/mm. Los resultados obtenidos en las pruebas para este informe se encuentran enmarcadas dentro de este espectro permitido de comportamiento ya que son K tensión: 6.6 kN/mm y K compresión: 5.76 kN/mm.

El fabricante de los Soportes del Motor de Tracción suministran una gráfica con el comportamiento de Fuerza vs Deformación de este elemento, sin embargo no especifican claramente si la curva es para una sola placa o para todo el conjunto armado. A pesar de tener claro este aspecto se aprecia que el comportamiento es similar además los valores están en los mismos rangos.

Los Amortiguadores a los que se les realizaron las pruebas para este informe tienen comportamientos diferentes en las etapas de compresión y tensión, este comportamiento se muestra en gráficas suministradas por el fabricante, que coinciden absolutamente con el comportamiento observado al graficar la información de Fuerza vs Velocidad que se recopiló en las máquinas de los laboratorios de la Universidad EAFIT.

Las graficas que representan el comportamiento de los elementos entregadas por los fabricantes se anexan a este documento para apreciar la relación de la información nominal y la obtenida en este proyecto.

## 8. BIBLIOGRAFIA

### 8.1 CLASICA

- Informe de calibración. Agosto 23 2006. Universidad EAFIT. INFORME DE CALIBRACIÓN Maquina Universal Shenck Trebel. Pg 1 y 2. Medellín. 23 Agosto 2006.
- Manual de Mantenimiento. METRO DE MEDELLÍN. Manual de Mantenimiento Vehiculo de Pasajeros. Capitulo 2.3. Medellín. 20 Febrero 1990.
- Planes de Prueba. Peter E. Klauser. Junio 2006. Lockport, Illinois. Documentos 06.205TP.01, 06.205TP.02, 06.205TP.03, 06.205TP.04, 06.205TP.05, 06.205TP.06, 06.205TP.07, 06.205TP.08.
- Plano No X80000MAE-CO001/C. EMPRESA DE TRANSPORTE DEL VALLE DE ABURRA. Articulación entre Boggie y Caja. Plano No X80000MAE-CO001/C. Fig 2.3.7-01. 10 Enero 1990.
- Plano No X81330MAE-MF001/e. EMPRESA DE TRANSPORTE DEL VALLE DE ABURRA. Suspensión y Articulación eje. Plano No X81330MAE-MF001/e. Fig 2.3.1.1-27. 10 Enero 1990.
- Plano No X81340MAE-MF003/C. EMPRESA DE TRANSPORTE DEL VALLE DE ABURRA. Disposición del Amortiguador Vertical de Choques. Plano No X81340MAE-MF003/C. Fig 2.3.1.1-17. 10 Enero 1990.
- Plano No X81340MAE-MF002/C. EMPRESA DE TRANSPORTE DEL VALLE DE ABURRA. Disposición del Resorte Neumático. Plano

- No X81340MAE-MF002/C. Fig 2.3.1.1-18. 10 Enero 1990.
- Plano No X81340MAE-MF010/. EMPRESA DE TRANSPORTE DEL VALLE DE ABURRA. Amortiguador de Vibraciones Vertical. Plano No X81340MAE-MF010/. Fig 2.3.1.5-02. 10 Enero 1990.
- Plano No X81360MAE-MF150/f. EMPRESA DE TRANSPORTE DEL VALLE DE ABURRA. Pinturas y Rótulos Boggie Motor. Plano No Plano No X81360MAE-MF150/f. Fig 2.3.1.1-27. 10 Enero 1990.
- Plano No X81360MAE-MF250/. EMPRESA DE TRANSPORTE DEL VALLE DE ABURRA. Suspensión del Motor con Retención de Emergencia. Plano No X81360MAE-MF250/. Fig 2.3.1.1-29 . 10 Enero 1990.

## 8.2 INTERNET

- (gcts@). [www.gcts.com](http://www.gcts.com). GCTS TESTING SYSTEMS. Estados Unidos de América. (1 Octubre 2006).
- (humboldtmg@). [www.humboldtmg.com](http://www.humboldtmg.com). Digital Master Loador HM-3000.3F. Illinois Estados Unidos de América. (3 Octubre 2006).

## 9. ANEXOS

### 9.1 TABLAS DE FUNCIONES DE LAS PRUEBAS

Tabla 1. Ecuaciones carga radial Buje de Suspensión Primaria

CARGA RADIAL			
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA	DETERMINACION
Prueba 1	$y = 4.0085x - 1.5914$	Lineal	0.91
Prueba 2	$y = 4.1244x - 0.178$	Lineal	0.89
Prueba 3	$y = 4.1549x - 0.07$	Lineal	0.9
Prueba 4	$y = 4.143x - 0.09$	Lineal	0.9

Tabla 2. Ecuaciones Carga Axial Buje de Suspensión Primaria

CARGA AXIAL			
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA	DETERMINACION
Prueba 1	$y = 3.937x - 1.274$	Lineal	0.96
Prueba 2	$y = 3.951x + 0.577$	Lineal	0.97
Prueba 3	$y = 3.84x + 0.458$	Lineal	0.97
Prueba 4	$y = 3.846x + 0.453$	Lineal	0.97

Tabla 3. Ecuaciones carga de Torsión Buje de Suspensión Primaria

CARGA DE TORSION			
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA	DETERMINACION
Prueba 1	$y = 0.014X + 0.017$	Lineal	0.97
Prueba 2	$y = 0.017X + 0.013$	Lineal	0.99
Prueba 3	$y = 0.018X + 0.001$	Lineal	0.99

Tabla 4. Ecuaciones Carga Cónica Buje de Suspensión Primaria

CARGA CONICA			
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA	DETERMINACION
Prueba 1	$y = 0.040X + 0.012$	Lineal	0.99
Prueba 2	$y = 0.040X + 0.017$	Lineal	0.99
Prueba 3	$y = 0.041X + 0.025$	Lineal	0.99

Tabla 5. Ecuaciones Buje de Suspensión Primaria Flexión

CARGA DE FLEXIÓN			
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA	DETERMINACION
Prueba 1	$y = 0.0673x + 0.1209$	Lineal	0.99
Prueba 2	$y = 0.0677x + 0.087$	Lineal	0.99
Prueba 3	$y = 0.0658x + 0.0886$	Lineal	0.99
Prueba 4	$y = 0.0656x + 0.0879$	Lineal	0.99

Tabla 6. Ecuaciones Resorte Helicoidal Interno Usado

RESORTE INTERIOR USADO			
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA	DETERMINACION
Prueba 1	$y = 0.34x - 0.17$	Lineal	0.98
Prueba 2	$y = 0.34x - 0.20$	Lineal	0.99
Prueba 3	$y = 0.34x - 0.34$	Lineal	0.99
Prueba 4	$y = 0.34x - 0.31$	Lineal	0.99

Tabla 7. Ecuaciones Resorte Helicoidal Externo Usado

RESORTE EXTERIOR USADO			
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA	DETERMINACION
Prueba 1	$y = 1.12x - 1.04$	Lineal	0.99
Prueba 2	$y = 1.13x - 1.32$	Lineal	0.99
Prueba 3	$y = 1.13x - 1.28$	Lineal	0.99
Prueba 4	$y = 1.13x - 1.09$	Lineal	0.99

