

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO GENERADOR DE ONDAS  
ACÚSTICAS POR IMPACTO PARA SU APLICACIÓN EN ADQUISICIÓN  
SÍSMICA**

**OMAR FERNANDO PINTO QUINTERO  
DIEGO FERNANDO RIVERA MONTAGUTH**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO GENERADOR DE ONDAS  
ACÚSTICAS POR IMPACTO PARA SU APLICACIÓN EN ADQUISICIÓN  
SÍSMICA**

**OMAR FERNANDO PINTO QUINTERO  
DIEGO FERNANDO RIVERA MONTAGUTH**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director**

**RICARDO ALFONSO JAIMES  
Ingeniero Mecánico**

**Codirector**

**GERMAN YURY OJEDA BUENO  
Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2009**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Luis y Emma;

A mis hermanos, Hugo y Mónica.

**Omar Fernando Pinto Quintero**

## **DEDICATORIA**

A Dios.

A mis padres Martha y Fernando por su apoyo incondicional.

A mis familiares y amigos.

**Diego Fernando Rivera Montaguth**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ing. Ricardo Jaimes, profesor y director del proyecto; por su colaboración durante el desarrollo de la tesis.

Al Dr. German Ojeda, codirector de proyecto y funcionario de Ecopetrol; por su confianza, apoyo y patrocinio en el transcurso del proyecto.

Al Ing. Alexander Martínez, funcionario de Ecopetrol - ICP; por su ayuda sincera, oportuna y desinteresada.

Al Ing. Danilo Ordóñez, funcionario de Ecopetrol - ICP; por sus aportes en el desarrollo del equipo.

Al Geofísico Andrés E. Calle, funcionario de Ecopetrol – ICP; por su colaboración con el procesamiento de los datos obtenidos en campo.

Al Laboratorio de Sísmica Experimental, conformado por: Maria Teresa Duarte, Carlos Pérez, Julian Vargas, Elkin Hernández; por su colaboración durante la realización de las pruebas de campo.

Al grupo de investigación en Estabilidad de Pozo, por permitirnos desarrollar el proyecto.

**Diego Fernando Rivera Montaguth**  
**Omar Fernando Pinto Quintero.**

## CONTENIDO

	<b>pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	3
<b>1. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO</b>	4
1.1. OBJETIVO GENERAL	4
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	4
<b>2. GENERALIDADES DE LA ADQUISICIÓN SISMICA</b>	<b>6</b>
<b>3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS MODULOS DEL EQUIPO</b>	12
3.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	12
3.2 MÓDULOS DEL EQUIPO	13
<b>4. VALIDACIÓN ANALÍTICA DEL EQUIPO</b>	<b>29</b>
4.1 DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS MÓDULOS DEL EQUIPO	29
4.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR ELEMENTOS FINITOS (FEA)	36
<b>5. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL EQUIPO</b>	48

<b>6. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN CAMPO</b>	59
6.1 ADQUISICIÓN SÍSMICA, OCTUBRE 01 DE 2008	59
6.2 ADQUISICIÓN SÍSMICA, OCTUBRE 08 DE 2008	64
6.3 ADQUISICIÓN SÍSMICA, NOVIEMBRE 05 DE 2008	66
6.4 PRUEBA REBOTE, DICIEMBRE 17 DE 2008	68
6.5 ADQUISICIÓN SÍSMICA, ABRIL 07 DE 2009	71
<b>7. ESPECIFICACIONES GENERALES DEL EQUIPO</b>	80
7.1 FICHA TÉCNICA	80
7.2 MÓDULOS DEL EQUIPO	80
7.3 ENSAMBLE DEL EQUIPO	87
7.4 PROTOCOLO DE OPERACIÓN DEL EQUIPO	95
7.5 PROTOCOLO DE MANTENIMIENTO DEL EQUIPO	97

## **CONCLUSIONES**

## **RECOMENDACIONES**

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Sistema de adquisición de datos sísmicos	7
Figura 2. Fuentes que generan ondas acústicas	7
Figura 3. Tránsito de las ondas acústicas por el subsuelo	8
Figura 4. (a) Porra. (b) Platina	9
Figura 5. (a) Arreglo geométrico (b) Adquisición sísmica realizada en el ICP	10
Figura 6. Módulos del equipo	14
Figura 7. Componentes principales del equipo	15
Figura 8. Esquema del trípode	16
Figura 9. Esquema de la unión inferior	17
Figura 10. Sistema de elevación (polea diferencial)	18
Figura 11. Esquema de la unión superior	20
Figura 12. Resortes de potencia	21
Figura 13. Detalle de resorte de potencia	23
Figura 14. Esquema del Martillo. (a) Conexión. (b) Disco	24
Figura 15. Vista superior del sistema de disparo	25
Figura 16. Pasador del martillo montado sobre la palanca principal	26
Figura 17. Tope de contacto entre palancas principal y secundaria	26
Figura 18. Distancias en las palancas principal y secundaria	28
Figura 19. Aplicación de cargas - Unión superior	37
Figura 20. Deformación total - Unión superior	38
Figura 21. Esfuerzo equivalente – Unión superior	38
Figura 22. Factor de seguridad - Unión superior	39
Figura 23. Aplicación de cargas – Unión inferior	40

Figura 24. Deformación total – Unión inferior	40
Figura 25. Esfuerzo equivalente – Unión inferior	41
Figura 26. Factor de seguridad – Unión inferior	41
Figura 27. Aplicación de cargas – Pata superior	42
Figura 28. Deformación total – Pata superior	43
Figura 29. Esfuerzo equivalente – Pata superior	43
Figura 30. Factor de seguridad – Pata superior	44
Figura 31. Aplicación de cargas – Sistema de disparo	45
Figura 32. Deformación total – Sistema de disparo	46
Figura 33. Esfuerzo equivalente – Sistema de disparo	46
Figura 34. Factor de seguridad – Sistema de disparo	47
Figura 35. (a) Soldadura aplicada a las patas superiores	
(b) Corte de la pata superior en la segueta eléctrica	49
Figura 36. Construcción del módulo de unión inferior	49
Figura 37. Ensamble de patas superiores y unión inferior	50
Figura 38. (a) Platinas de unión de patas y unión superior	
(b) Unión superior sin platinas soldadas	
(c) Ensamble entre patas y unión superior	50
Figura 39. Trípode ensamblado	51
Figura 40. (a) Pata inferior	
(b) Patas inferiores insertadas en las superiores	51
Figura 41. (a) Patas superior e inferior insertadas	
(b) Ensamble unión superior y patas	52
Figura 42. (a) y (b) Unión superior y elemento de sujeción en U.	
(c) Diferencial.	
(d) Ensamble de unión superior con todas sus partes	52
Figura 43. (a) Martillo	
(b) Resortes para utilizarlos en paralelo	53
Figura 44. Ensamble parcial del equipo	53

Figura 45. (a) Palanca principal. (b) Palanca secundaria (c) Barra de apoyo. (d) Soporte	54
Figura 46. Módulo del sistema de disparo	55
Figura 47. (a) y (c) Equipo descargado. (b) Equipo cargado	55
Figura 48. Empaque y soportes en unión inferior	56
Figura 49. (a) y (b) Patas inferiores. (c) y (d) Anclaje	56
Figura 50. Pretensionamiento para rebote	57
Figura 51. (a) Conjunto con resortes a tensión (b) Detalle de resortes a tensión	58
Figura 52. Prueba cancha de Softbol -UIS	59
Figura 53. Apilado de los disparos	60
Figura 54. Soporte del resorte	61
Figura 55. Arreglos unión inferior	61
Figura 56. (a) Conjunto del equipo (b) Dinámica del equipo al ser disparado	62
Figura 57. Amortiguación de las patas	62
Figura 58. (a) Estacas (b) Pata inferior con agujero para estaca	63
Figura 59. Comparación entre fuentes	63
Figura 60. (a) Imagen de apilado (b) Rebote del martillo	64
Figura 61. (a) Conjunto equipo (b) Impacto. (c) y (d) Rebotes	65
Figura 62. Montaje del martillo pre-tensionado	66
Figura 63. (a) Cancha Softbol UIS. (b) Resorte pata (c) Equipo. (d) Pretensionamiento	66
Figura 64. Rebote del martillo	67
Figura 65. (a) Conjunto con resortes a tensión (b) Detalle de resortes a tensión	68



Figura 88. Barra de apoyo	84
Figura 89. Sistema de disparo. (a) y (b) Piezas (c) y (d) Ensamble	84
Figura 90. (a) Martillo. (b) Detalle 1. (c) Detalle2	84
Figura 91. Resortes	85
Figura 92. Soportes de resortes	85
Figura 93. Elemento de sujeción en U	85
Figura 94. (a) Diferencial. (b) Detalle de la diferencial	86
Figura 95. Pasador 2510	86
Figura 96. Resortes a tensión	86
Figura 97. Ensamble patas superiores - unión superior	87
Figura 98. Ensamble patas superiores con inferiores	88
Figura 99. Trípode	88
Figura 100. Ensamble patas superiores - unión inferior	89
Figura 101. Partes sistema de disparo	89
Figura 102. Ensamble sistema de disparo	89
Figura 103. (a) Sistema de disparo en el equipo (b) Sujeción del sistema de disparo en el equipo	90
Figura 104. Resortes insertados en el martillo	90
Figura 105. Ensamble martillo y resortes en equipo	91
Figura 106. (a) Soporte resortes (c) y (d) Soportes en el equipo	91
Figura 107. (a) Elemento sujeción, arandelas y tuercas (b), (c) y (d) Ensamble unión superior-sujeción en U	92
Figura 108. Diferencial ubicada en el equipo	92
Figura 109. (a) Pasador 2510. (b) y (c) Pasador insertado en el martillo	93

Figura 110. Resortes a tensión colgados de la unión inferior	93
Figura 111. Inclinación de la palanca principal para el ascenso martillo	94
Figura 112. Resortes a tensión enganchados al martillo	94
Figura 113. Equipo ensamblado	95

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Energía entregada por un hombre con una porra	22
Tabla 2. Cálculo de la constante del resorte	22
Tabla 3. Dimensiones resortes	23
Tabla 4. Estimación fuerza de accionamiento, sistema de disparo	28
Tabla 5. Cálculo por pandeo de la pata superior	30
Tabla 6. Cálculo por flexión del perfil en "L"	31
Tabla 7. Cálculo por flexión de palanca principal	33
Tabla 8. Cálculo por pandeo, Soporte-Sistema de disparo	34
Tabla 9. Cálculo por pandeo, Soporte-Palanca principal	35
Tabla 10. Cálculo a tensión, extremo del martillo	36
Tabla 11. Ficha técnica del equipo	80

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
Anexo A. Determinación de la constante elástica de los resortes	104
Anexo B. Análisis Estructural por Elementos Finitos	110
Anexo C. Planos	135
Anexo D. Paper	142
Anexo E. Especificaciones equipo de adquisición de datos	154

## NOMENCLATURA O GLOSARIO

### NOTACIÓN

P	Carga, Kg
A	Área transversal, m <sup>2</sup>
K	Radio de giro, m
(L/K)	Razón de esbeltez
C	Apoyo tipo Pasador-Pasador
E	Módulo de elasticidad
N	Factor de seguridad
Sy	Esfuerzo de fluencia, Kg/m <sup>2</sup>
M	Momento de flector máximo, Kg.m
c	Distancia al eje neutro
I	Momento de inercia, m <sup>4</sup>
L <sub>1</sub>	Diámetro mayor del martillo, m
L <sub>2</sub>	Diámetro del pasador, m
g	Gravedad
	. . . . .
	. . . . .

### LETRAS GRIEGAS

$\mu$	Coeficiente de fricción
$\sigma$	Esfuerzo de trabajo, Kg/m <sup>2</sup>
$\sigma_{adm}$	Esfuerzo admisible, Kg/m <sup>2</sup>
	. . . . .

## RESUMEN

**TÍTULO:**  
**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO GENERADOR DE ONDAS ACÚSTICAS POR IMPACTO PARA SU APLICACIÓN EN ADQUISICIÓN SÍSMICA \***

**AUTORES:**  
Diego Fernando Rivera Montaguth.  
Omar Fernando Pinto Quintero. \*\*

**PALABRAS CLAVES:**  
Sísmica, Generador de ondas, Impacto.

### **DESCRIPCIÓN:**

El objetivo de este proyecto es el diseño y construcción de un equipo generador de ondas acústicas por impacto para su aplicación en adquisición sísmica en estratos someros. Dicha idea surge de la necesidad de reemplazar en las adquisiciones sísmicas someras llevadas a cabo en el ICP, la utilización de una maza ó porra (con la cual se impacta un plato ó disco metálico situado sobre la superficie de la tierra con el fin de generar ondas acústicas que viajen por las capas estratigráficas del subsuelo) por un equipo que impacte la superficie de la tierra.

Se construyó el equipo, debido a que en una adquisición sísmica se pueden dar de doscientos (200) a trescientos (300) impactos/día aproximadamente, trabajo que realizaría una persona o un grupo de personas (variando la intensidad del impacto), al mismo tiempo se busca que el impacto tenga la misma intensidad en toda la prueba, también se busca que la masa que impacte el disco de metal lo haga siempre en el centro de éste debido a que aquí se propaga la mayor energía de impacto que después se transforma en ondas acústicas.

Con este equipo se realizó una prueba de campo, la cual consistió en generar y comparar una línea sísmica obtenida con porra con la misma línea sísmica pero obtenida con el equipo.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Ing. Ricardo Jaimes. Ph.D German Ojeda.

## SUMMARY

### TITLE:

**DESIGN AND BUILDING OF AN ACOUSTIC WAVE GENERATOR DEVICE BY IMPACT TO ITS APPLICATION IN SEISMIC ACQUISITION**\*

### AUTHORS:

Diego Fernando Rivera Montaguth.  
Omar Fernando Pinto Quintero.\*\*

### KEY WORDS:

Seismic, Wave generator, Impact

### DESCRIPTION:

The goal of this Project is to design and built an acoustic wave generator device by impact to its application in seismic acquisition for near surface. This idea comes from the necessity of replacing the seismic acquisition done in the ICP, the use of a weight (with this weight a metallic disc is impacted, the disc is placed on the surface of the earth with the goal of generating acoustic waves that travels through the stratigraphic layers of the subsoil) by a device that impact the surface of the earth.

The device was built due to the fact that in seismic acquisition can be obtained from 200 to 300 impacts/day roughly, this work would be done by a person or a group of people (varying the impact intensity), also the device impact energy is 4 times the generated by a single person, at the same time is required that the impact has the same intensity during the test, it also important that the weight always impacts the metal disc on the center of this with the goal of spreading the biggest impact energy which will be transform in acoustic waves.

With this device a field test was developed in order to compare a seismic line obtained with a hammer and a seismic line obtained with the device.

---

\* Senior Thesis

\*\* Physic-Mechanical Engineering Faculty, *School of Mechanical Engineering*, Eng. Ricardo Jaimes. Ph.D German Ojeda

## INTRODUCCIÓN

La sísmica, como herramienta fundamental en la exploración y producción de hidrocarburos, se ha posicionado de manera importante en la etapa inicial de todo proyecto relacionado con la industria del petróleo a nivel mundial.

La sísmica como rama de la geofísica, ubica y estudia las formaciones subterráneas para la localización de hidrocarburos, las cuales son descritas en mapas por medio de medidas de tiempo hechas por ondas acústicas (transmitidas en pulsos o a una determinada frecuencia), generados en la superficie de la tierra por explosiones con dinamita, impactos mecánicos (pulsos) o vibraciones (generación de impactos a una frecuencia determinada), las cuales regresan a la superficie de la tierra después de ser reflejadas y refractadas desde interfaces entre formaciones que tienen diferentes propiedades físicas. Estas reflexiones y refracciones son grabadas por instrumentos que detectan movimientos de la tierra (geófonos), estos instrumentos son puestos en la superficie de la tierra a diferentes distancias desde el punto de disparo de las ondas y después son comunicados a un mismo punto donde la información es captada y guardada para su procesamiento y estudio. Las variaciones en los tiempos de reflexión y refracción de las ondas desde el subsuelo hasta la superficie de la tierra, indican características estructurales de las capas subterráneas, así como sus profundidades.

Teniendo como objetivo principal el diseño y construcción de un equipo generador de ondas acústicas por medio de impacto, inicialmente se optó por identificar alternativas de diseño que dieran solución al problema. Al seleccionar esta alternativa se propuso, estableció y diseñó un equipo. Este equipo, inicialmente fue propuesto en borradores y después de darle forma,

fueron seleccionados y calculados todos sus componentes. El siguiente paso fue hacer un análisis estructural por medio de elementos finitos para observar su respuesta al aplicarle las cargas de trabajo. Seguidamente se construyó el equipo y después se realizaron pruebas para ver su funcionamiento. Al llevar a cabo estas pruebas, se hicieron algunos cambios al equipo, los cuales garantizaron el buen funcionamiento. Después de haber superado estos inconvenientes, el equipo fue llevado a campo.

La prueba de campo, consistió generar y comparar una línea sísmica obtenida con porra con la misma línea sísmica pero obtenida con el equipo.

## **JUSTIFICACIÓN**

Con el objetivo de contribuir con la calidad de las adquisiciones sísmicas realizadas por el laboratorio de Sísmica Experimental del ICP, este trabajo de grado da inicio a un proceso investigativo enfocado en la generación de ondas acústicas, por medio de la cual se busca reemplazar a la persona que genere estos impactos por un equipo que cumpla con esta labor.

La necesidad de la construcción de este equipo, surge por el cansancio físico en la persona generado por la cantidad de golpes para llevar a cabo una tarea de adquisición, también para aumentar la energía de impacto y llegar a profundidades mayores en el subsuelo, así como la necesidad de obtener registros de buena calidad, dependiendo estos de una energía de impacto constante en todos los disparos, además algo muy relevante es que el impacto sea dado en el centro del disco metálico debido a que en este punto se transmitirá la mayor cantidad de energía al suelo (situación que no sucederá si se golpea un borde del disco metálico, que es lo que normalmente ocurre por cansancio al realizar el impacto una persona con una porra).

## 1. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

### Objetivos Generales

- ✓ Continuar con la misión de la Universidad Industrial de Santander de atender y dar solución a las necesidades de la industria local y nacional, estrechando el vínculo Universidad – Industria creando relaciones que trasciendan las fronteras entre las regiones de nuestro país.
- ✓ Diseñar y construir un equipo que genere ondas acústicas que viajen a través de las capas estratigráficas del subsuelo, garantizando que la energía de las ondas acústicas, brinde información suficiente y adecuada para la interpretación de la imagen sísmica.