Tabla 8. Ecuaciones Resorte Helicoidal Interior Nuevo

RESORTE INTERIOR NUEVO			
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA	DETERMINACION
Prueba 1	$y = 0.33x - 0.49$	Lineal	0.99
Prueba 2	$y = 0.33x - 0.39$	Lineal	0.99
Prueba 3	$y = 0.33x - 0.53$	Lineal	0.99
Prueba 4	$y = 0.33x - 0.30$	Lineal	0.99

Tabla 9. Ecuaciones Resorte Helicoidal Exterio Nuevo

RESORTE EXTERIOR NUEVO			
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA	DETERMINACION
Prueba 1	$y = 1.04x - 1.24$	Lineal	0.99
Prueba 2	$y = 1.05x - 1.56$	Lineal	0.99
Prueba 3	$y = 1.03x - 1.33$	Lineal	0.99
Prueba 4	$y = 1.04x - 1.54$	Lineal	0.99

Tabla 10. Ecuaciones Resorte Auxiliar Usado

RESORTE AUXILIAR DE SUSPENSION SECUNDARIA USADO			
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA	DETERMINACION
Prueba 1	$y = 6.766X - 1.13$	Lineal	0.98
Prueba 2	$y = 6.75X - 1.09$	Lineal	0.98
Prueba 3	$y = 6.77X - 1.01$	Lineal	0.98

Tabla 11. Ecuaciones Resorte Auxiliar Nuevo

RESORTE AUXILIAR DE SUSPENSION SECUNDARIA NUEVO			
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA	DETERMINACION
Prueba 1	$y = 6.70X - 1.35$	Lineal	0.99
Prueba 2	$y = 6.73X - 1.4$	Lineal	0.99
Prueba 3	$y = 6.7X - 1.6$	Lineal	0.99

Tabla 12. Ecuaciones de la Barra de Acople del Boggie Tensión

BARRA DE ACOUPLE DEL BOGGIE TENSION			
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA	DETERMINACION
Prueba 1	$y = 6.63X + 2.11$	Lineal	0.99
Prueba 2	$y = 6.56X + 2.27$	Lineal	0.99

Tabla 13. Ecuaciones de la Barra de Acople del Boggie Compresión

BARRA DE ACOUPLE DEL BOGGIE COMPRESION			
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA	DETERMINACION
Prueba 1	$y = 5.05X + 1.51$	Lineal	0.99
Prueba 2	$y = 5.97X + 3.52$	Lineal	0.99
Prueba 3	$y = 6.26X + 3.03$	Lineal	0.99

Tabla 14. Ecuaciones Soporte de Motor de Tracción Placa 1

SOPORTE DE MOTOR DE TRACCION PLACA 1		
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA
Prueba 1	$y = 1.49X^2 + 0.71X + 1.04$	Polinòmico Segundo Grado
Prueba 2	$y = 1.54X^2 + 0.32X + 1.03$	Polinòmico Segundo Grado
Prueba 3	$y = 1.56X^2 + 0.30X + 1.26$	Polinòmico Segundo Grado

Tabla 15. Ecuaciones Soporte de Motor de Tracción Placa 2

SOPORTE DE MOTOR DE TRACCION PLACA 2		
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA
Prueba 1	$y = 1.32X^2 + 1.47X + 0.079$	Polinòmico Segundo Grado
Prueba 2	$y = 1.43X^2 + 1.069X + 0.67$	Polinòmico Segundo Grado
Prueba 3	$y = 1.44X^2 + 1.24X + 0.88$	Polinòmico Segundo Grado

Tabla 16. Ecuaciones Soporte de Motor de Tracción Placa 3

SOPORTE DE MOTOR DE TRACCION PLACA 3		
PRUEBA	FUNCION	TENDENCIA
Prueba 1	$y = 0.54X^2 + 2.61X + 0.41$	Polinòmico Segundo Grado
Prueba 2	$y = 0.61X^2 + 2.62X + 1.89$	Polinòmico Segundo Grado
Prueba 3	$y = 0.60X^2 + 2.09X + 1.05$	Polinòmico Segundo Grado

Tabla 17. Funciones regresión lineal Graficas Fuerza vs Velocidad

AMORTIGUADOR VERTIVAL PRIMARIO X		
Nombre prueba	Función	determinación
AVPX	$Y=88.236x+517.67$	0.92
AVPX1	$Y=82.621x+555.16$	0.95
AVPX1R	$Y=82.264 x+571.43$	0.95
AVPX2	$Y=53.13x+454.02$	0.95
AVPX2R	$Y=52.335x+472.71$	0.95
AVPX3	$Y=41.303x+356.29$	0.96
AVPX3R	$Y=40.888x+362.58$	0.96
AVPX4	$Y=35.207x+271.93$	0.96
AVPX4R	$Y=35.304x+253.96$	0.96
AVPX5	$Y=31.69x+147.76$	0.96
AVPX5R	$Y=31.551x+157.73$	0.96
AVPX6	$Y=28.554x+19.445$	0.96
AVPX6R	$Y=28.365x+12.711$	0.96
AVPX7	$Y=26.387x-122.53$	0.94
AVPX7R	$Y=26.233x-118.37$	0.95
AVPX8	$Y=25.277x-228.06$	0.96
AVPX8R	$Y=25.141x-216.78$	0.96
AVPX9	$Y=25.223x-204.26$	0.97
AVPX9R	$Y=25.152x-185.24$	0.97
AVPX10	$Y=24.694x-201.4$	0.95
AVPX10R	$Y=24.608x-250.93$	0.95
AVPX11	$Y=29.502x+242.7$	0.95
AVPX11R	$Y=29.524x+244.4$	0.94
AVPX12	$Y=27.714x+214.78$	0.84
AVPX12R	$Y=26.683x+207.08$	0.84
AVPX13	$Y=37.414x+407.42$	0.97
AVPX14	$Y=30.071x+203.38$	0.97
AVPX15	$Y=25.799x-81.007$	0.95
AVPXC1	$Y=49.473x+422.53$	0.95
AVPXC2	$Y=47.822x+463.31$	0.95

Tabla 17. Funciones regresión lineal Graficas Fuerza vs Velocidad

AMORTIGUADOR VERTIVAL PRIMARIO Y		
Nombre prueba	Función	determinación
AVPY	$Y=96.784x+345.57$	0.91
AVPY1	$Y=97.665x+381.61$	0.95
AVPY1R	$Y=96.687x+393.12$	0.95
AVPY2	$Y=57.231x+311.41$	0.95
AVPY2R	$Y=55.604x+291.93$	0.94
AVPY3	$Y=41.367x+245.02$	0.94
AVPY3R	$Y=40.674x+246.09$	0.95
AVPY4	$Y=33.471x+192.96$	0.95
AVPY4R	$Y=32.946x+216.77$	0.95
AVPY5	$Y=29.172x+65.968$	0.95
AVPY5R	$Y=28.896x+68.96$	0.95
AVPY6	$Y=25.706x-33.378$	0.95
AVPY6R	$Y=25.459x-1.24$	0.94
AVPY7	$Y=23.301x-96.192$	0.93
AVPY7R	$Y=23.067x-137.1$	0.92
AVPY8	$Y=21.858x-222.90$	0.92
AVPY8R	$Y=21.702x-231.68$	0.88
AVPY9	$Y=21.301x-253.93$	0.88
AVPY9R	$Y=21.171x-265.1$	0.86
AVPY10	$Y=20.389x-293.98$	0.86
AVPY10R	$Y=20.329x-293.59$	0.61
AVPY11	$Y=24.895x+65.987$	0.61
AVPY11R	$Y=24.858x+39.18$	0.94
AVPY12	$Y=20.615x+66.068$	0.84
AVPY12R	$Y=20.705x+51.985$	0.84
AVPY13	$Y=34.999x+229.15$	0.97
AVPY14	$Y=26.672x+61.611$	0.97
AVPY15	$Y=22.227x-150.6$	0.95
AVPYC1	$Y=94.349x+356.3$	0.95
AVPYC2	$Y=92.755x+299.82$	0.95

Tabla 18. Funciones regresión lineal Gráficas Fuerza vs Velocidad

AMORTIGUADOR LATERAL SECUNDARIO USADO		
Nombre prueba	Función	determinación
ALSU	$Y=131.51x+247.87$	0.91
ALSU1	$Y=115.7x+282.55$	0.93
ALSU1R	$Y=115.8 x+369.18$	0.9
ALSU2	$Y=69.89x+254.56$	0.94
ALSU2R	$Y=68.04x+365.71$	0.95
ALSU3	$Y=51.318x+229.11$	0.95
ALSU3R	$Y=50.695x+200.61$	0.96
ALSU4	$Y=41.806x+77.636$	0.96
ALSU4R	$Y=41.104x+96.665$	0.96
ALSU5	$Y=35.921x+19.038$	0.96
ALSU5R	$Y=35.522x+63.292$	0.96
ALSU6	$Y=31.582x-129.25$	0.96
ALSU6R	$Y=31.329x-77.312$	0.98
ALSU7	$Y=28.932x-282.81$	0.98
ALSU7R	$Y=28.566x-279.08$	0.98
ALSU8	$Y=27.74x-433.02$	0.98
ALSU8R	$Y=27.487x-496.12$	0.97
ALSU9	$Y=27.181x-444.73$	0.97
ALSU9R	$Y=27.069x-395.7$	0.93
ALSU10	$Y=32.73x+126.52$	0.95
ALSU10R	$Y=32.74x+100.92$	0.96
ALSU11	$Y=32.96x+131.79$	0.96
ALSU11R	$Y=33.256x+105.8$	0.93
ALSU12	$Y=42.309x+322.75$	0.93
ALSU13	$Y=32.724x+83.03$	0.95
ALSU14	$Y=27.801x-299.66$	0.97
ALSUC1	$Y=66.939x+107.26$	0.97
ALSUC2	$Y=62.255x+136.26$	0.95

Tabla 19. Funciones regresión lineal Gráficas Fuerza vs Velocidad

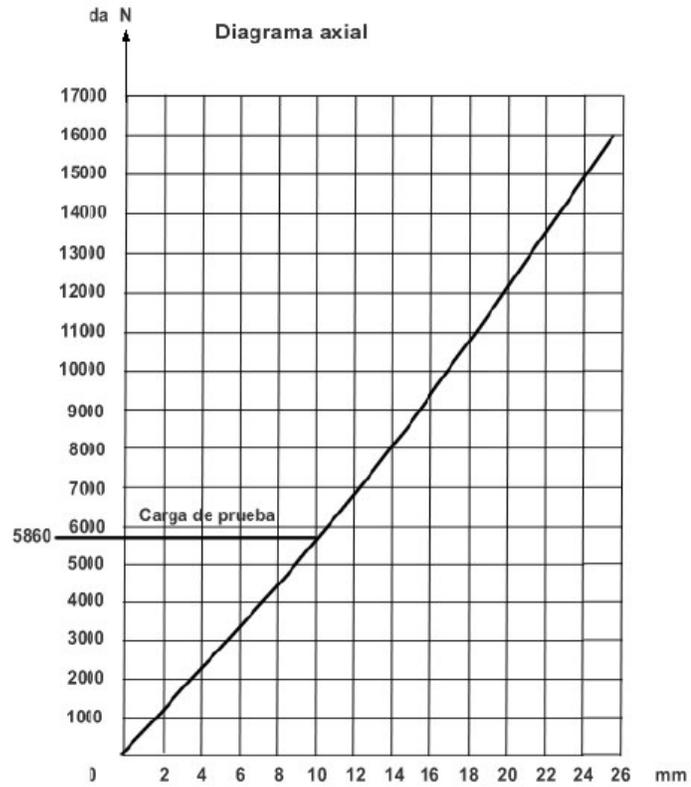
AMORTIGUADOR LATERAL SECUNDARIO NUEVO		
Nombre prueba	Función	determinación
ALSN	$Y=103.82x+402.17$	0.93
ALSN1	$Y=94.11x+475.42$	0.95
ALSN1R	$Y=93.127x+501.91$	0.95
ALSN2	$Y=57.469x+392.88$	0.95
ALSN2R	$Y=56.427x+416.68$	0.95
ALSN3	$Y=43.158x+300.47$	0.96
ALSN3R	$Y=42.132x+274.7$	0.96
ALSN4	$Y=35.507x+157.67$	0.96
ALSN4R	$Y=34.989x+114.72$	0.96
ALSN5	$Y=31.346x-4.75$	0.97
ALSN5R	$Y=30.902x-15.335$	0.97
ALSN6	$Y=28.146x-118.67$	0.98
ALSN6R	$Y=27.993x-127.62$	0.98
ALSN7	$Y=26.431x-259.17$	0.98
ALSN7R	$Y=26.078x-271.89$	0.98
ALSN8	$Y=25.144x-389.92$	0.98
ALSN8R	$Y=24.82x-424.49$	0.98
ALSN9	$Y=24.521x-342.48$	0.98
ALSN9R	$Y=24.457x-399.59$	0.98
ALSN10	$Y=28.302x+60.631$	0.97
ALSN10R	$Y=28.299x+47.873$	0.97
ALSN11	$Y=26.647x+127.71$	0.90
ALSN11R	$Y=26.883x+78.1$	0.91
ALSN12	$Y=36.415x+243.87$	0.97
ALSN13	$Y=28.878x+37.326$	0.97
ALSN14	$Y=24.953x-275.94$	0.96
ALSNC1	$Y=56.285x+316.65$	0.95
ALSNC2	$Y=52.901x+360.22$	0.95