### Objetivos Específicos

- ✓ Diseñar un equipo con las siguientes características:
  - Genere ondas acústicas mediante la utilización de energía de impacto, producida por el choque entre una masa que se desplace entre un rango de velocidades máximas de 7 – 12 m/s (25-43 km/h aprox.) y una platina (ó disco) de metal ubicada en la superficie de la tierra.
  - Sea operado manualmente y que no dependa de fuentes de energía convencional (eléctrica, motores de combustión, etc.) para su funcionamiento.

- Sea modular, garantizando un peso por modulo inferior a los 30 kg, facilitando de esta manera al operario el transporte e instalación del equipo.
  - El peso total del equipo debe ser inferior a 100 kg.
- 
- ✓ La energía de impacto generada por el equipo debe ser como mínimo cuatro veces la energía obtenida por el golpe de una persona con un martillo de 18 libras.
  - ✓ Buscar que el impacto entre la masa y la platina (disco) ubicada en el suelo se realice en un único instante de tiempo, evitando de esta manera el rebote de la masa, el cual genera una señal no deseada que disminuye la calidad de la imagen sísmica.
  - ✓ Realizar un análisis estructural del equipo mediante la técnica de elementos finitos, cuando es sometido a su carga máxima de trabajo, para localizar sus puntos críticos y proponer alternativas de optimización estructural (por ejemplo, disminución del peso) en caso de ser necesario.
  - ✓ La energía de impacto debe ser constante en todos los puntos de disparo propuestos en la adquisición sísmica.
  - ✓ Elaborar la ficha técnica del equipo, así como el protocolo de prueba, operación y mantenimiento para verificar y registrar parámetros de diseño como peso, ensamblaje, energía entregada, entre otros.
  - ✓ Contribuir a la elaboración de un artículo en donde se muestre el aporte realizado por el equipo en dicha adquisición sísmica.

## 2. GENERALIDADES DE LA ADQUISICIÓN SISMICA

La adquisición sísmica busca emplear los principios físicos de reflexión y refracción, para determinar la disposición y tipo de rocas bajo la superficie de la tierra; esto con el fin de predecir y ubicar la presencia ó ausencia de hidrocarburos, “morfologías del subsuelo, estado de compactación y fracturación de los materiales, medición de parámetros para la ingeniería y geotécnia, etc.”<sup>1</sup>.

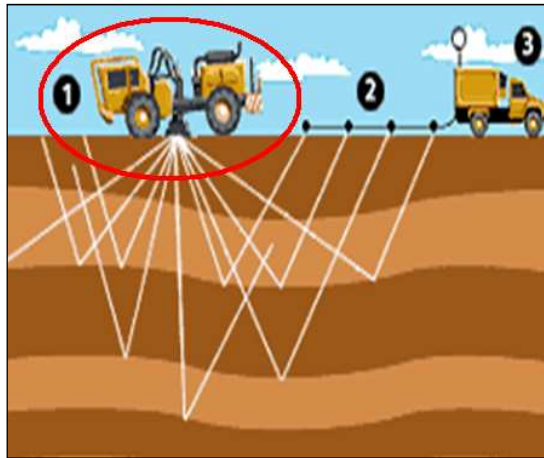
Las adquisiciones sísmicas (ver Figura 1), constan principalmente de:

1. Fuente que emite energía a la tierra
2. Geófonos, los cuales son sensores que captan las ondas que viajan por el subsuelo.
3. Sistema que almacena los datos. A este sistema van conectados todos los geófonos, los cuales entregan la información que es posteriormente guardada.

El proyecto de grado, estará dirigido principal y únicamente al desarrollo de una fuente que descarga energía a la superficie de la tierra (ver Figura 1. Zona resaltada por el círculo en rojo).

---

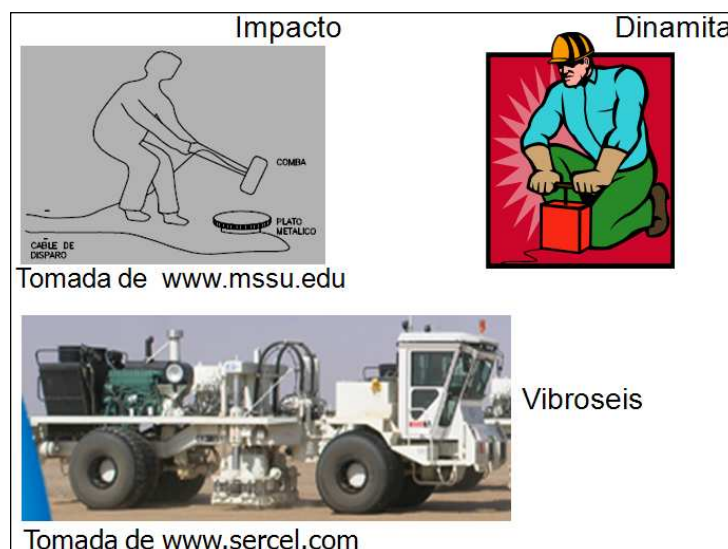
<sup>1</sup> <http://www.ugr.es/~geofisic/sismica/sismica.html>



**Figura 1.** Sistema de adquisición de datos sísmicos  
(Tomada de [www.mssu.edu](http://www.mssu.edu))

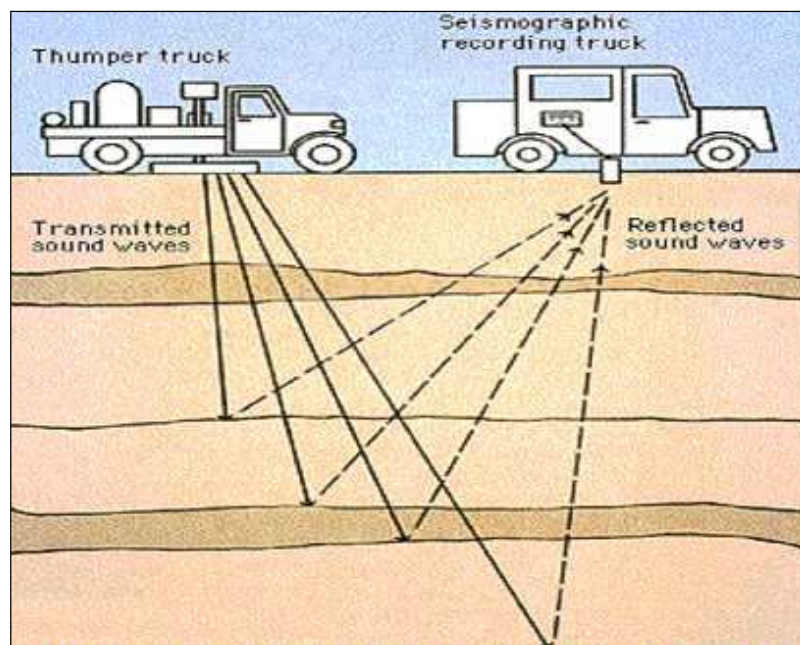
Por lo general, las fuentes de energía utilizadas para generar y transmitir ondas acústicas (ver Figura 2) en el subsuelo son principalmente:

- ✓ Impactos mecánicos (Thumper)
- ✓ Dinamita
- ✓ Impactos con vehículos a una determinada frecuencia (Vibroseis)



**Figura 2.** Fuentes que generan ondas acústicas

Al momento de generar el impacto sobre la superficie de la tierra, se crean ondas acústicas que pasan a través del subsuelo. Las ondas acústicas son reflejadas y refractadas (ver Figura 3) por discontinuidades presentadas en estas rocas, éstas viajan con velocidades que dependen de las propiedades físicas de las rocas y dependiendo de estas velocidades los geofísicos determinan las capas subterráneas, su espesor, composición, profundidad a las que se encuentran, etc.



**Figura 3.** Tránsito de las ondas acústicas por el subsuelo

Tomada de [www.geomore.com](http://www.geomore.com)

Para llevar a cabo las adquisiciones sísmicas, el método más usual y tradicional es generar las ondas acústicas mediante el impacto de una porra (maza) de 18 libras de peso (ver Figura 4) contra una platina de metal, este impacto es realizado por una persona.

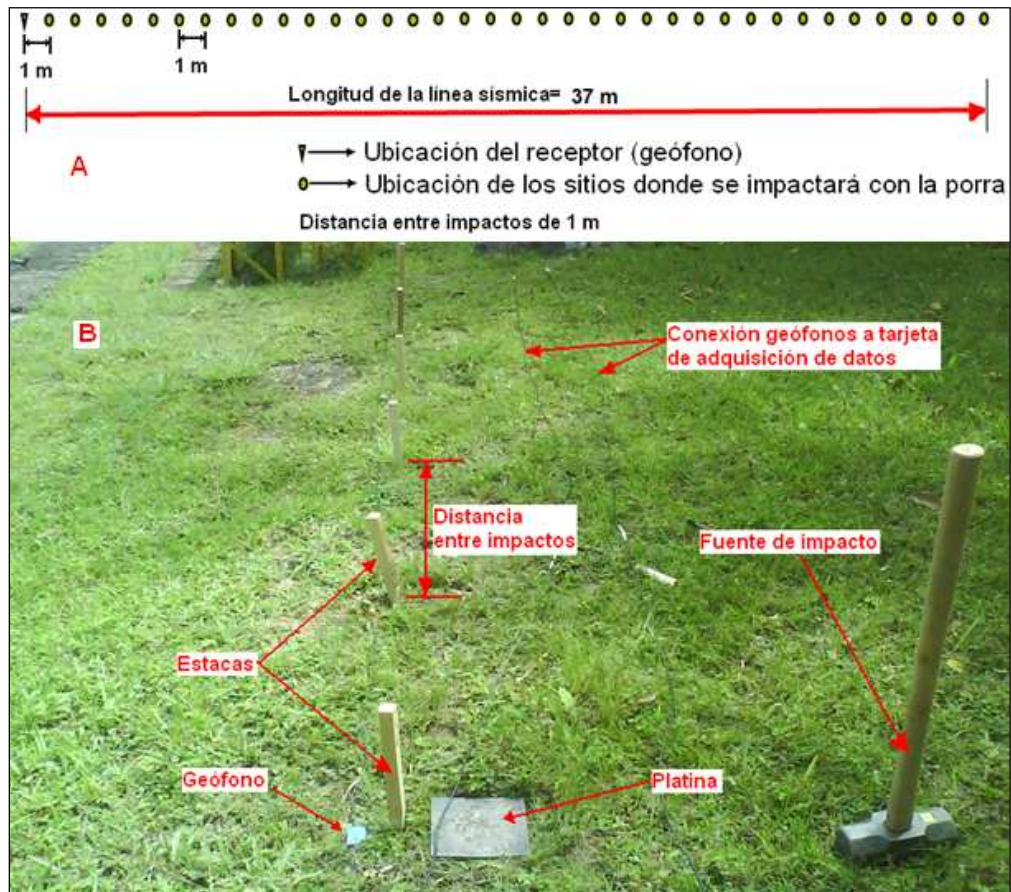


**Figura 4.** (a) Porra. (b) Platina

Antes de empezar a realizar los impactos, se debe planificar los siguientes aspectos: La ubicación de los puntos donde se va a ejecutar la adquisición sísmica, el número de impactos a realizar, la distancia entre estos, la distancia total recorrida para los impactos (línea trazada para la adquisición), y el número y ubicación de los geófonos (ver Figura 5. (a)). A toda esta planificación se le conoce como arreglo geométrico y ésta es diseñada por un geofísico. Los círculos en la figura 5A, muestran los lugares en donde se va a golpear la platina con la porra, es decir, en cada círculo se da un disparo o golpe con porra y se avanza al siguiente punto planteado según el arreglo geométrico.

La Figura 5. (b), muestra el arreglo geométrico de una adquisición sísmica realiza en las instalaciones del ICP, en la cual se pueden observar los diferentes elementos utilizados para dicha adquisición, entre estos se encuentra el receptor ó geófono, la porra, la platina, los cables que

comunican el receptor con la tarjeta de adquisición de datos y las estacas que indican la ubicación de los impactos.



**Figura 5.** (a) Arreglo geométrico  
(b) Adquisición sísmica realizada en el ICP

En la práctica, las adquisiciones sísmicas someras (con alcance de las ondas acústicas inferiores a los 600 m de profundidad aprox.) son realizadas con el objetivo de obtener los tipos de capas estratigráficas encontrados en el subsuelo, así como sus espesores y composición, los cuales son determinados por variaciones de las velocidades en el subsuelo.

Las adquisiciones más triviales, son realizadas con la energía de impacto que genera una persona al golpear con una porra (maza) un disco de metal ubicado sobre la superficie de la tierra (esto con el fin de transmitir la mayor cantidad de energía de impacto al suelo), con un promedio de 300-400 disparos/día (golpes/día). Esta cantidad de disparos crea la necesidad de diseñar un equipo que reemplace el trabajo de la persona que produce los impactos con dicha porra.

### **3. DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS MÓDULOS DEL EQUIPO**

#### **3.1 DETERMINACION DE PARAMETROS Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO**

La alternativa de diseño seleccionada consiste de un sistema que genera un impacto en la superficie de la tierra, produciendo de esta manera ondas acústicas que viajan a través del subsuelo. Este impacto se lleva a cabo por medio de una masa que golpea una platina de metal, de modo que se transfiriera la mayor cantidad de energía a la tierra.

En esta alternativa seleccionada, la energía necesaria para el impacto es entregada por un resorte, el cual al comprimirse, acumula energía suficiente para impulsar la masa que genera el impacto en la tierra, esta fuente elástica se comprime manualmente con la ayuda de una polea diferencial. Además, la configuración de este diseño permite la adaptación de módulos, los cuales ayudan a tener una mejor portabilidad, bajo peso y fácil instalación en campo.

Para el diseño del equipo se tuvieron en cuenta algunos requerimientos generales tales como:

- ✓ Portabilidad (no robusto, bajo peso), para facilitar su traslado por zonas donde no se tenga acceso vehicular.
- ✓ Modular, para que el equipo sea fácilmente transportable y de fácil instalación en el lugar de operación.
- ✓ Ensamblaje de módulos sencillo y rápido, para que la armada y desarmada del equipo sea llevada a cabo en el menor tiempo posible.

- ✓ No dependa de fuentes convencionales de energía (eléctrica, química, solar, etc.), con el fin de no depender de generadores ni acumuladores de energía.
- ✓ Sea operado manualmente.
- ✓ Sea económico.

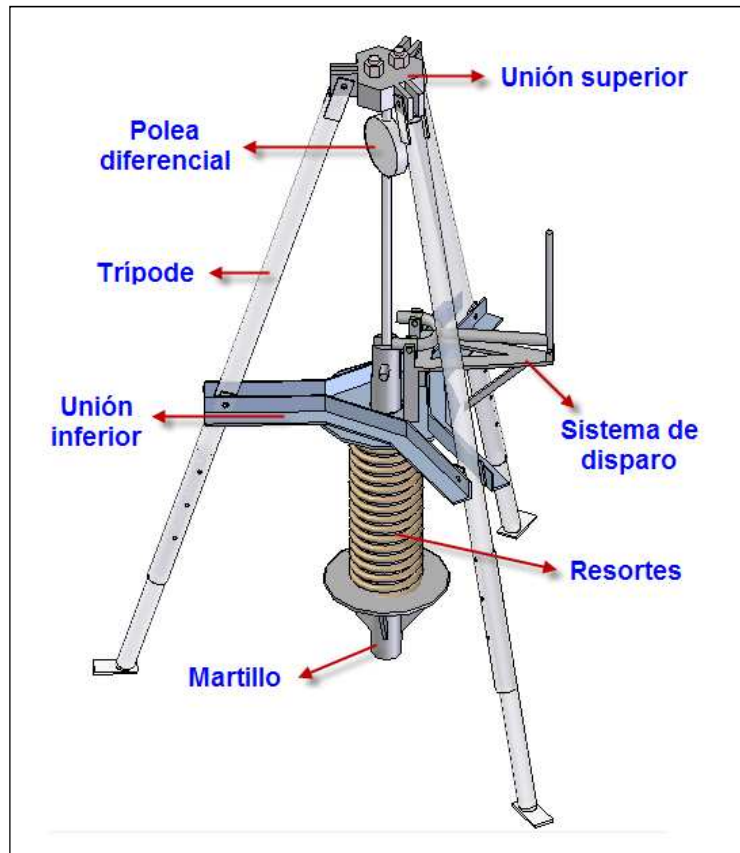
También se tuvieron en cuenta algunos requerimientos particulares como son:

- ✓ El peso total del equipo fuera inferior a 100 kg.
- ✓ La energía de impacto generada por el equipo debió ser cuatro veces la energía obtenida por el golpe de una persona con un martillo de 18 libras.
- ✓ La energía de impacto tuvo que ser constante en todos los puntos de disparo propuestos en la adquisición sísmica.

### **3.2 MÓDULOS DEL EQUIPO**

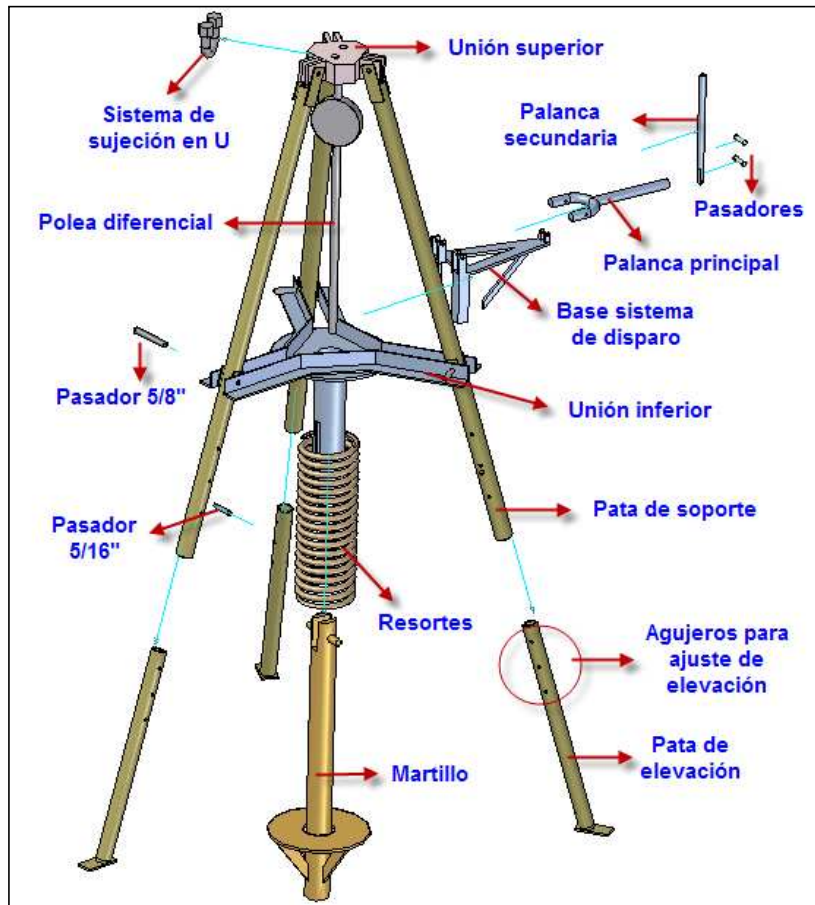
A continuación se describen los módulos del equipo mencionando la función que cumple cada uno y los parámetros que se tuvieron en cuenta para hacer el dimensionamiento de cada una de sus elementos.