Tabla 19. Funciones regresión lineal Gráficas Fuerza vs Velocidad

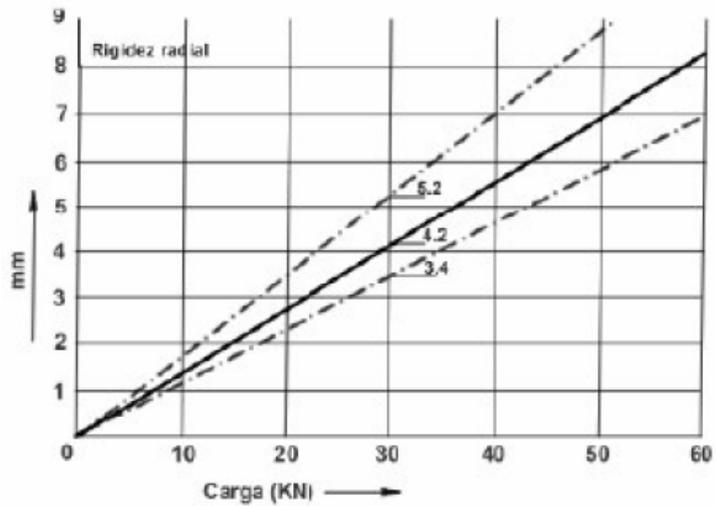
AMORTIGUADOR VERTICAL SECUNDARIO		
Nombre prueba	Función	determinación
AVS	$Y=11.846x+70.305$	0.99
AVS1	$Y=11.317x+50.398$	0.99
AVS1R	$Y=11.392x+39.484$	0.99
AVS2	$Y=16.077x+92.318$	0.98
AVS2R	$Y=15.904x+90.584$	0.98
AVS3	$Y=19.444x+57.886$	0.98
AVS3R	$Y=19.103x+44.994$	0.98
AVS4	$Y=19.986x+57.589$	0.99
AVS4R	$Y=19.669x+71.713$	0.99
AVS5	$Y=19.455x+88.333$	0.99
AVS5R	$Y=19.182x+74.79$	0.99
AVS6	$Y=18.624x+117.66$	0.99
AVS6R	$Y=18.293x+118.95$	0.99
AVS7	$Y=17.827x+155.01$	.99
AVS7R	$Y=17.564x+128.74$	0.99
AVS8	$Y=17.308x+148.75$	0.99
AVS8R	$Y=17.106x+131.44$	0.98
AVS9	$Y=17.187x+152.87$	0.98
AVS9R	$Y=17.023x+130.1$	0.98
AVS10	$Y=16.791x-20.793$	0.98
AVS10R	$Y=17.0139x+17.868$	0.99
AVS11	$Y=16.448x-42.892$	0.98
AVS11R	$Y=16.745x-21.791$	0.98
AVS12	$Y=16.163x-16.381$	0.98
AVS13	$Y=17.413x+33.693$	0.98
AVS14	$Y=17.139x+124.55$	0.98
AVSC1	$Y=18.697x+80.353$	0.99
AVSC2	$Y=18.334x+70.013$	0.95

## 9.2 GRÀFICAS DE COMPORTAMIENTO DEL FABRICANTE

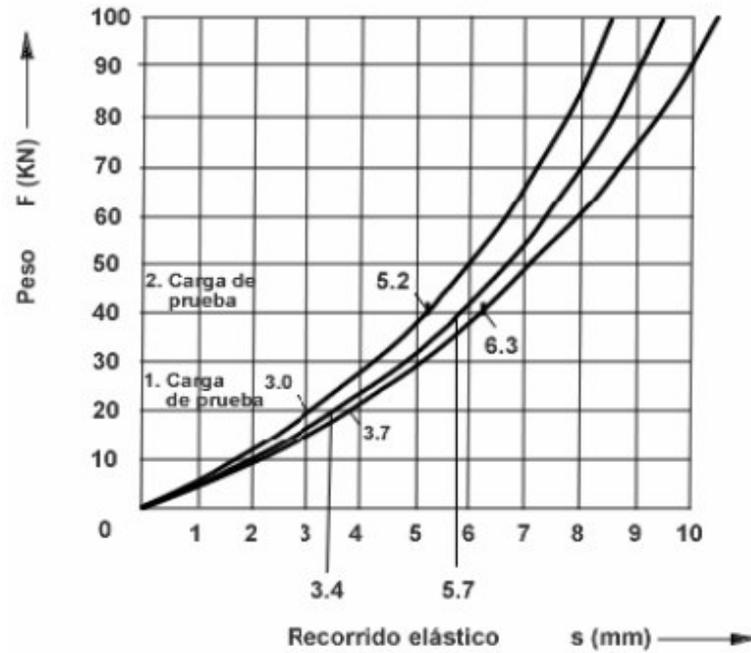
Grafica 1 Características Vertical Para el Resorte de Suspensión Auxiliar



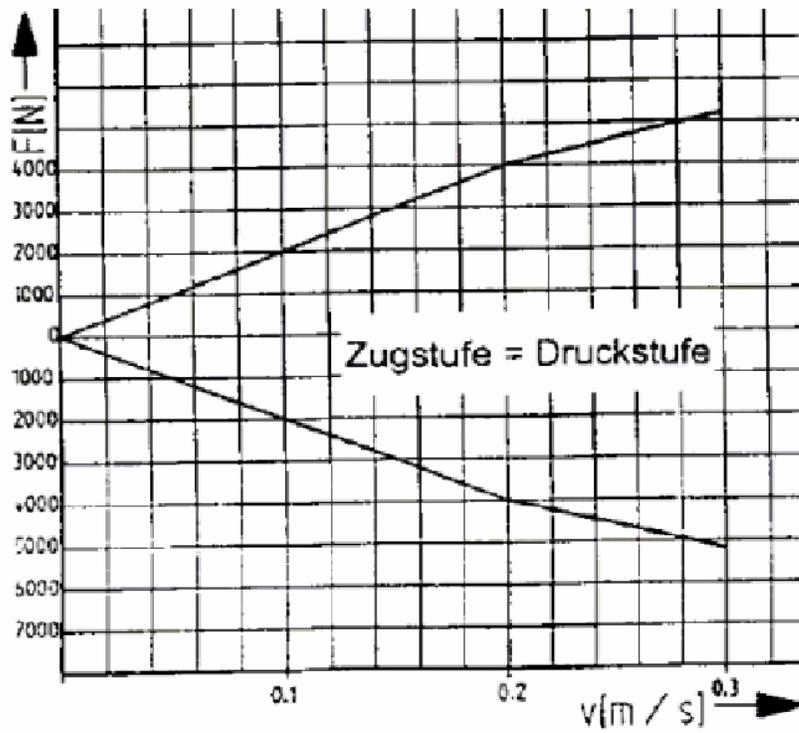
Grafica 2 Características Fuerza vs Deflexión para el Acople de Tracción



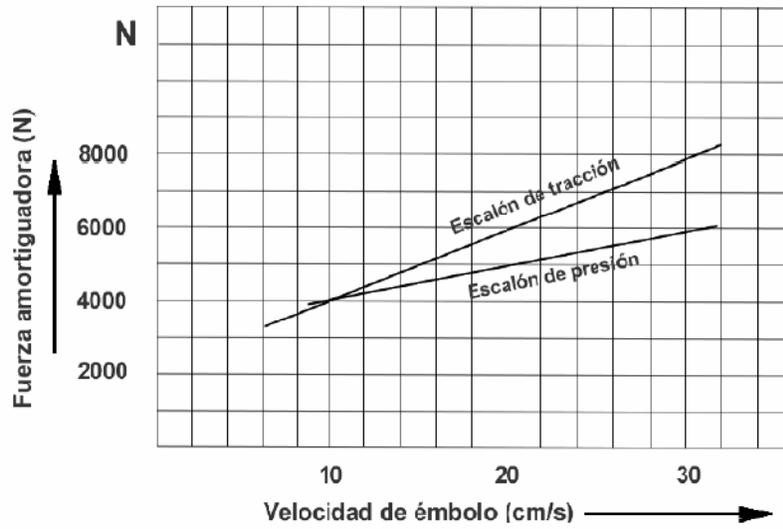
Grafica 3 Características vertical para el soporte del Motor de tracción