Los módulos que conforman el equipo son los siguientes: Trípode, unión inferior, unión superior, sistema de elevación, resortes, martillo y sistema de disparo. (Ver Figura 6).



**Figura 6.** Módulos del equipo

Los módulos cuentan con otros elementos que en su totalidad permiten ensamblar y operar adecuadamente el equipo (Ver Figura 7).

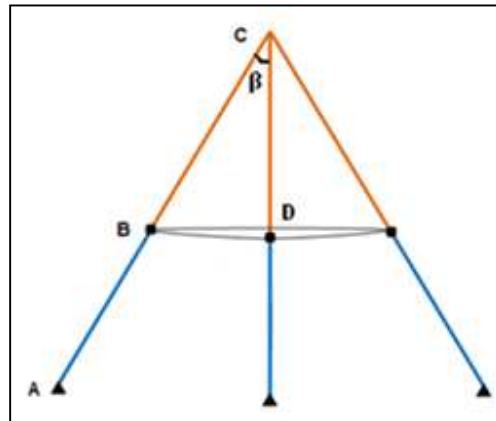


**Figura 7.** Componentes principales del equipo

### 3.2.1 Módulo de Trípode

Se decidió utilizar un sistema de patas en trípode principalmente por su portabilidad y facilidad para ser transportado de un lugar a otro, además de que este sistema ofrece una buena estabilidad con pocos componentes. El módulo está dividido en dos secciones, la sección de soporte (ver figura 8, elemento B-C) y la sección de elevación (ver figura 8, elemento A-B). La primera se encarga de resistir una carga de compresión axial producida por la fuerza de los resortes a la hora de realizar el disparo, y la segunda sección, la de elevación, permite ajustar la altura de cada pata de manera

que se pueda adecuar el equipo a una posición horizontal cuando se utiliza sobre terrenos inclinados o con irregularidades.



**Figura 8.** Esquema del trípode

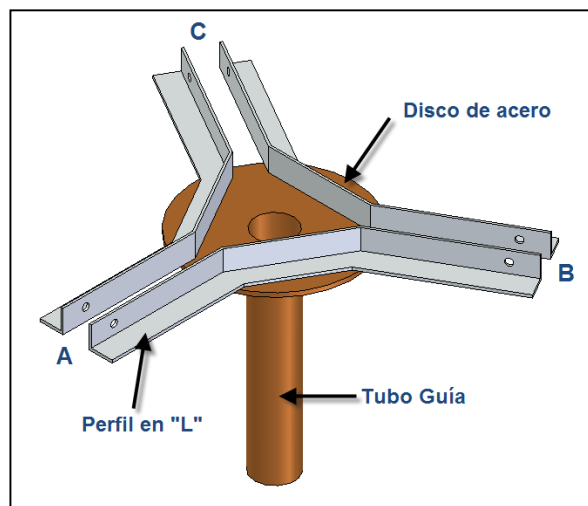
### 3.2.1.1 Dimensionamiento

La altura vertical entre los puntos C y D de la Figura 8, se adecuó de tal manera que los elementos que van en esta zona, tuvieran el espacio suficiente para su correcta instalación y funcionamiento. Estos elementos son los siguientes: Polea diferencial y sistema de disparo. La distancia entre los puntos C y D, es de 91 cm. La barra a compresión de la sección de soporte (ver figura 8), cuenta con dos agujeros en los puntos B y C en los cuales van ubicados los pasadores que permiten el ensamble del equipo, la distancia entre estos puntos es de 95 cm y la longitud total de la barra es de 1,2 m.

Las patas de elevación tienen una longitud de 67 cm y cuentan con 4 agujeros en uno de sus extremos separados una distancia de 4 cm. Estos agujeros son los que permiten el ajuste de la altura del equipo.

### 3.2.2 Módulo de Unión Inferior

Este módulo consiste de un disco de acero estructural ubicado a la altura del punto B (ver Figura 8), sobre la cual se encuentran montados tres perfiles en "L" que sirven como brazos para conectar este módulo con el trípode (ver Figura 9). En la parte inferior del disco se encuentra soldado un tubo, el cual sirve como guía para el movimiento del martillo una vez es realizado el disparado y además permite la instalación de los resortes ubicándolos concéntricamente con el tubo guía (ver Figura 9).



**Figura 9.** Esquema de la unión inferior

#### 3.2.2.1 Dimensionamiento

La unión de los puntos A, B y C forman un triángulo equilátero de 60 cm por lado (ver Figura 9), esta distancia fue determinada debido a la necesidad de asegurar un ángulo  $\beta$  adecuado (ver Figura 8) que permita una correcta

estabilidad del equipo, además de asegurar el espacio suficiente para la instalación y funcionamiento del sistema de disparo.

El disco de acero tiene un diámetro de 36 cm, espacio suficiente para montar y asegurar los perfiles en “L”; además, el tubo guía cuenta con una longitud de 28 cm, la cual es la distancia máxima permitida para evitar interferencias con el disco soldado al martillo.

### 3.2.3 Módulo del sistema de elevación

Este módulo consiste de un elemento mecánico llamado polea diferencial (ver Figura 10) la cual se compone de dos poleas de distinto radio caladas sobre el mismo eje y recibe esta denominación porque la potencia necesaria para elevar el peso es proporcional a la diferencia entre dichos radios.

La máxima carga que debe ejercer la polea diferencial, es la fuerza de compresión ejercida por los resortes (1720 kg). Con esta carga ya establecida se procedió para la compra del elemento mecánico, de marca UYUSTOOL y con capacidad nominal para 2 toneladas.



**Figura 10.** Sistema de elevación (polea diferencial)

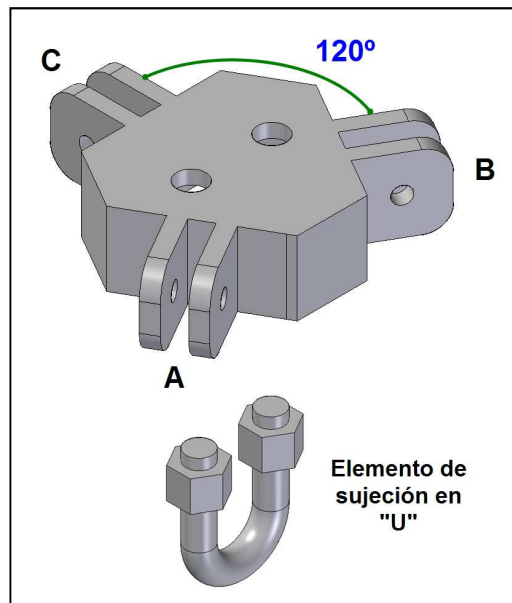
### **3.2.3.1 Dimensionamiento**

La polea diferencial adquirida tenía una longitud de cadena de 3 m, debido al poco espacio de operación con el que se cuenta en la sección vertical de los puntos B y D (ver Figura 8), se recortó la extensión de la cadena a 1.3 m; esta distancia es suficiente para asegurar una compresión adecuada de los resortes sin afectar de ninguna manera el normal funcionamiento de la polea. Los ganchos de sujeción tienen un diámetro de 10 cm y el cuerpo principal de la polea tiene un diámetro máximo de 14 cm.

### **3.2.4 Módulo de Unión Superior**

Este módulo es una caja triangular hueca de acero estructural, con 3 pares de orejas soldadas cada  $120^\circ$  (ver Figura 11) y se encuentra ubicado en el punto C de la Figura 8.

La función principal es la de soportar la carga de la polea diferencial, la cual, se encuentra sostenida por un elemento de sujeción en U (ver Figura 11). Este elemento de sujeción se introduce dentro de dos agujeros en la cara superior de la unión (ver Figura 11) donde la fuerza de compresión de los resortes se transmite hacia las orejas soldadas. Otra función importante de este elemento es la de permitir la conexión de las barras a compresión mediante pasadores en los agujeros de los puntos A, B y C (ver figura 11) brindando de esta manera una adecuada estabilidad al equipo.



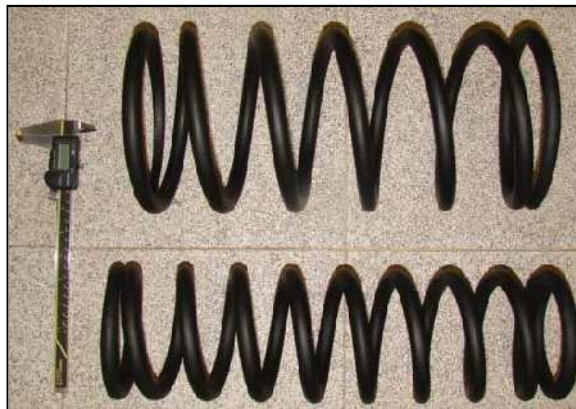
**Figura 11.** Esquema de la unión superior

### 3.2.4.1 Dimensionamiento

Las dimensiones del espacio hueco de la caja triangular se establecieron para que el gancho de la polea diferencial tuviera el espacio suficiente para ser enganchado. La geometría de este módulo es de forma triangular con sus vértices aplanados por cuestiones de seguridad. Los lados más largos de la caja tienen una longitud de 13 cm y las orejas tienen un dimensionamiento de 6,5 X 6,5 X 1,2 cm (ver Figura 11). Para asegurar que las barras sometidas a compresión tuvieran espacio suficiente para rotar en los puntos A, B y C (ver Figura 11), los agujeros de los pasadores se taladraron a una distancia de 3 cm desde el borde lateral de la caja.

### 3.2.5 Módulo de potencia (resortes)

El equipo fue diseñado para que la energía de impacto del martillo con la platina (la cual se encuentra ubicada en la superficie) fuera como mínimo 4 veces la energía que genera el impacto de una persona con una porra de 18 libras. La energía de impacto se almacena y se entrega por medio de dos resortes (ver Figura 12).



**Figura 12.** Resortes de potencia

#### 3.2.5.1 Cálculo de energía de los resortes

Para calcular la constante elástica del resorte, era necesario establecer cuánto era la energía de impacto generado por una persona con una porra de 18 lb. Para medir este parámetro se procedió a calcular la velocidad final de la porra al momento de golpear la platina, este cálculo fue de aproximadamente 8,33 m/s (ver Tabla 1). Asumiendo la energía de impacto igual a la energía cinética que posee el martillo justo antes de golpear la platina, se tiene entonces una energía igual a 312,5 N.m (ver Tabla 1).

<b>Cálculo de la Energía entregada por un hombre</b>	
Masa martillo [Kg]=	9
Altura [m]=	2,5
Tiempo de impulso [S]=	0,3
Velocidad de impacto [m/S]=	8,33
<b>Energía entregada [N.m]=</b>	<b>312,50</b>

**Tabla 1.** Energía entregada por un hombre con una porra

Debido a que el resorte debe entregar como mínimo 4 veces este valor se tiene finalmente que la energía total del resorte debe ser de 1250 N.m aprox. La cual se sobredimensionó hasta 1500 N.m para garantizar la energía mínima de impacto. Con este valor de energía se requiere una constante elástica en el resorte de 100 KN/m aprox. (ver Tabla 2).

<b>Datos</b>	
Masa [Kg]=	30
Desplazamiento [m]=	0,17
<b>Constante [N/m]=</b>	<b>100343,9</b>
Gravedad $g[m/s^2]$ =	9,81
Impacto esperado [N.m]=	1500
<b>Constante k [N/m]=</b>	<b>100343,9</b>
Veloc. de impacto [m/s]=	10
<b>Fuerza máxima ejercida por la diferencial</b>	
<b>Fuerza [Kg]=</b>	<b>1768,9</b>

**Tabla 2.** Cálculo de la constante del resorte

### 3.2.5.2 Dimensionamiento

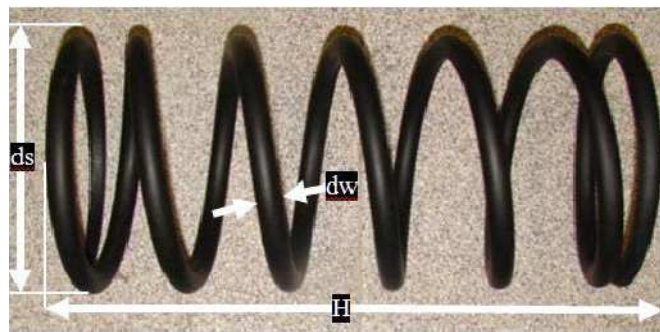
Debido a que no se encontró un resorte con capacidad para entregar este nivel de energía, fue necesario la utilización de dos resortes montados concéntricamente en el tubo guía de la unión inferior, permitiendo de esta

manera, que la constante elástica requerida (100 KN/m aprox.) sea lograda al sumar sus constantes (ver Tabla 3 y Figura 13).

**Tabla 3.** Dimensiones resortes

Muestra	*Longitud libre H	*Diámetro del Resorte – ds	*Diámetro del alambre -dw
Resorte 1 – M1	17.5	5	0.629
Resorte 2 – M2	15.0	7	0.649

\*Unidades en pulgadas



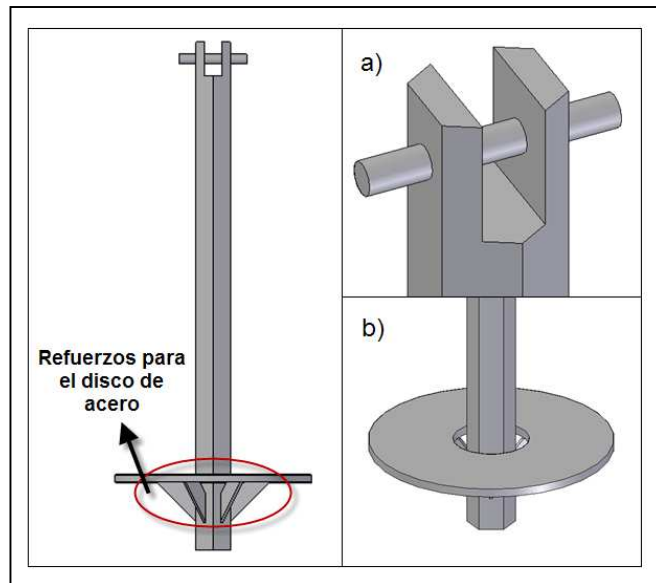
**Figura 13.** Detalle de resorte de potencia

### 3.2.6 Módulo del martillo

Este módulo es el encargado de transmitir la energía de impacto a la platina ubicada en la superficie de la tierra, el módulo consta de una barra maciza en acero de forma hexagonal, la cual tiene ubicada en su parte inferior un disco soportado por 6 refuerzos soldados en cada una de las caras del martillo (ver Figura 14).

El disco del martillo (ver Figura 14.(b)), sirve como apoyo a los resortes para que al ser comprimidos por la polea diferencial le transfieran esta energía potencial acumulada al martillo una vez se realice el disparo. La parte superior del martillo cuenta con un agujero donde se ubica un pasador que le

permite la conexión con el gancho de la polea diferencial (ver Figura 14.(a)). El maquinado en forma de tenaza, se realizó por la necesidad de brindar un espacio suficiente para que el gancho de la diferencial se pueda enganchar al martillo cómodamente y sin ninguna interferencia.



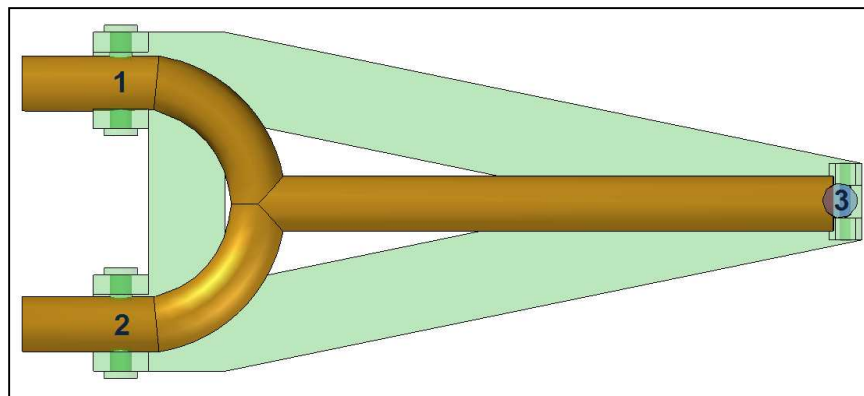
**Figura 14.** Esquema del Martillo. (a) Conexión. (b) Disco

### 3.2.6.1 Dimensionamiento

El martillo tiene una longitud total de 83 cm y un perfil hexagonal de diámetro máximo de 6,5 cm. El disco de acero cuenta con un diámetro de 36 cm y un espesor de  $\frac{1}{2}$ ", los soportes del disco soldados en las caras laterales del martillo son de acero estructural y tienen un espesor de 9 mm.

### 3.2.7 Módulo de sistema de disparo

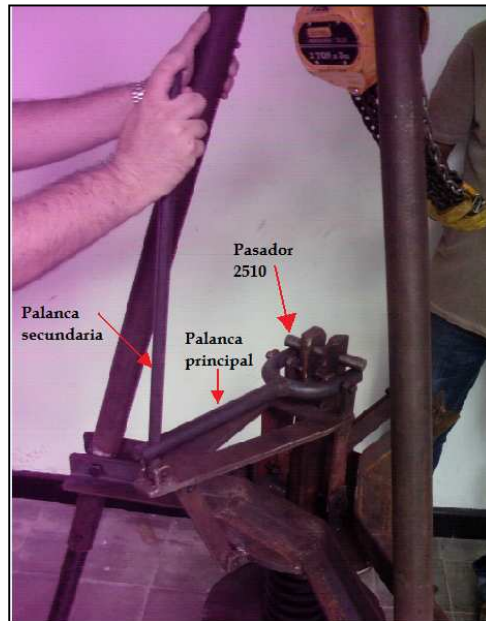
La función principal del sistema de disparo, es la de permitir la desconexión del pasador del martillo con el gancho de la polea diferencial para que de esta manera el martillo sea impulsado libremente por la fuerza de los resortes y genere el impacto contra el suelo. El módulo consta de una palanca principal y una palanca de accionamiento llamada palanca secundaria, la palanca principal se encuentra apoyada sobre dos pasadores en los puntos 1 y 2, mientras que la palanca de accionamiento se encuentra sobre el pasador en el punto 3 (ver Figura 15).



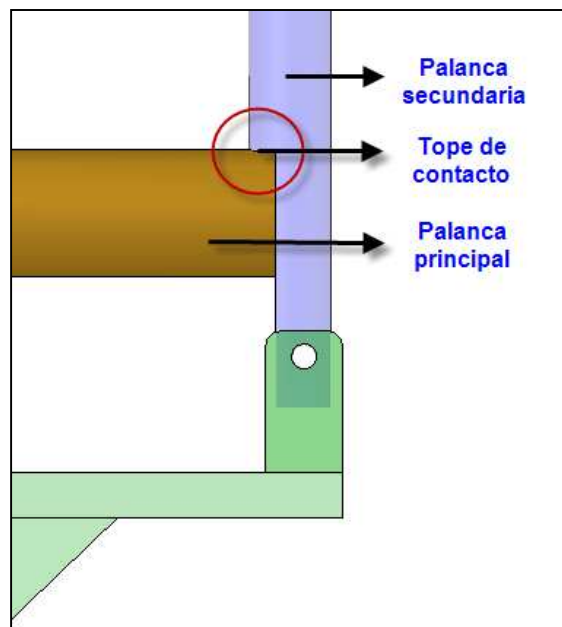
**Figura 15.** Vista superior del sistema de disparo

El funcionamiento del sistema de disparo es el siguiente: primero se ubica el pasador del martillo en la tenaza de la palanca principal por medio de la polea diferencial (ver Figura 16). Después se asegura la palanca principal en posición horizontal por medio de un tope que tiene la palanca secundaria (ver Figura 17) y se mantiene en esta posición hasta que se retira el gancho de la polea diferencial. Una vez hecho este procedimiento el operario puede realizar el disparo rotando la palanca secundaria, permitiendo de esta

manera, que la palanca principal rote libremente y deje caer el martillo impulsado por la fuerza de los resortes.



**Figura 16.** Pasador del martillo montado sobre la palanca principal



**Figura 17.** Tope de contacto entre palancas principal y secundaria

El pasador del martillo ejerce una carga de 1,7 toneladas sobre la tenaza de la palanca principal, mientras que en el tope la palanca secundaria, esta fuerza se reduce a 183 kg por la relación de distancias con respecto al pivote de la palanca principal (ver Tabla 4). La fuerza de 0,87 kg que debe ejercer el operario al accionar la palanca secundaria es producida por la fuerza de rozamiento que se genera en el tope al liberar la palanca principal (ver Tabla 4). Para calcular esta fuerza se tuvo en cuenta la carga normal que se ejercía en el tope de la palanca secundaria (183 kg) y se multiplicó este valor por el coeficiente de rozamiento del material 4140.

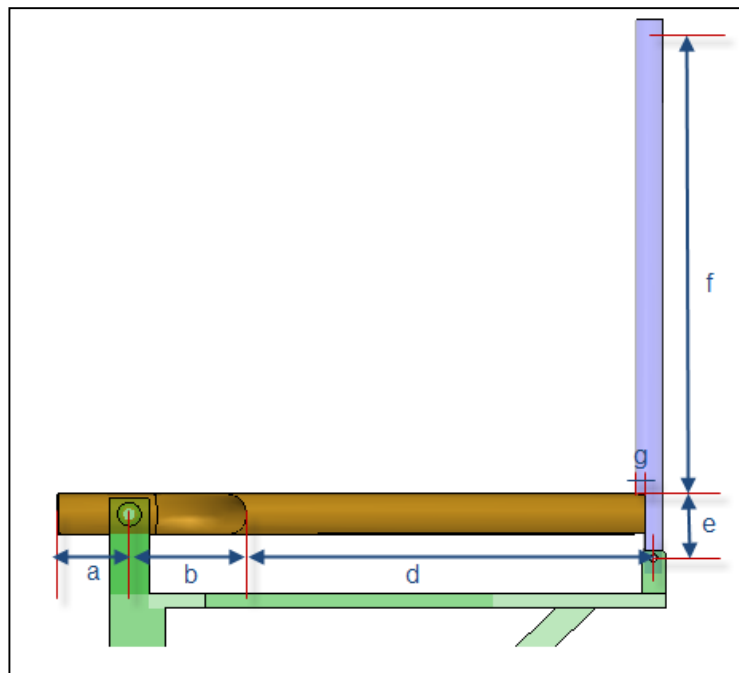
#### **3.2.7.1 Dimensionamiento**

La palanca principal se encuentra pivotada sobre dos pasadores a una distancia tal que permite una relación de palancas de 1:9 aproximadamente, esta palanca es de perfil circular macizo y tiene un diámetro de 1"; y la palanca secundaria permite una relación de palancas de 1:8 aprox., es de sección circular maciza y tiene un diámetro de 15 mm.

La determinación de la relación más adecuada se hizo con un pequeño programa de Excel (Ver Tabla 4) donde se calcula la fuerza necesaria que debe hacer el operario para realizar el disparo. En el programa se tienen como variables las distancias que se observan en la Figura 18, esto se hizo para poder realizar un mejor análisis de las dimensiones óptimas de las palancas principal y secundaria, evitando que no fueran muy robustas y que permitieran ejercer la menor fuerza de accionamiento por parte del operario.

CALCULO PARA HALLAR LA FUERZA EJERCIDA POR EL OPERARIO PARA DISPARAR EL MARTILLO			
Datos de entrada			
Carga [Kg]=	1700	e [m]=	0,04
a [m]=	0,035	f [m]=	0,34
b [m]=	0,074	g [m]=	0,005
d [m]=	0,251	$\mu$ [Coef. fric]=	0,17
Dato de salida			
Fza_operario[Kg]=	0,87		

**Tabla 4.** Estimación fuerza de accionamiento, sistema de disparo



**Figura 18.** Distancias en las palancas principal y secundaria


## **4. VALIDACIÓN ANALÍTICA DEL EQUIPO**

### **4.1 Diseño y dimensionamiento de los módulos del equipo**

El análisis estructural del equipo fue realizado examinando cada módulo por separado, teniendo en cuenta la mayor carga de trabajo y factores de seguridad conservadores para evitar cualquier riesgo de accidente durante la operación del equipo. Los módulos a analizar son los siguientes:

#### **4.1.1 Módulo de trípode**

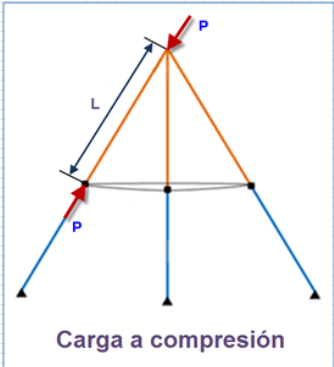
En este módulo, el elemento sometido a mayor carga es la pata superior, la cual se encarga de conectar la unión superior con la unión inferior y soporta una carga máxima de compresión igual a 1720 kg (fuerza generada por los resortes en su compresión máxima de 17 cm). Debido a que se cuenta con 3 patas superiores, cada una de estas soporta  $1/3$  de la carga máxima, equivalente a 567 kg aproximadamente. A continuación se realizará el cálculo por pandeo de la pata superior (ver Tabla 5):



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTAND  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
BUCAFAMANGA

## Pata Superior

**Nombre del Componente:**  
**Imagen del DCL o E.C.**



**Carga a compresión**

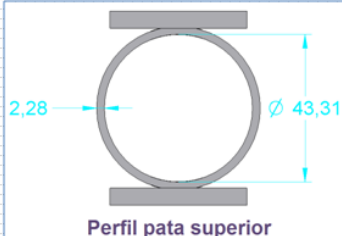
①  $\left(\frac{L}{k}\right)_1 = \left[\frac{2C\pi^2 E}{S_y}\right]^{1/2}$

②  $\left(\frac{L}{k}\right)_0 = \left[\frac{C\pi^2 E}{S_y}\right]^{1/2}$

Si  $(L/K) > (L/K)_1$  es Columna larga  
 Si  $(L/K)_0 < (L/K) < (L/K)_1$  es Columna Intermedia  
 Si  $(L/K) < (L/K)_0$  es Columna Corta

③  $\sigma = \frac{P}{A}$

④  $\sigma_{adm} = \frac{S_y}{N}$



**Perfil pata superior**


Eq	Variable	Parámetro	Unidades	Comentario
	P	567	Kg.	Carga a compresion soportada en cada pata
	A	3,56E-04	m <sup>2</sup>	Area transversal
	L	0,98	m.	Distancia entre apoyos
	K	0,0161	m.	Radio de giro
	(L/K)	60,8	cte.	Razón de esbeltez
	C	1	cte.	Apoyo tipo Pasador - Pasador
	E	2,10E+10	kg/m <sup>2</sup>	Módulo de elasticidad del material
	N	4	cte.	Factor de seguridad asumido
	Sy	3,24E+07	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia
1	(L/K) <sub>1</sub>	113	cte.	Valor límite superior de razón de esbeltez
2	(L/K) <sub>0</sub>	80	cte.	Valor límite inferior de razón de esbeltez
3	σ	1,60E+06	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de trabajo - Columna Corta
4	σ <sub>adm</sub>	8,10E+06	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo admisible
<b>σ &lt; σ<sub>adm</sub>    ok</b>				

**Tabla 5.** Cálculo por pandeo de la pata superior

### 4.1.2 Módulo de Unión inferior

En este módulo la fuerza originada por los resortes es transmitida a las barras del trípode por medio de 3 brazos de perfil en "L". Esto produce un

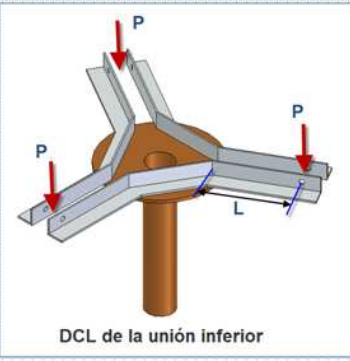
esfuerzo por flexión en el perfil debido a la fuerza ubicada a 25 cm del borde del disco de acero y la magnitud de esta carga es igual a la fuerza máxima generada por el resorte dividido entre los 6 perfiles de soporte, lo que equivale a un valor de 284 kg (ver Tabla 6).



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
BUCA RAMANGA

## Unión Inferior

**Nombre del Componente:**  
**Imagen del DCL o E.C.**



DCL de la unión inferior

①  $\sigma = \frac{M * c}{I}$

②  $\sigma_{adm} = \frac{Sy}{N}$

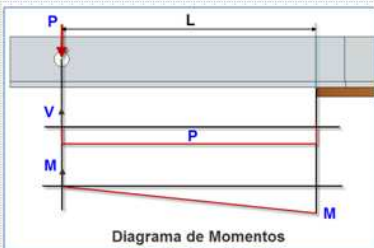
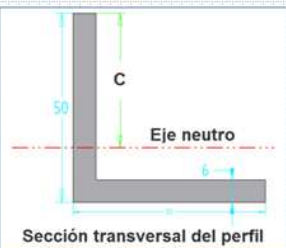


Diagrama de Momentos



Sección transversal del perfil

Eq	Variable	Parámetro	Unidades	Comentario
	P	284	Kg.	Carga sobre el perfil en "L"
	L	0,25	m.	Longitud de la sección del perfil sometido a flexión
	M	71	Kg.m	Momento flector máximo
	c	0,035	m.	Distancia al eje neutro
	I	1,29E-06	m <sup>4</sup>	Momento de inercia
	N	4	cte.	Factor de seguridad asumido
	Sy	3,24E+07	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia
1	$\sigma$	1,93E+06	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de trabajo - Flexion
2	$\sigma_{adm}$	8,10E+06	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo admisible
$\sigma < \sigma_{adm}$ <b>ok</b>				

**Tabla 6.** Cálculo por flexión del perfil en "L"

Tenemos que el esfuerzo por flexión generado en cada perfil es inferior al esfuerzo admisible del material teniendo en cuenta un factor de seguridad igual a 4. De esta manera se asegura que los brazos de la unión inferior soporten la carga generada por la compresión de los resortes.

#### **4.1.3 Módulo de sistema de disparo**

El sistema de disparo funciona por medio de un sistema de palancas, donde la palanca principal (en forma de tenaza) soporta el pasador de material 2510 que mantiene el martillo en posición de disparo sobre el extremo de la tenaza mientras se encuentran comprimidos los resortes. Esta fuerza sobre la tenaza es de 1700 kg la cual se divide a la mitad entre las dos puntas de la palanca (ver Tabla 7).

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTAND  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
BUCARAMANGA

## Sistema de Disparo

Nombre del Componente:  
**Imagen del DCL o E.C.**

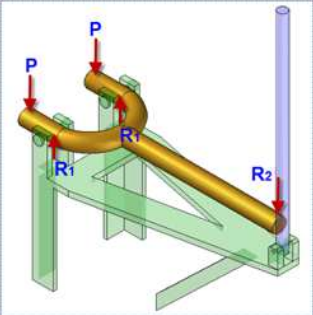
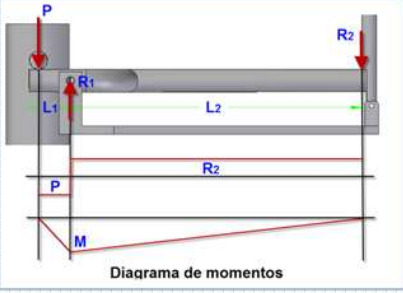




Diagrama de momentos



Sección transversal de palanca principal

①  $\sigma = \frac{M * c}{I}$


②  $\sigma_{adm} = \frac{Sy}{N}$

Eq	Variable	Parámetro	Unidades	Comentario
	P	850	Kg.	Carga en el extremo de la palanca principal
	R1	969,3	Kg.	Reacción en soporte 1
	R2	119,5	Kg.	Reacción en soporte 2
	L1	0,045	m.	Distancia entre punto de aplicación de la carga y el soporte 1
	L2	0,32	m.	Distancia entre soporte 1 y soporte 2
	M	38,25	Kg.m	Momento flector máximo
	c	0,0125	m.	Distancia al eje neutro
	I	1,01E-08	m <sup>4</sup>	Momento de inercia
	N	2	cte.	Factor de seguridad asumido
	Sy	1,15E+08	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia mejorado con tratamiento térmico
1	$\sigma$	4,73E+07	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de trabajo - Flexión
2	$\sigma_{adm}$	5,75E+07	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo admisible
$\sigma < \sigma_{adm}$ <b>ok</b>				

**Tabla 7.** Cálculo por flexión de palanca principal

Tenemos un factor de seguridad por flexión igual a 2.5 cuando el equipo se encuentra trabajando a su carga máxima, esto asegurará que a pesar de que la sección transversal en la zona crítica haya sido debilitada por el agujero de pasador no se presente ninguna falla estructural en la palanca.

Cálculo por pandeo del soporte del sistema de disparo (ver Tabla 8):



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
BUCARAMANGA

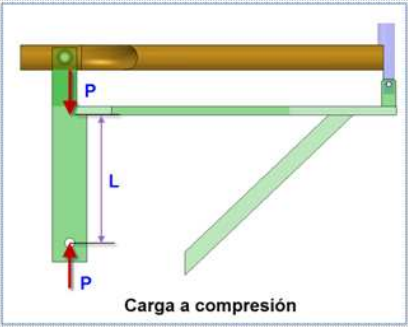
## Soporte Sistema de Disparo

**Nombre del Componente:**  
**Imagen del DCL o E.C.**

①  $\left(\frac{L}{k}\right)_1 = \left[\frac{2C\pi^2 E}{S_y}\right]^{1/2}$

②  $\left(\frac{L}{k}\right)_Q = \left[\frac{C\pi^2 E}{S_y}\right]^{1/2}$

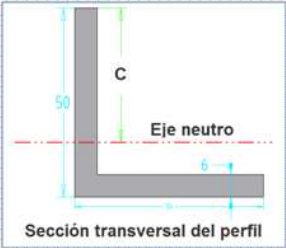
Si  $(L/K) > (L/K)_1$  es Columna larga  
Si  $(L/K)_Q < (L/K) < (L/K)_1$  es Columna Intermedia  
Si  $(L/K) < (L/K)_Q$  es Columna Corta



Carga a compresión

③  $\sigma = \frac{P}{A}$

④  $\sigma_{adm} = \frac{S_y}{N}$




Sección transversal del perfil

Eq	Variable	Parámetro	Unidades	Comentario
	P	850	Kg.	Carga a compresión en el soporte del sistema de disparo
	L	0,14	m.	Distancia entre apoyos
	A	3,56E-04	m <sup>2</sup>	Area transversal del perfil
	K	0,0151	m.	Radio de giro
	(L/K)	9,3	cte.	Razón de esbeltez
	C	2	cte.	Apoyo tipo Empotrado - Pasador
	E	2,10E+10	kg/m <sup>2</sup>	Módulo de elasticidad del material
	N	4	cte.	Factor de seguridad asumido
	Sy	3,24E+07	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia
1	(L/K) <sub>1</sub>	113	cte.	Valor limite superior de razón de esbeltez
2	(L/K) <sub>Q</sub>	80	cte.	Valor limite inferior de razón de esbeltez
3	σ	2,38E+06	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de trabajo - Columna Corta
4	σ <sub>adm</sub>	8,10E+06	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo admisible
<b>σ &lt; σ<sub>adm</sub>   <u>ok</u></b>				

**Tabla 8.** Cálculo por pandeo, Soporte-Sistema de disparo

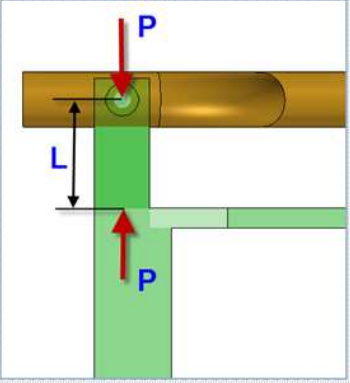
Cálculo por pandeo del soporte de la palanca principal (ver Tabla 9):