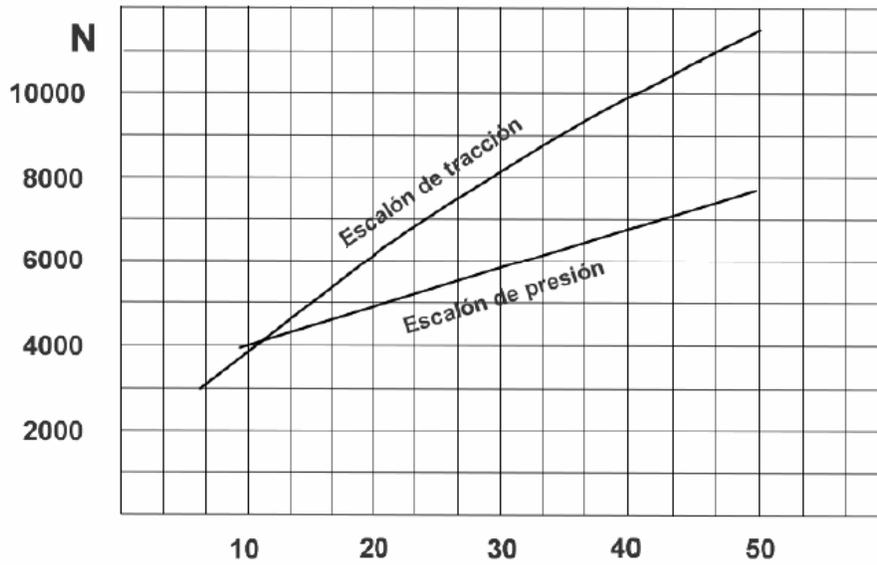
Grafica 4 Características de Amortiguador Vertical Primaria



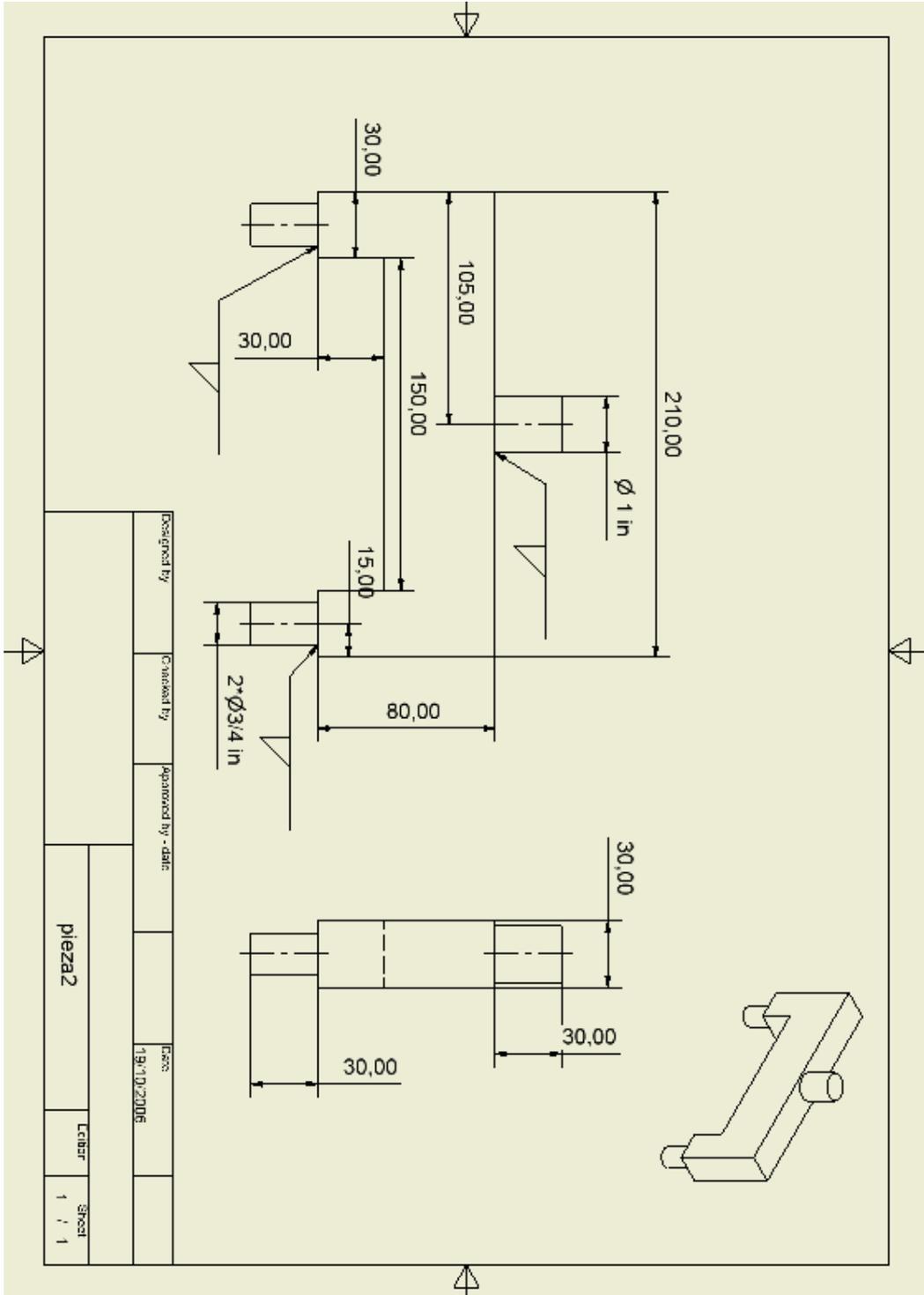
Grafica 5 Características de Amortiguador Vertical Secundario