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
BUCARAMANGA

## Soporte Palanca Principal

**Nombre del Componente:**  
**Imagen del DCL o E.C.**



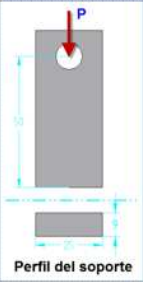
①  $\left(\frac{L}{k}\right)_1 = \left[\frac{2C\pi^2 E}{S_y}\right]^{1/2}$

②  $\left(\frac{L}{k}\right)_Q = \left[\frac{C\pi^2 E}{S_y}\right]^{1/2}$

Si  $(L/K) > (L/K)_1$  es Columna larga  
 Si  $(L/K)_Q < (L/K) < (L/K)_1$  es Columna Intermedia  
 Si  $(L/K) < (L/K)_Q$  es Columna Corta

③  $\sigma = \frac{P}{A}$

④  $\sigma_{adm} = \frac{S_y}{N}$




Perfil del soporte

Eq	Variable	Parámetro	Unidades	Comentario
	P	471	Kg.	Carga a compresión en el soporte de la palanca principal
	L	0,05	m.	Distancia entre apoyos
	A	2,25E-04	m <sup>2</sup>	Area transversal del perfil
	K	2,60E-03	m.	Radio de giro
	(L/K)	19,2	cte.	Razón de esbeltez
	C	2	cte.	Apoyo tipo Empotrado - Pasador
	E	2,10E+10	kg/m <sup>2</sup>	Módulo de elasticidad del material
	N	4	cte.	Factor de seguridad asumido
	Sy	3,24E+07	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia
1	(L/K) <sub>1</sub>	160	cte.	Valor limite superior de razón de esbeltez
2	(L/K) <sub>Q</sub>	113	cte.	Valor limite inferior de razón de esbeltez
3	σ	2,10E+06	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de trabajo - Columna Corta
4	σ <sub>adm</sub>	8,10E+06	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo admisible
<b>σ &lt; σ<sub>adm</sub> ok</b>				

**Tabla 9.** Cálculo por pandeo, Soporte-Palanca principal

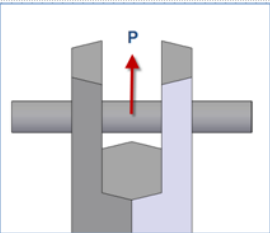
Cálculo a tensión en el extremo del martillo (ver Tabla 10):



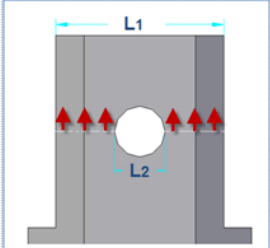
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
BUCA RAMANGA

## Extremo del Martillo

**Nombre del Componente:**  
**Imagen del DCL o E.C.**



①  $\sigma = \frac{P}{A}$



Zona sometida a esfuerzo

②  $\sigma_{adm} = \frac{Sy}{N}$

Eq	Variable	Parámetro	Unidades	Comentario
	P	1700	Kg.	Carga a tensión sobre el pasador del martillo
	L1	0,053	m.	Diametro mayor del martillo
	L2	0,016	m.	Diametro del pasador
	A	6,70E-04	m <sup>2</sup>	Area transversal de cada soporte
	S	3,14E-04	m <sup>2</sup>	Area transversal del pasador
	Sy <sub>2510</sub>	2,10E+08	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia - acero 2510 -
	N	4	cte.	Factor de seguridad asumido
	Sy	3,24E+07	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia - acero estructural A36 -
1	$\sigma$	2,54E+06	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo a tensión en la tenaza
2	$\sigma_{adm}$	8,10E+06	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de tracción admisible - acero estructural A36 -
3	$\tau$	2,70E+06	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de corte en el pasador
4	$\tau_{adm}$	2,62E+07	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo cortante admisible - acero 2510 -
$\sigma < \sigma_{adm} \quad \tau < \tau_{adm} \quad \mathbf{ok}$				

**Tabla 10.** Cálculo a tensión, extremo del martillo

## 4.2 Análisis estructural por elementos finitos (FEA)

A continuación, se realiza una simulación del comportamiento mecánico de los diferentes módulos más críticos del equipo, aplicándoles sus respectivas cargas.

Para este análisis estructural se utilizó el software ANSYS Workbench, para conocer a qué esfuerzo están sometidos los módulos, cual es su deformación máxima y qué factor de seguridad tienen. Los informes y análisis de cada pieza se encuentran en el Anexo B, con las características del material utilizado, cargas aplicadas, información de enmallado de la pieza y todos los valores que genera el programa.

### 4.2.1 Unión Superior

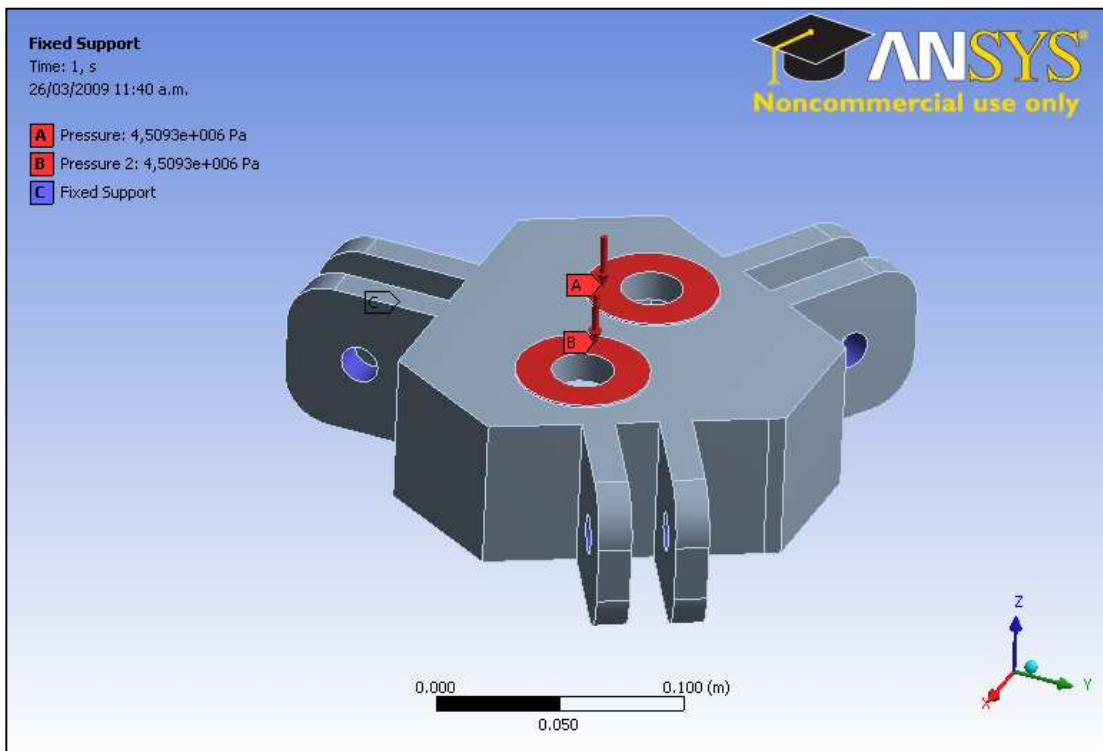


Figura 19. Aplicación de cargas - Unión superior

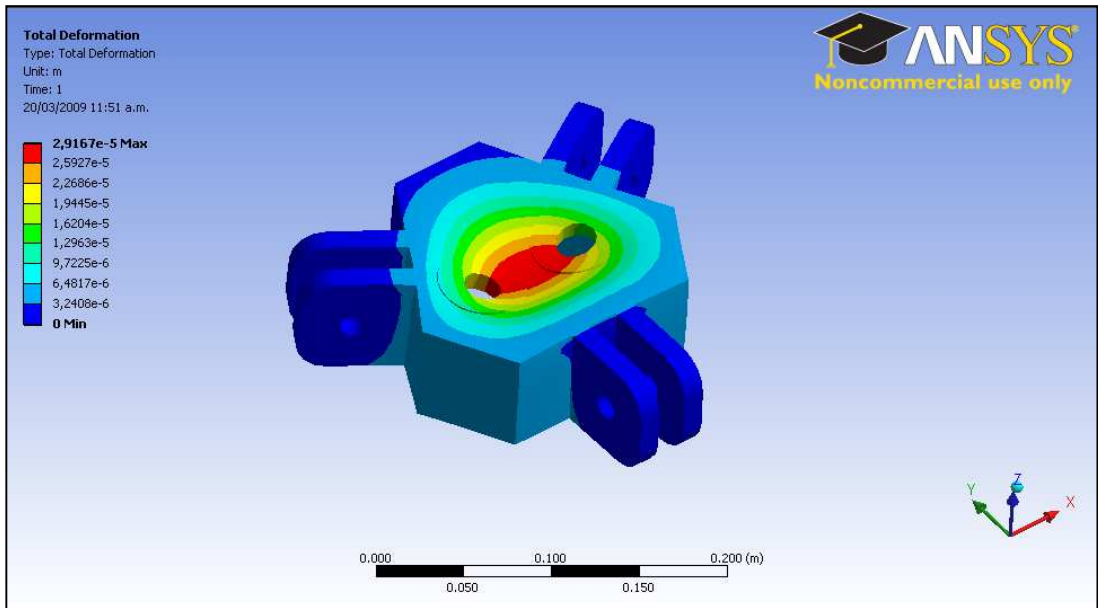


Figura 20. Deformación total - Unión superior

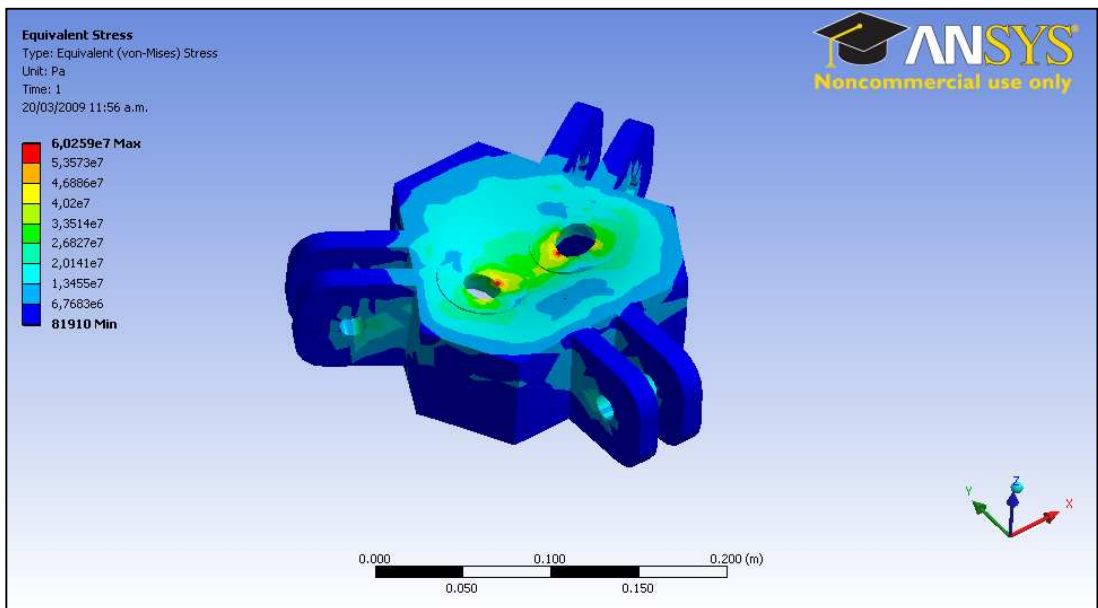
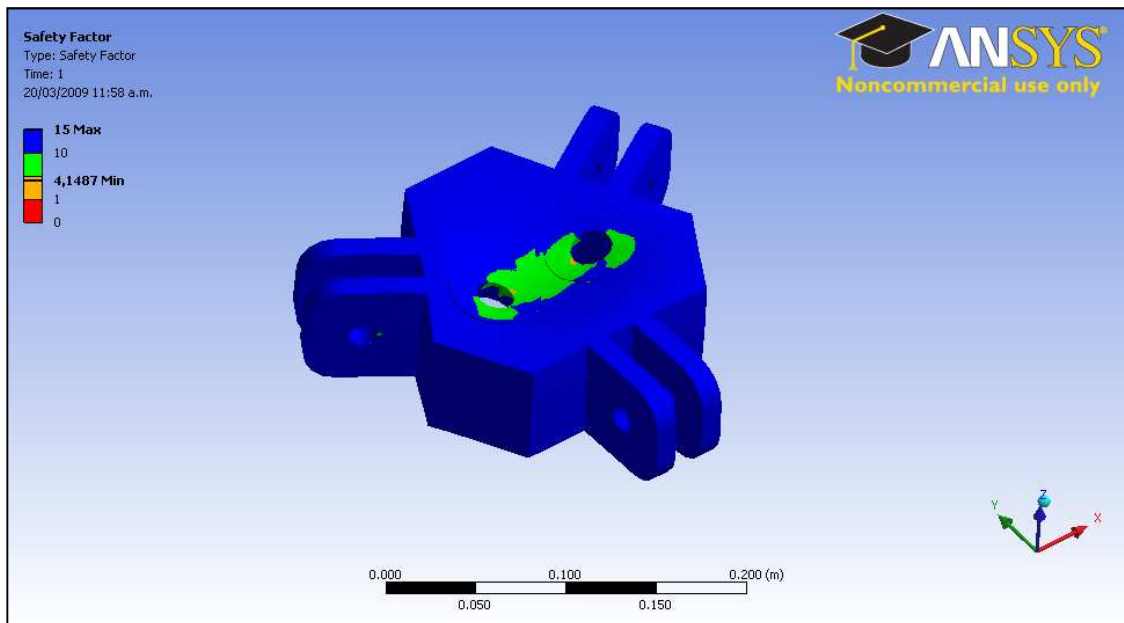


Figura 21. Esfuerzo equivalente – Unión superior



**Figura 22.** Factor de seguridad - Unión superior

La zona crítica se encuentra alrededor de los agujeros en la cara superior donde se transmite completamente la fuerza de los resortes. El factor mínimo de seguridad encontrado en este modulo es de 4.1, y la deformación máxima presente es de 0.029 mm.

#### 4.2.2 Unión Inferior

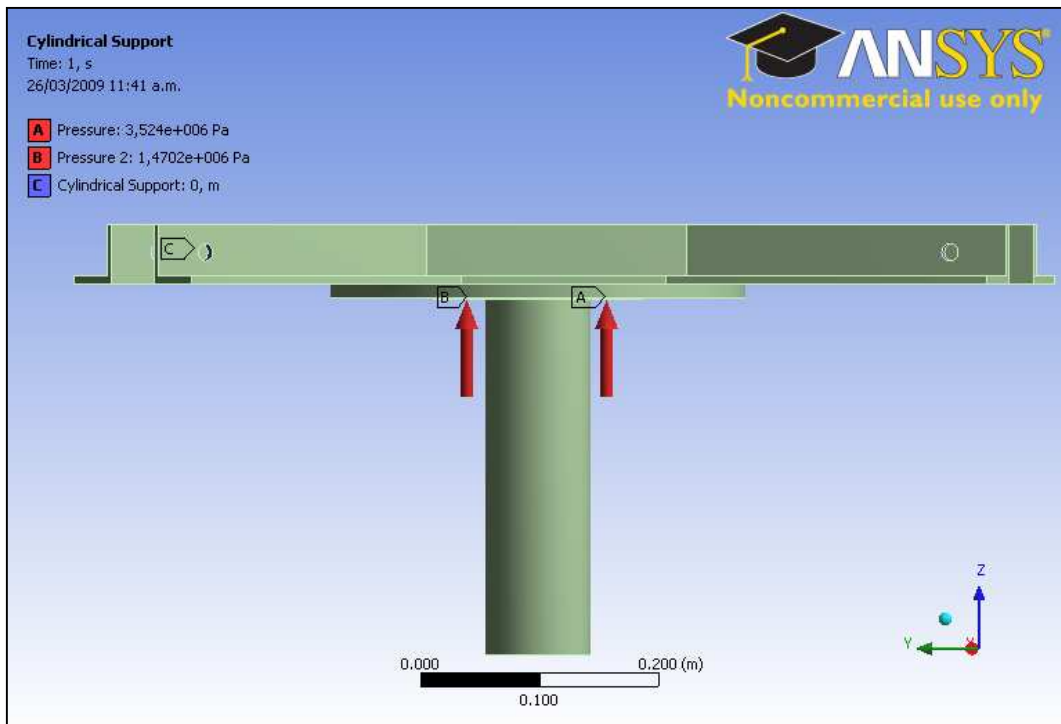


Figura 23. Aplicación de cargas – Unión inferior

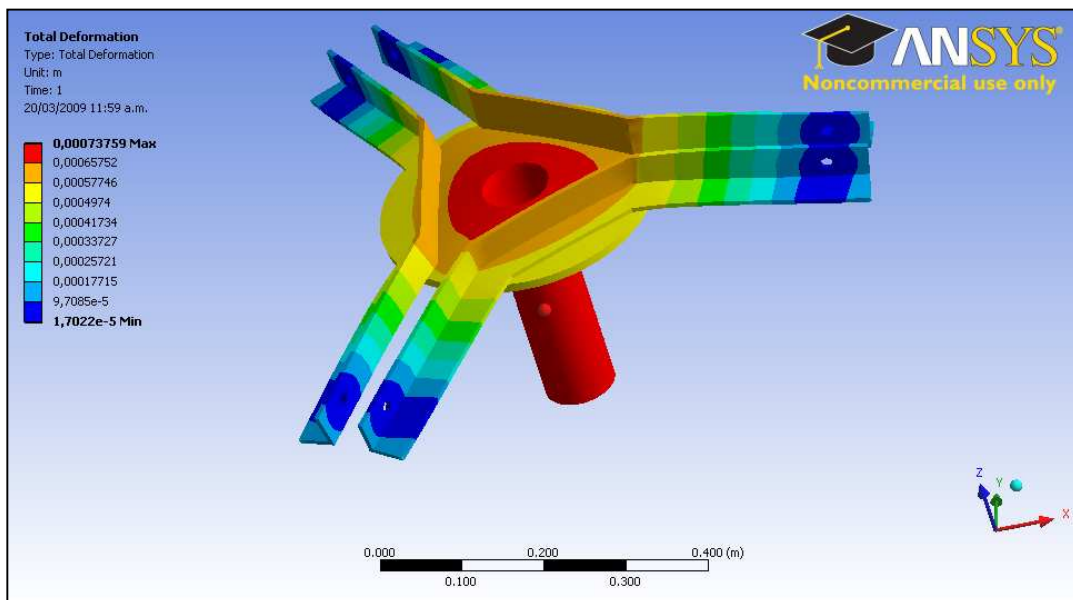
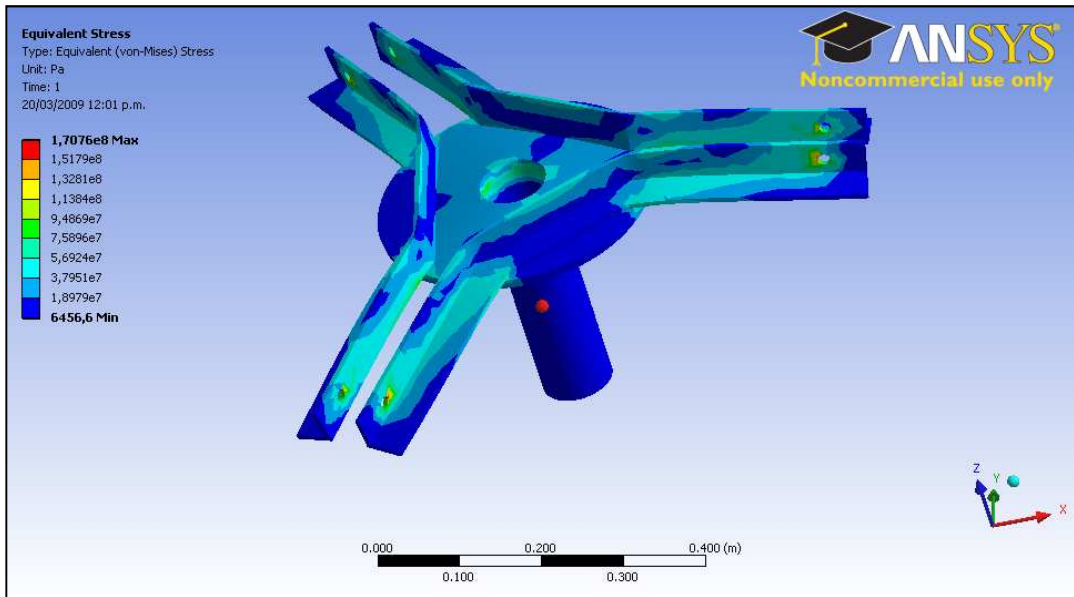
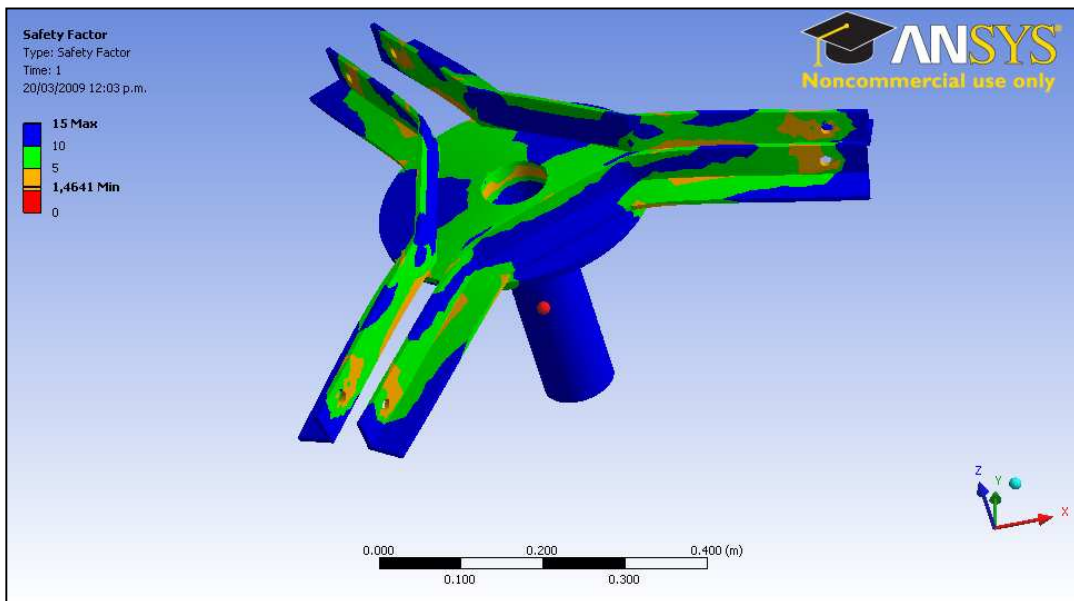


Figura 24. Deformación total – Unión inferior



**Figura 25.** Esfuerzo equivalente – Unión inferior



**Figura 26.** Factor de seguridad – Unión inferior

Este módulo se encuentra sometido a una fuerza que actúa en los extremos del perfil en “L” lo que produce un esfuerzo por flexión. El mínimo factor de seguridad se encuentra en los agujeros y a lo largo del perfil con un valor de

1,5 y la deformación máxima de 0,73 mm ocurre en la zona central del disco de acero.

#### 4.2.3 Pata superior

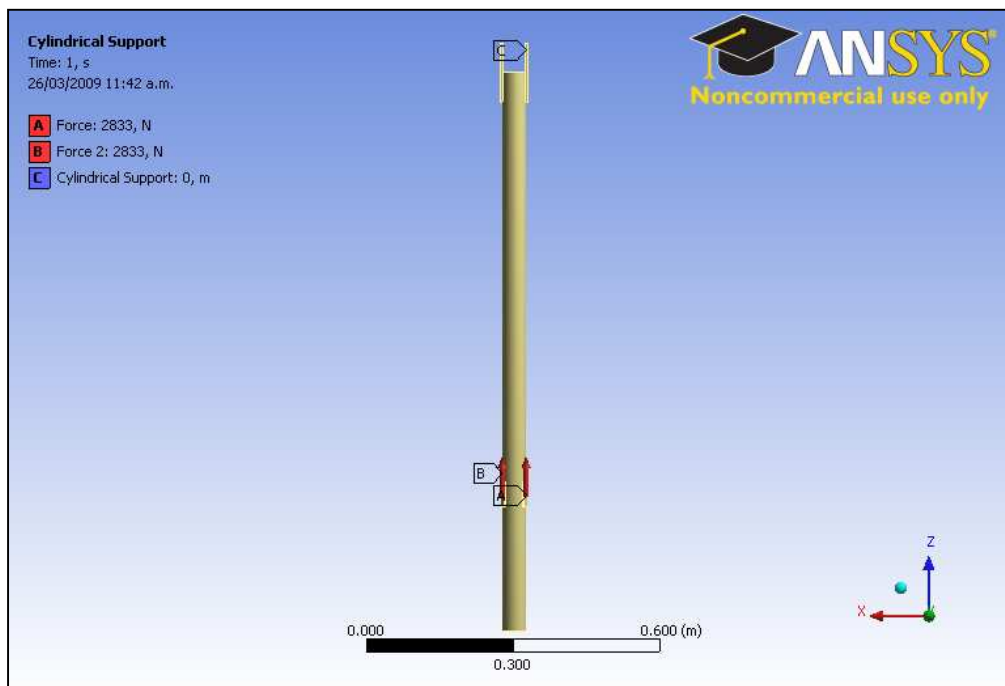


Figura 27. Aplicación de cargas – Pata superior

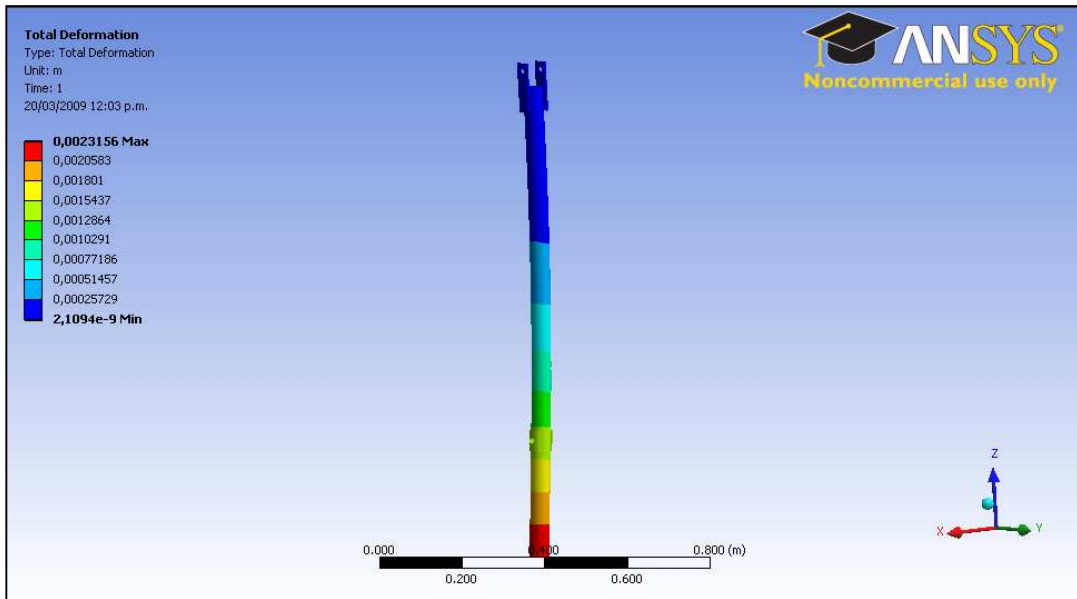


Figura 28. Deformación total – Pata superior

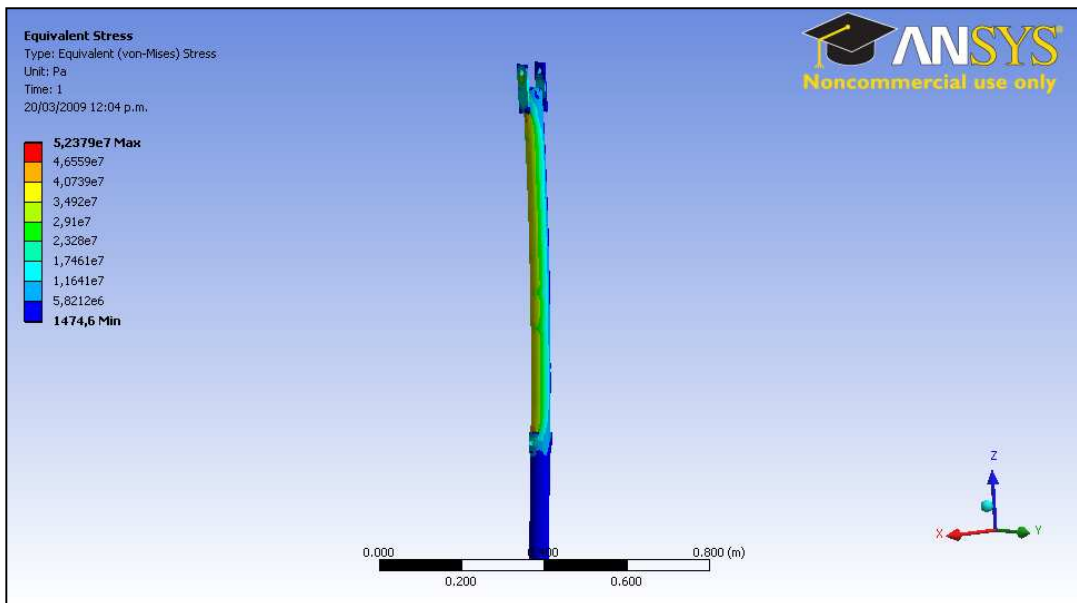
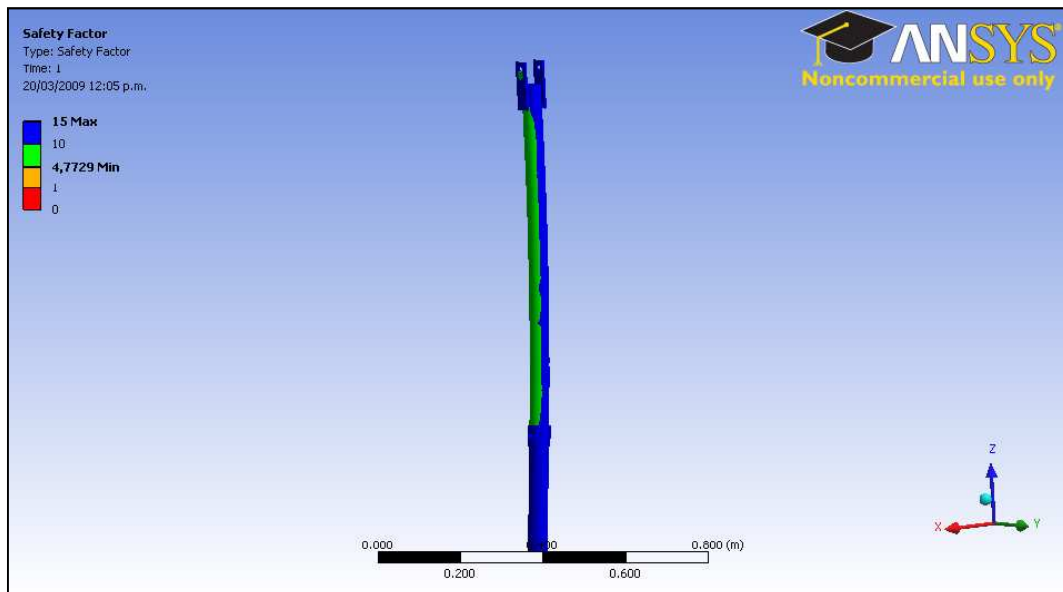


Figura 29. Esfuerzo equivalente – Pata superior



**Figura 30.** Factor de seguridad – Pata superior

Los resultados analíticos y por elementos finitos de este elemento que se encuentra sometido a una fuerza de compresión, arrojaron valores bastante conservadores que aseguran una confiabilidad bastante alta del componente durante su operación.