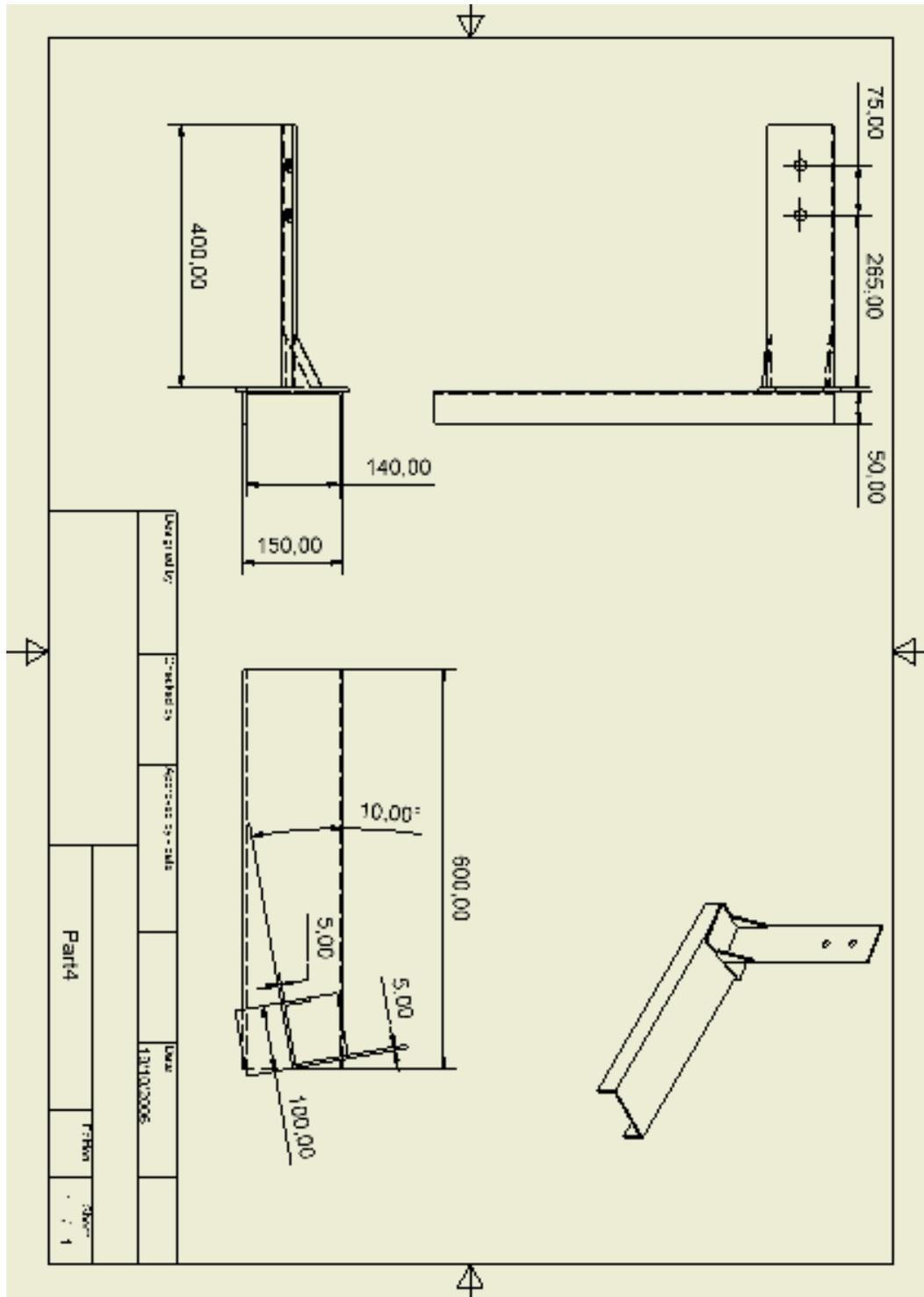


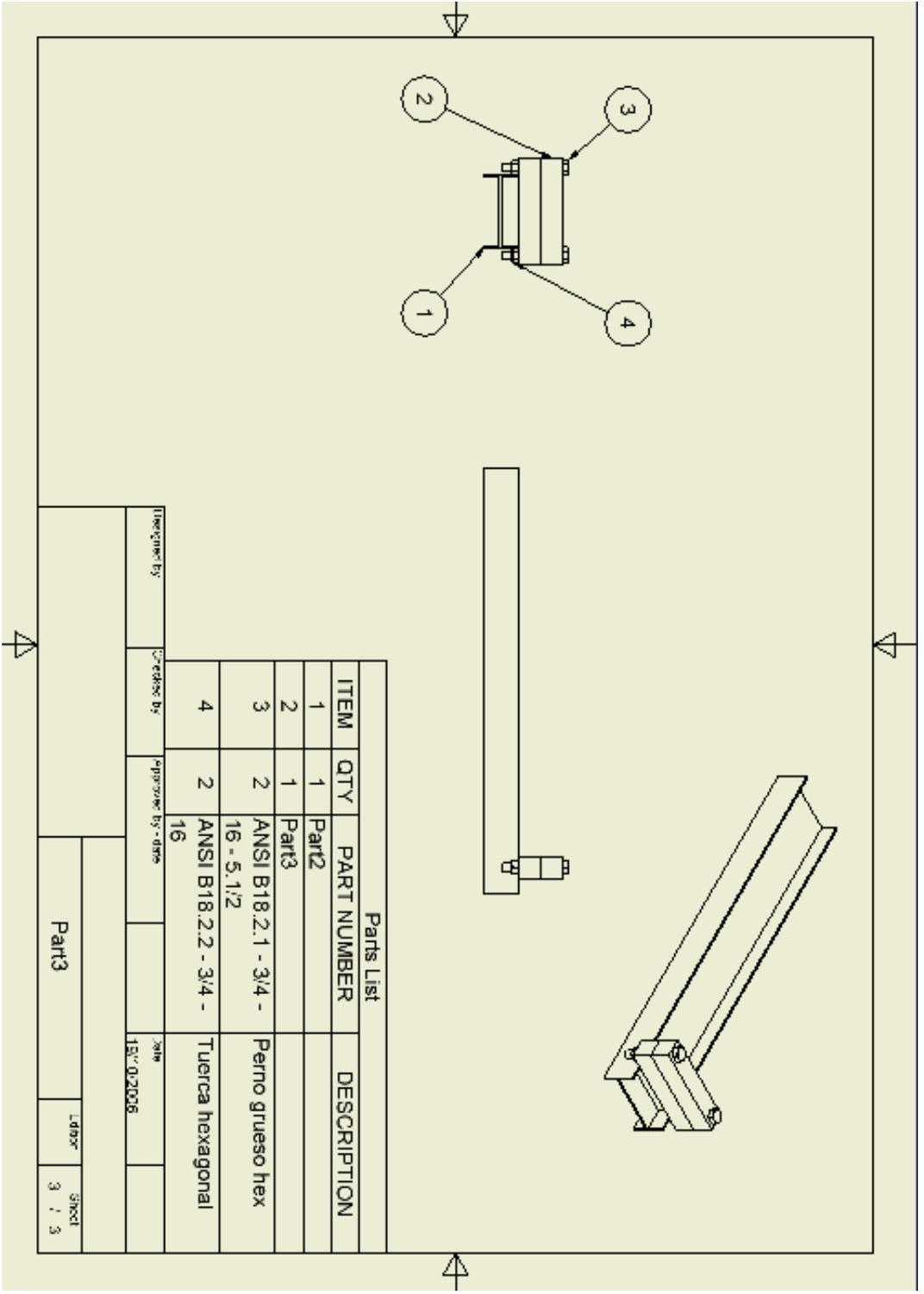
Grafica 6 Características de Amortiguador Lateral Secundario