#### 4.2.4 Sistema de disparo

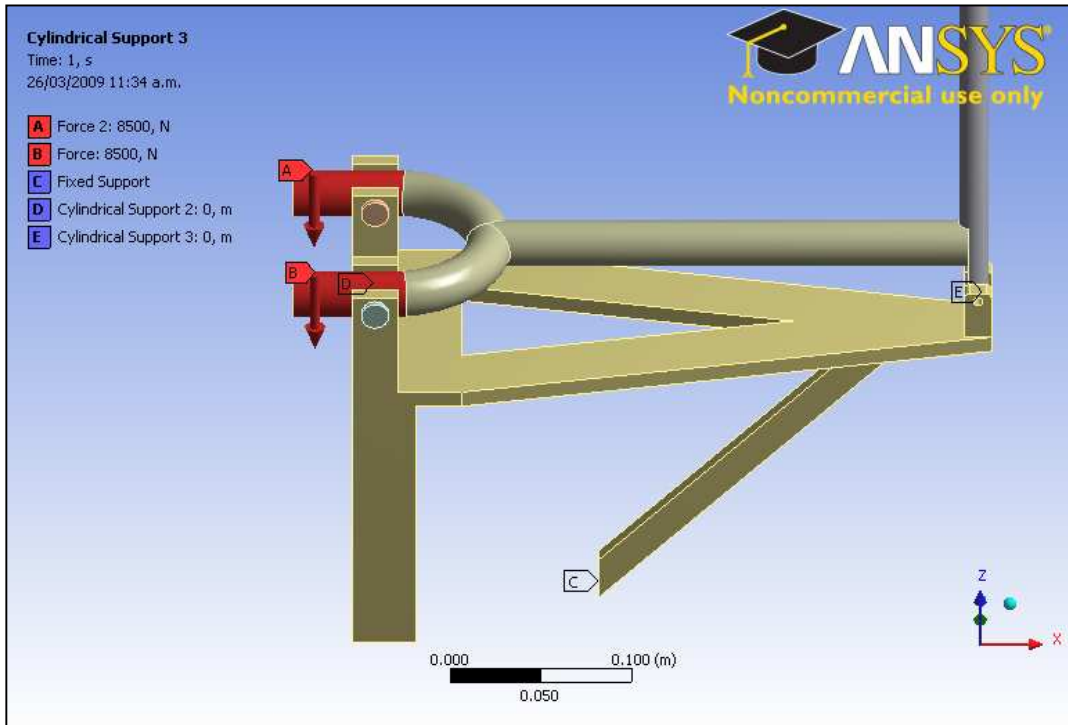


Figura 31. Aplicación de cargas – Sistema de disparo

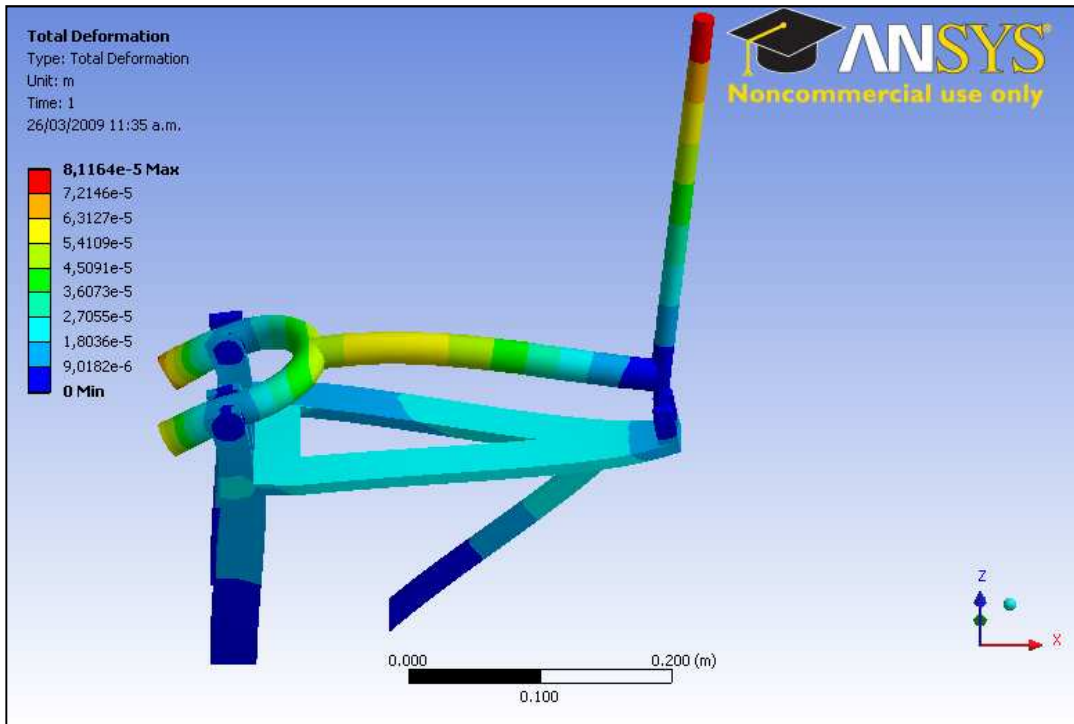


Figura 32. Deformación total – Sistema de disparo

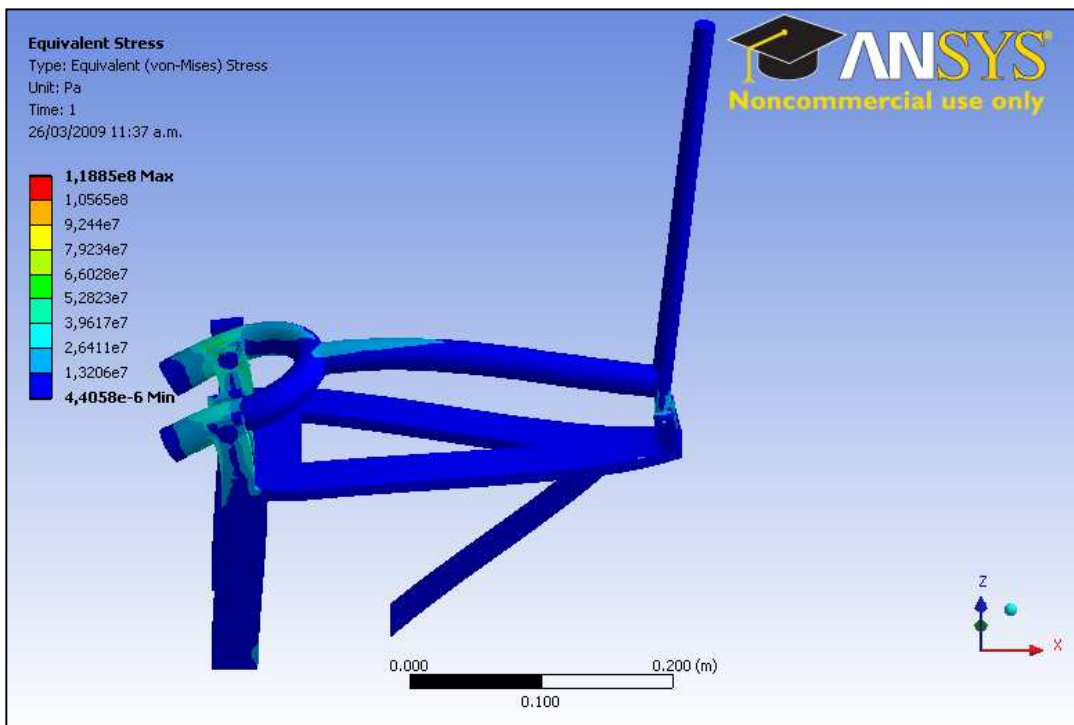
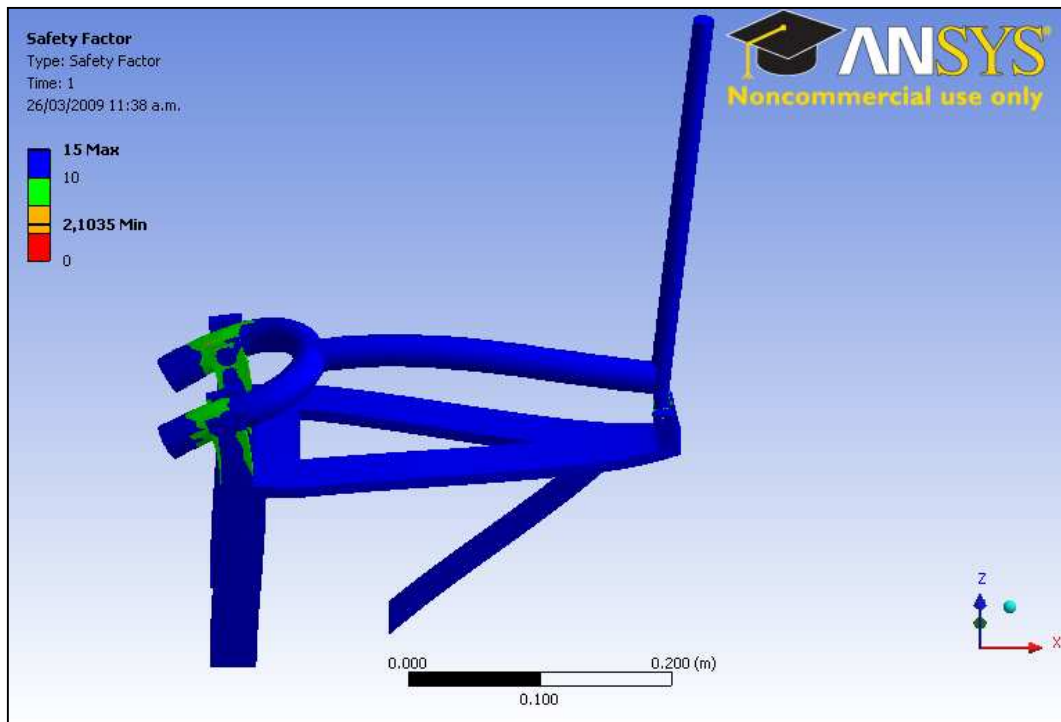


Figura 33. Esfuerzo equivalente – Sistema de disparo



**Figura 34.** Factor de seguridad – Sistema de disparo

El modelamiento matemático y el análisis por elementos finitos del sistema de disparo tuvieron en común que la zona crítica se encontraba alrededor de la zona del pasador sobre la palanca principal, por esta razón fue necesario mejorar las propiedades mecánicas del material, lo que permitió incrementar el factor de seguridad hasta un valor de 2,1.

## 5. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL EQUIPO

Para poder llevar a cabo el proceso de fabricación del equipo, inicialmente se desarrollaron los respectivos dibujos a mano alzada de cada una de las partes que compone el diseño total y final del equipo GIS-1500 (Generador de Impacto Sísmico – 1500 N.m), así como su dimensionamiento basados inicialmente en la barra que da el impacto a la superficie de la tierra (maza o martillo), debido a que ya se disponía de ésta para ser utilizada en el diseño y construcción. Después de tener cada uno de los dibujos a mano alzada del equipo, se continuó con la creación de las partes y módulos en el software SOLID WORKS 2007. Cuando ya se dispuso de todos los módulos en CAD<sup>2</sup>, estos fueron ensamblados en un conjunto (opción de Solid Works) para disponer de planos y vistas 2D y 3D respectivamente para su construcción (ver Anexo C). La soldadura utilizada en la construcción del equipo fue 6010 y 6011 para primer y segundo cordón respectivamente y 7018 para recubrimiento y presentación del cordón, todas estas de 1/8" de diámetro. A modo de información, la construcción del equipo se inició en el mes de Junio de 2008, la primera prueba de campo se realizó el 01 de Octubre de 2008.

Las máquinas herramienta utilizadas para la construcción del equipo fueron las siguientes:

- ✓ Torno
- ✓ Taladro
- ✓ Fresa
- ✓ Segueta eléctrica
- ✓ Soldador
- ✓ Esmeril

---

<sup>2</sup> Diseño Asistido por Computador

Inicialmente se optó por construir las patas superiores (ver Anexo C, pieza N° 9) del equipo (ver Figura 35), estas fueron hechas con tubo de perforación.



**Figura 35.** (a) Soldadura aplicada a las patas superiores  
(b) Corte de la pata superior en la segueta eléctrica

Después de disponer del disco de acero A36 y del ángulo con sus respectivos cortes y doblados (ver Figura 36. (a), (b) y (c)) y se prosiguió a unirlos (ver Anexo C, pieza N° 17) con soldadura (ver Figura 36.(d)).



**Figura 36.** Construcción del módulo de unión inferior

Al ensamblar los dos módulos mencionados anteriormente (patas superiores y unión inferior) la configuración resultante es la observada en la Figura 37.



**Figura 37.** Ensamble de patas superiores y unión inferior

Después se utilizaron platinas de acero A36 (ver Figura 38.(a)) , previamente diseñadas (ver Anexo C, pieza N° 1 y 9) para soldar las a las patas superiores y a la unión superior (ver Figura 38.(b)). Inicialmente se soldaron dos platinas a la unión superior y después se soldaron dos platinas (las más largas de la Figura 38.(a)) a una pata superior para empezar a hacer el ensamble de la unión superior con las patas superiores (ver Figura 38.(c)).



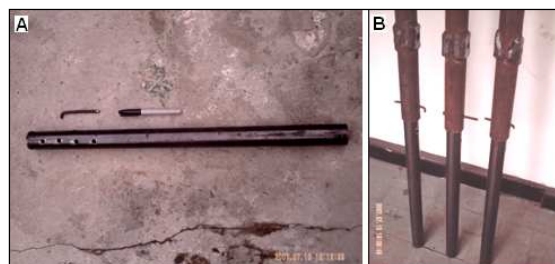
**Figura 38.** (a) Platinas de unión de patas y unión superior  
(b) Unión superior sin platinas soldadas  
(c) Ensamble entre patas y unión superior

Luego de unir las platinas a las patas superiores y a la unión superior, éstas se ajustaron y ensamblaron para formar el trípode (ver Figura 39). Los módulos que lo componen son: Unión superior, patas superiores y unión inferior.



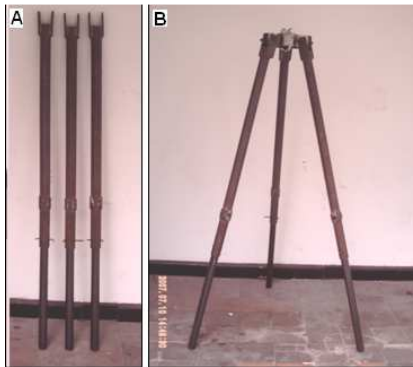
**Figura 39.** Trípode ensamblado

Después se utilizó tubo estructural para construir las patas inferiores (ver Anexo C, pieza N° 18), estas fueron de un diámetro inferior al tubo de perforación para que fueran insertadas en las patas superiores (ver Figura 40.(a)). Enseguida se perforaron 4 agujeros en las patas inferiores (para nivelación y para dar diferentes alturas en el equipo) y 1 en las superiores para unir estos módulos por medio de pasadores (ver Figura 40.(b)).



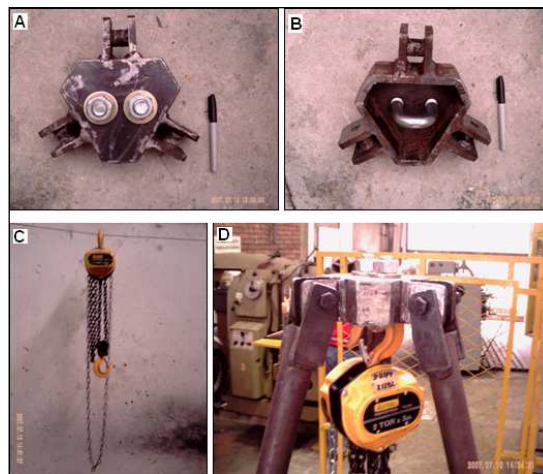
**Figura 40.** (a) Pata inferior  
(b) Patas inferiores insertadas en las superiores

Al ensamblar las patas superiores e inferiores (ver Figura 41.(a)) y éstas al unirlas con la unión superior, se obtuvo el conjunto de la Figura 41.(b).



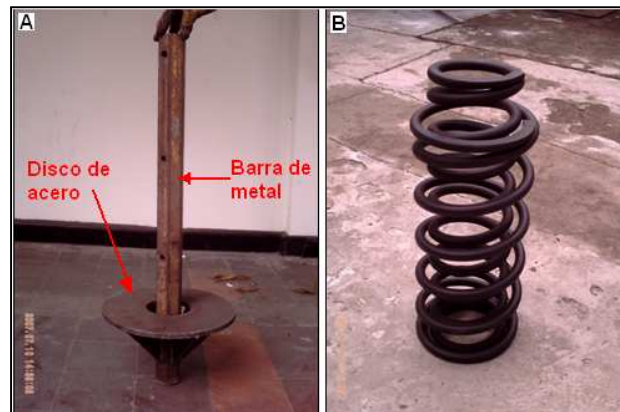
**Figura 41.** (a) Patas superior e inferior insertadas  
(b) Ensamble unión superior y patas

Después de tener construida la unión superior, ésta se perforó con taladro para poder insertarle un elemento de sujeción en U (ver Figura 42.(a) y (b)) el cual soporta la polea diferencial (ver Figura 42.(c)). Al ensamblar las partes mencionadas anteriormente se tiene el montaje visto en la Figura 42.(d).



**Figura 42.** (a) y (b) Unión superior y elemento de sujeción en U  
(c) Diferencial. (d) Ensamble de unión superior con todas sus partes

Seguidamente, se soldó el disco de acero A36 a la barra de metal (ver Anexo C, pieza N° 20) el cual soporta la carga ejercida por los resortes (ver Figura 43.(a) (b)).



**Figura 43.** (a) Martillo  
(b) Resortes para utilizarlos en paralelo

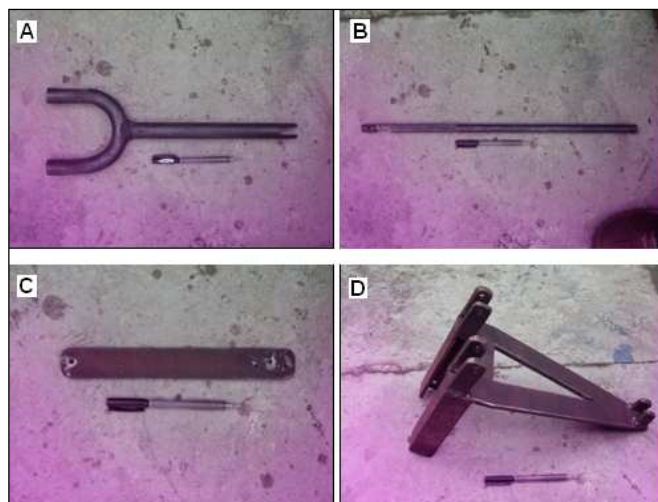
De todas las partes y módulos mencionados, el ensamble y conjunto que se tenía hasta el momento, era el observado en la Figura 44.



**Figura 44.** Ensamble parcial del equipo

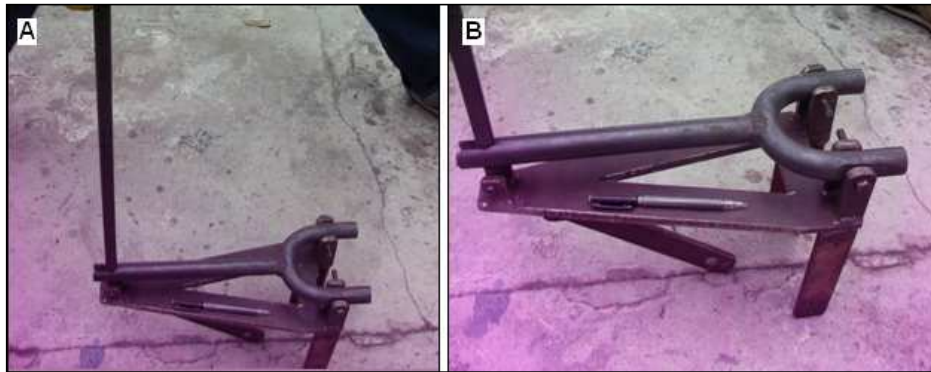
Luego de tener este conjunto parcial, el siguiente paso fue construir el sistema de disparo, clave para el funcionamiento del equipo. La palanca

principal (ver Anexo C, pieza N° 24) (ver Figura 45.(a)) y la secundaria (ver Anexo C, pieza N° 23 ) (ver Figura 45.(b)) fueron diseñados y construidos con acero 4140. Posteriormente después de cortadas, taladradas, fresadas y soldadas, estas fueron tratadas térmicamente con endurecimiento total para incrementar sus propiedades mecánicas. La barra de apoyo (ver Anexo C, pieza N° 30) (ver Figura 45.(c)) y el soporte (ver Anexo C, pieza N° 26) (ver Figura 45.(d)) fueron diseñados y construidos en acero A36, estos fueron cortados, taladrados, soldados y pulidos.



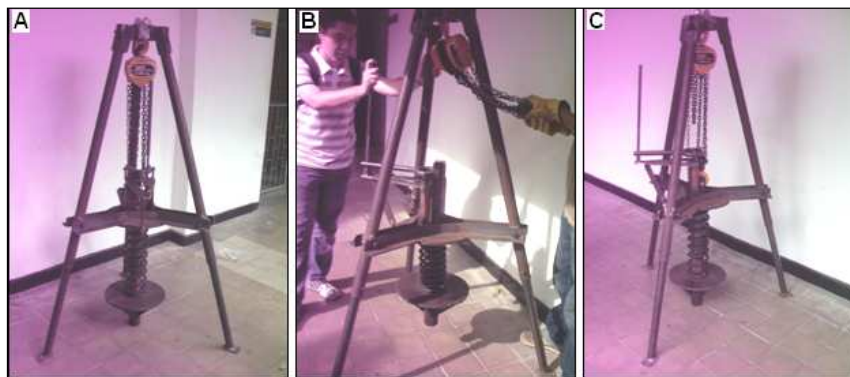
**Figura 45.** (a) Palanca principal. (b) Palanca secundaria  
(c) Barra de apoyo. (d) Soporte

Al ensamblar todas la partes del sistema de disparo, con pasadores “Grado 8” (por su alta resistencia mecánica) entre el soporte-palanca principal, así como entre soporte-palanca secundaria y soporte-barra de apoyo, el módulo del sistema de disparo se observa en la Figura 46.