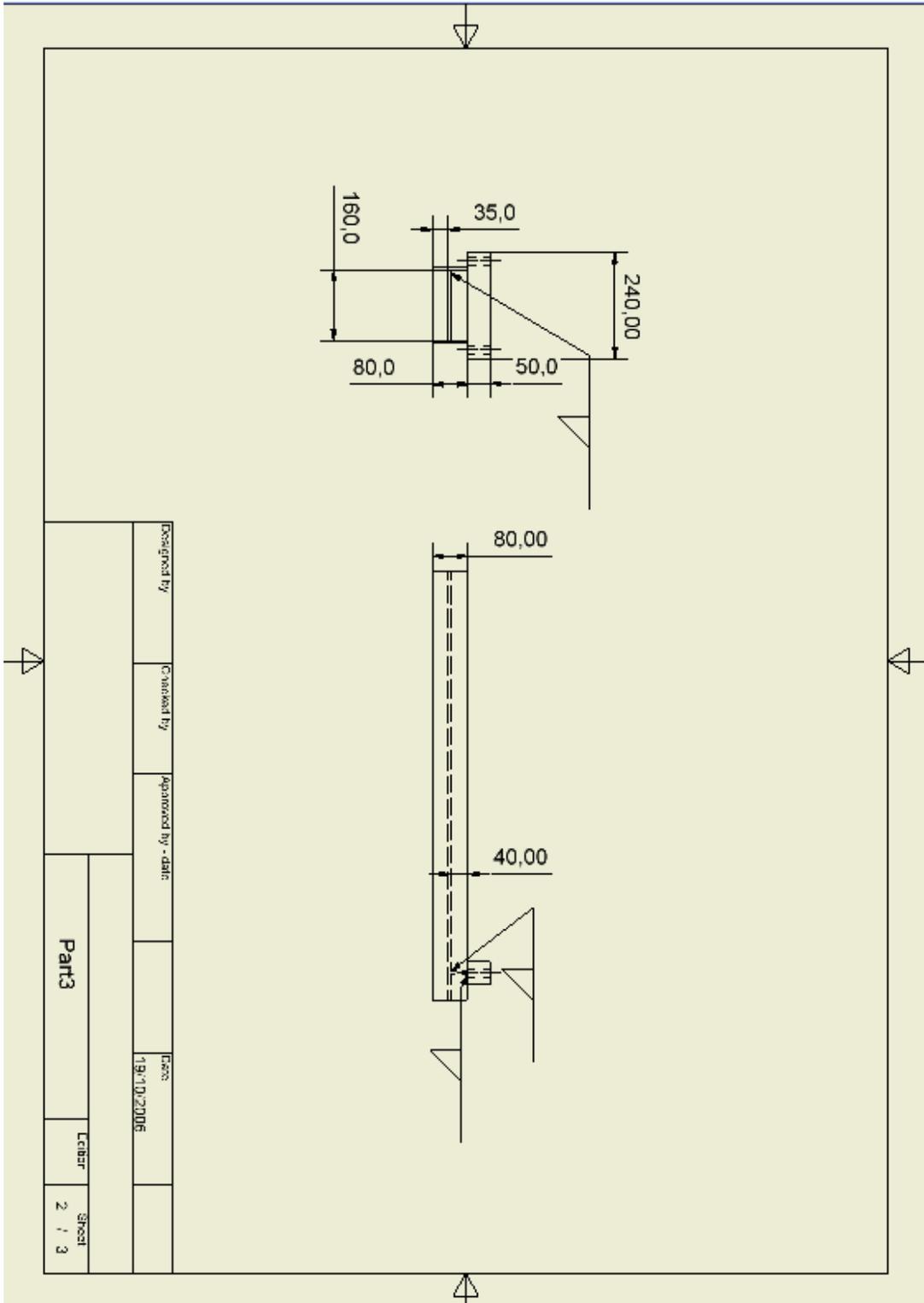


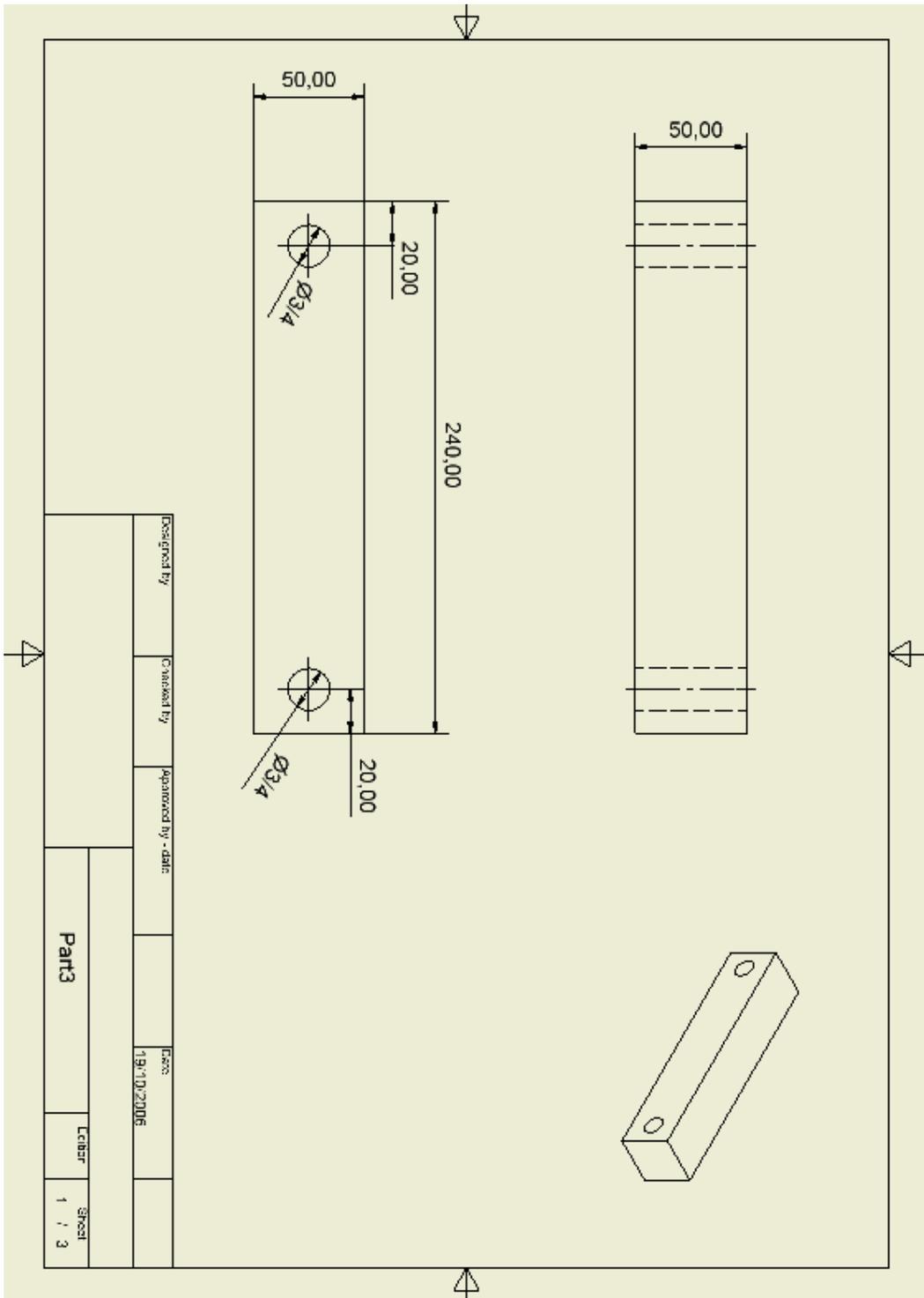
### 9.3 PLANOS DISPOSITIVOS DE MONTAJE







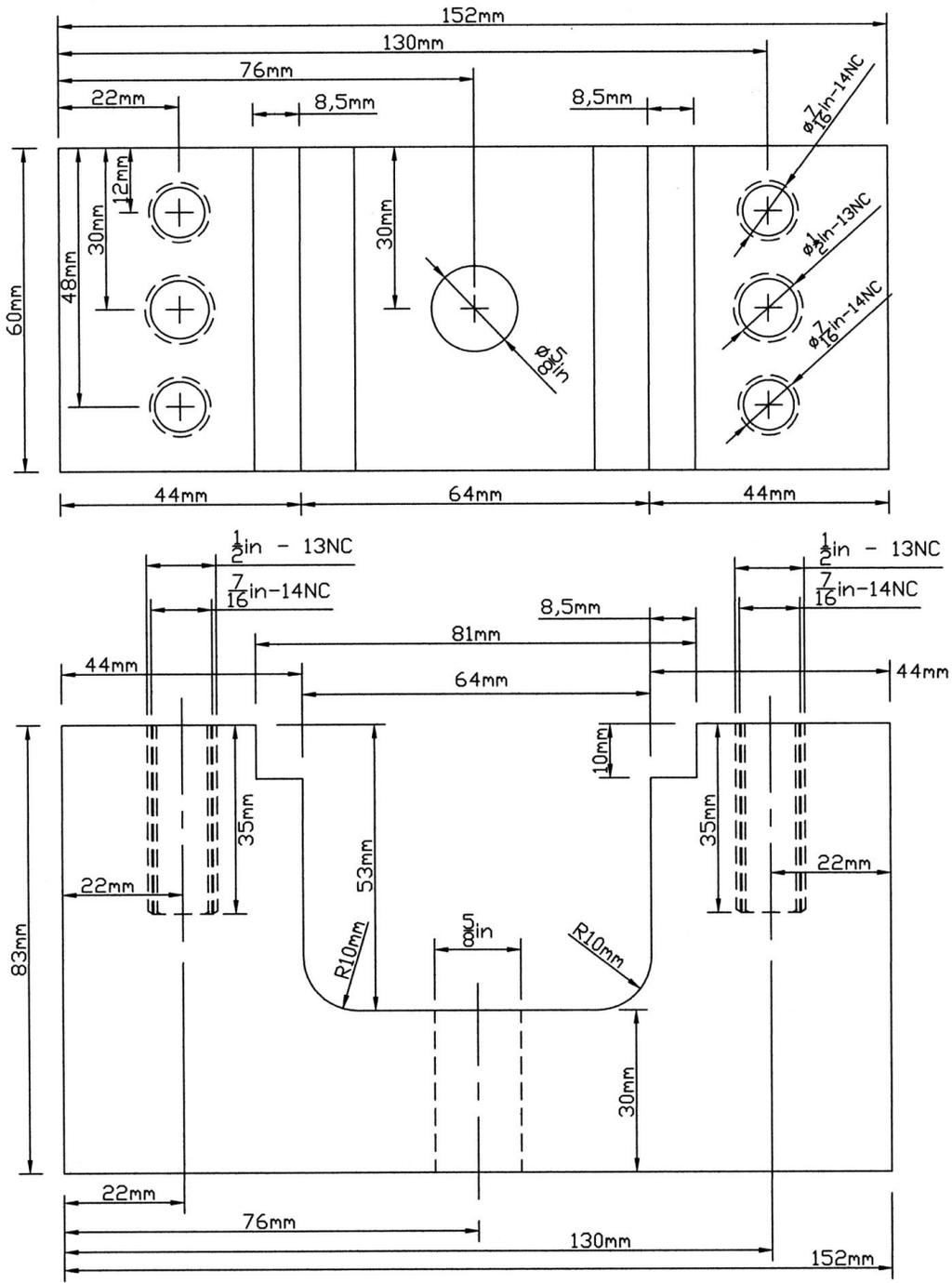






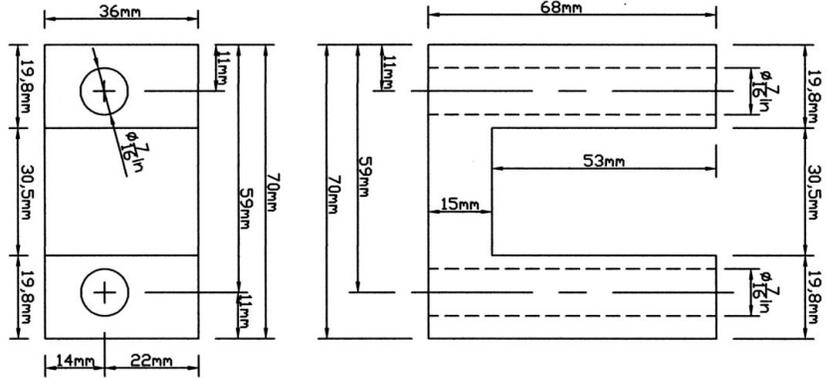
DISPOSITIVO TRIAXIAL SUPERIOR  
 MATERIAL: ACERO AISI-SAE 1020

PIEZA No 0002 - CANTIDAD: 1  
 TOLERANCIA:  $\pm 0.1\text{mm}$

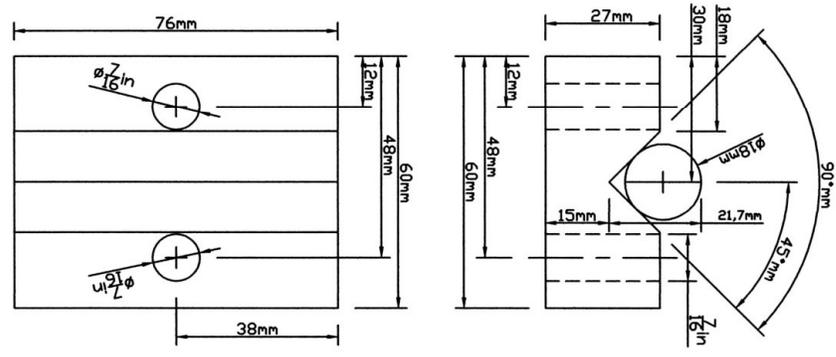


*F. Piedra*

LABORATORIO MECANICA EXPERIMENTAL  
 PROYECTO METRO --- MARZO 27/2006  
 PIEZA No 0004 - CANTIDAD: 2  
 TOLERANCIAS:  $\pm 0.1mm$   
 MORDAZA 1  
 DISPOSITIVO TRIAXIAL INFERIOR  
 MATERIAL: ACERO AISI-SAE 1020



LABORATORIO MECANICA EXPERIMENTAL  
 PROYECTO METRO --- MARZO 27/2006  
 PIEZA No 0005 - CANTIDAD: 4  
 TOLERANCIAS:  $\pm 0.1mm$   
 MORDAZA 2  
 DISPOSITIVO TRIAXIAL INFERIOR  
 MATERIAL: ACERO AISI-SAE 1020



LABORATORIO MECANICA EXPERIMENTAL -- PROYECTO METRO -- MARZO 27/2006  
 CALZO DISP. TRX. INF. BUJE BLANDO PIEZA No 0006 - CANTIDAD: 2  
 MATERIAL: ACERD AISI-SAE 1020 TOLERANCIA:  $\pm 0.1mm$