**Figura 46.** Módulo del sistema de disparo

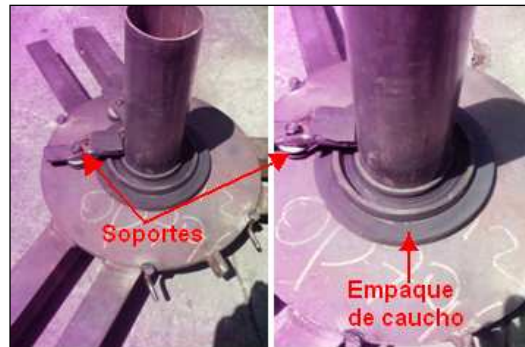
Después de tener construido el módulo del sistema de disparo, éste fue ensamblado sobre la unión inferior y atornillado para su buen desempeño y funcionamiento en el equipo. La Figura 47.(a) y (c), muestra el equipo descargado (es decir, sin posibilidad de que genere impacto) y la Figura 47.(b). muestra el equipo listo para disparar, dependiendo de un movimiento de la palanca secundaria por parte del operario.



**Figura 47.** (a) y (c) Equipo descargado  
(b) Equipo cargado

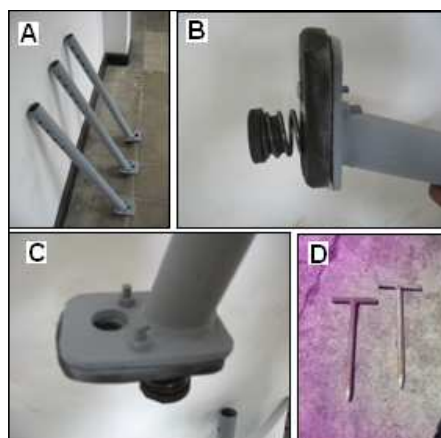
Después de realizar algunas pruebas con el equipo, se notó en los resultados que éste generaba ruido considerablemente, afectando esto a la señal generada por el impacto del martillo. Inicialmente se construyó un empaque

en caucho (ver Anexo C, pieza N° 29), (ver Figura 48) para aislar vibraciones entre los resortes a compresión y el disco de la unión inferior, luego se construyeron los soportes (ver Figura 48) para que los resortes se mantengan en posición (presionados contra el empaque de caucho).



**Figura 48.** Empaque y soportes en unión inferior

Después se insertó en cada pata inferior un resorte a compresión, con el propósito de amortiguar el salto del equipo (ver Figura 49.(a) y (b)), luego se taladró la platina de apoyo de cada pata inferior para insertar una estaca (ver Figura 49.(c) y (d)), de tal manera que mantenga anclado el equipo a la tierra para evitar su salto al momento del disparo.



**Figura 49.** (a) y (b) Patas inferiores  
(c) y (d) Anclaje

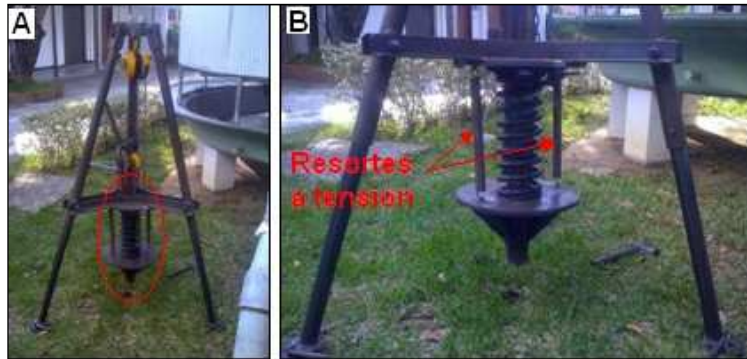
Con el propósito de eliminar otro problema de ruido causado por el rebote del martillo, se propuso instalar bandas elásticas (ver Figura 50) que ejercieran una fuerza de pretensionamiento.



**Figura 50.** Pretensionamiento para rebote

Según pruebas realizadas con el equipo y que son mencionadas en el siguiente capítulo, este sistema para solucionar el rebote no funcionó.

Después se propuso una nueva solución para el rebote, el cual consiste en dos resortes (ver Anexo C, pieza 21) a tensión (ver Figura 51), esta propuesta fue la que finalmente solucionó el problema del rebote y se tratará con mayor profundidad en el siguiente capítulo.



**Figura 51.** (a) Conjunto con resortes a tensión  
(b) Detalle de resortes a tensión

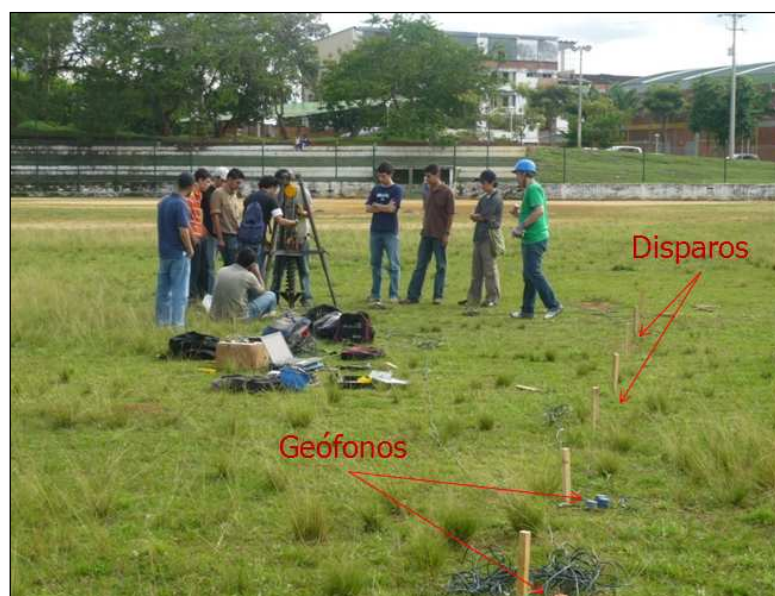
Finalmente lo que se hizo fue pintar los módulos para la presentación y entrega del equipo.

## 6. ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN CAMPO

En éste capítulo se mencionarán todas y cada una de las pruebas de campo realizadas con el equipo GIS-1500. Estas pruebas han sido realizadas en la zona verde de la Escuela de Ingeniería Mecánica (UIS) y en la cancha de Softbol de la Universidad Industrial de Santander. Las pruebas realizadas fueron las siguientes:

### 6.1 Adquisición sísmica, Octubre 01 de 2008.

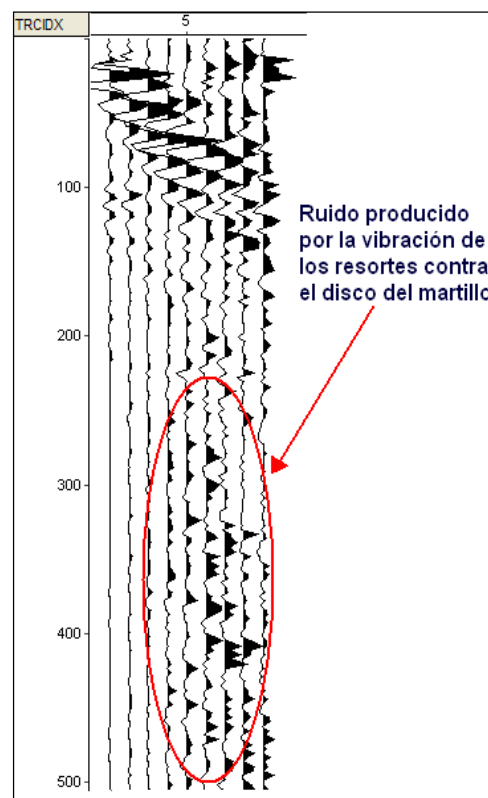
La prueba consistió en un *walk away*<sup>3</sup> con 2 receptores (geófonos) espaciados a una distancia de 2 m, los disparos también fueron espaciados cada 2 m (ver Figura 52).



**Figura 52.** Prueba cancha de Softbol –UIS

<sup>3</sup> Prueba que consiste en dejar los receptores en una sola posición (fijos). Los disparos se inician al lado de los receptores y estos se van alejando cada vez más de los receptores.

La imagen sísmica de apilado realizada a partir del arreglo mostrado en la figura anterior se puede ver en la Figura 53. El eje vertical es tiempo y éste tiene unidades de milisegundos [ms], el eje horizontal es número de trazas<sup>4</sup>. El offset<sup>5</sup> más lejano fue de 18 metros, distancia a la cual aún fue captada y reconocible la señal producida por el equipo GIS-1500.



**Figura 53.** Apilado de los disparos

Teniendo en cuenta la figura anterior, se presenta bastante ruido generado por la reverberación del resorte (ver Figura 53). Al observar la presencia de ruido en el apilado, se llegó a la conclusión de que los resortes a compresión (los que le entregan la energía al martillo) debían estar fijos y ajustados al

---

<sup>4</sup> Es la sección geológica que un geófono capta (debajo de el), en el cual genera información de impedancia acústica, coeficiente de reflexión, función reflectividad, etc.

<sup>5</sup> Es la distancia más lejana entre geófonos y disparos.

disco de la unión inferior por medio de soportes (ver Figura 54), al mismo tiempo, éstos debían ser amortiguados para que no transmitieran vibraciones (ruido) al equipo.

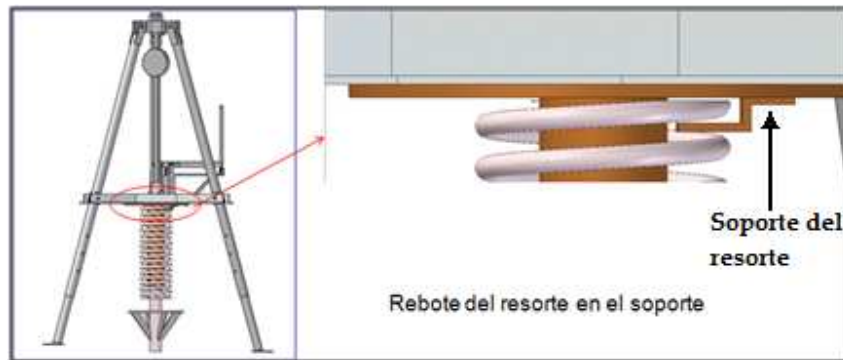


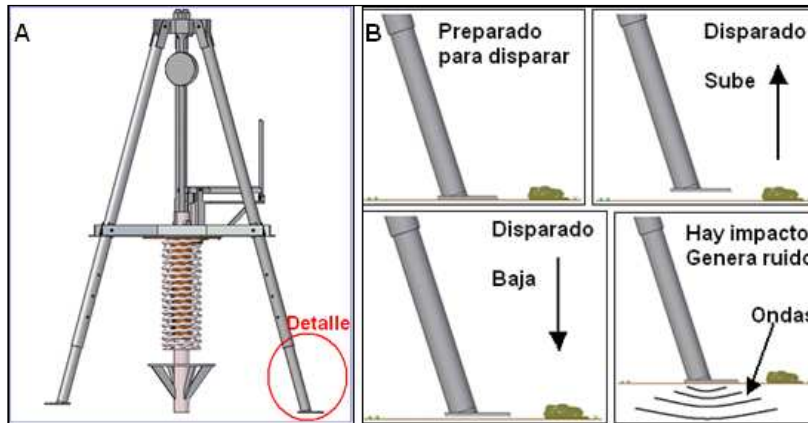
Figura 54. Soporte del resorte

Los arreglos que se hicieron para eliminar este ruido se pueden observar en la Figura 55. El sombrero o empaque de caucho es insertado a presión en el tubo guía de la unión inferior, éste tiene dos pestañas (relieves), la pestaña interior separa el resorte pequeño del tubo guía y la pestaña exterior separa el resorte pequeño del grande. Los soportes sujetan los resortes contra el disco, de manera que no se caigan, al mismo tiempo los soportes están cubiertos con caucho para que no transmitan vibraciones.



Figura 55. Arreglos unión inferior

En la prueba también se observó visualmente que el equipo saltaba al ser disparado el martillo (ver Figura 56), esto se debe a la reacción del equipo al momento de entregar la energía los resortes.



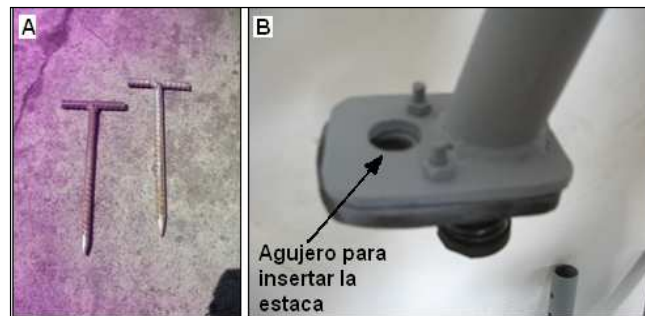
**Figura 56.** (a) Conjunto del equipo  
(b) Dinámica del equipo al ser disparado

Teniendo en cuenta esta problemática, la solución propuesta fue la de colocarle un resorte a compresión en cada pata (ver Figura 57), con la constante necesaria para sostener el peso del equipo sin el martillo, los cuales deben actuar después de ser disparado el martillo.



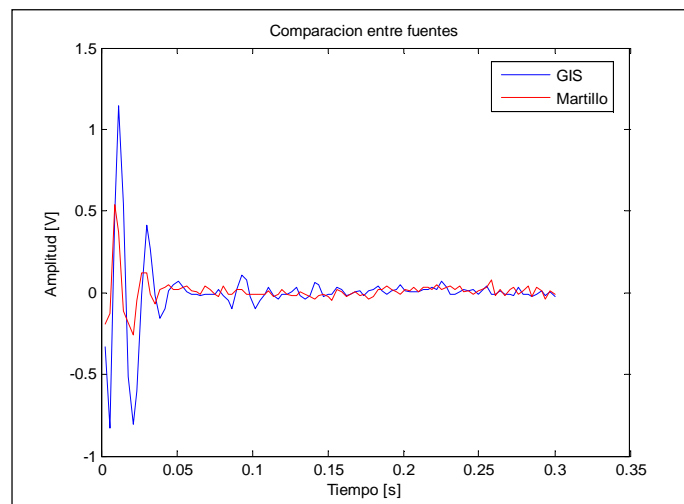
**Figura 57.** Amortiguación de las patas

Para evitar que el equipo saltara, se sugirió insertar estacas en las patas inferiores, de manera que éstas anclaran el equipo a la tierra (ver Figura 58) para evitar su salto.



**Figura 58.** (a) Estacas  
(b) Pata inferior con agujero para estaca

Después de haber realizado la adquisición, se llevó a cabo una comparación de cantidad de energía entregada por el impacto entre el equipo y una porra (maza ó martillo) de 18 lb (ver Figura 59). Es necesario mencionar que la energía de impacto del equipo estaba situada en la posición de menor energía (mínima compresión de los resortes).

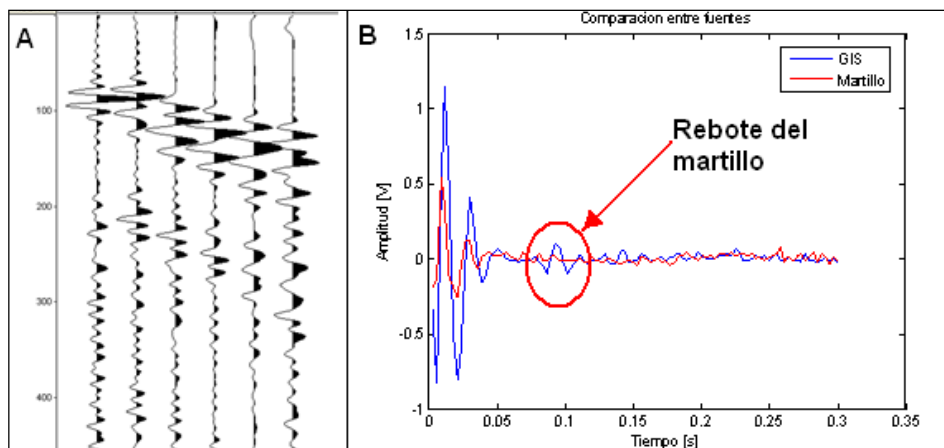


**Figura 59.** Comparación entre fuentes

## 6.2 Adquisición sísmica, Octubre 08 de 2008.

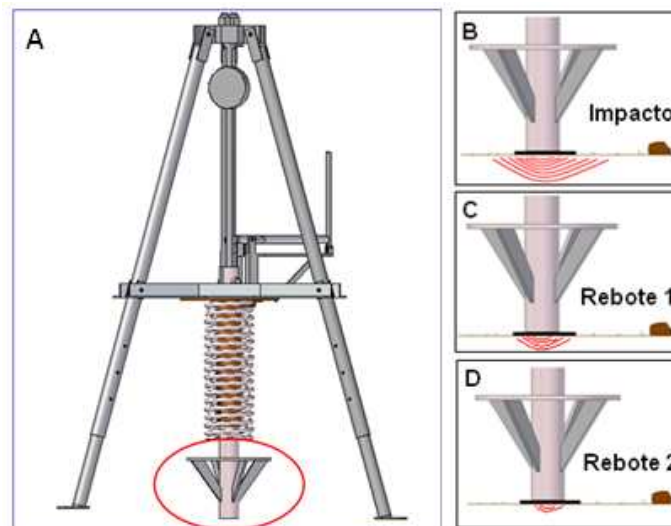
Esta adquisición sísmica se realizó en la cancha de Softbol de la UIS. La adquisición consistió en 3 líneas consecutivas de 5 canales cada línea, con 6 disparos por línea. La distancia entre canales fue 5 m, luego abarcamos una distancia de 20 m por línea. La distancia entre disparos fue de 5 m. El mínimo offset fue de 2.5 m y el máximo de 22.5 m.

La imagen de apilado se puede observar en la Figura 60.(a). En esta adquisición también se encontró un problema relacionado con el rebote o reverberación del martillo. Este fenómeno ocurre por la reacción que tiene el martillo al ser impactado contra la platina ubicada sobre la superficie de la tierra. El rebote tiene como consecuencia en la adquisición, la captación de ruido por parte de los geófonos que es muy difícil de limpiar en el procesamiento, por esta razón era necesario corregir este problema.



**Figura 60.** (a) Imagen de apilado  
(b) Rebote del martillo

En el rebote del martillo, lo que realmente ocurre es que este entrega su energía en el impacto (ver Figura 61.(b)) al ser disparado el equipo (ver Figura 61.(a)), después del impacto ocurren los rebotes (cada vez con menor energía) (ver Figura 68.(c) y (d)).



**Figura 61.** (a) Conjunto equipo  
(b) Impacto. (c) y (d) Rebotes

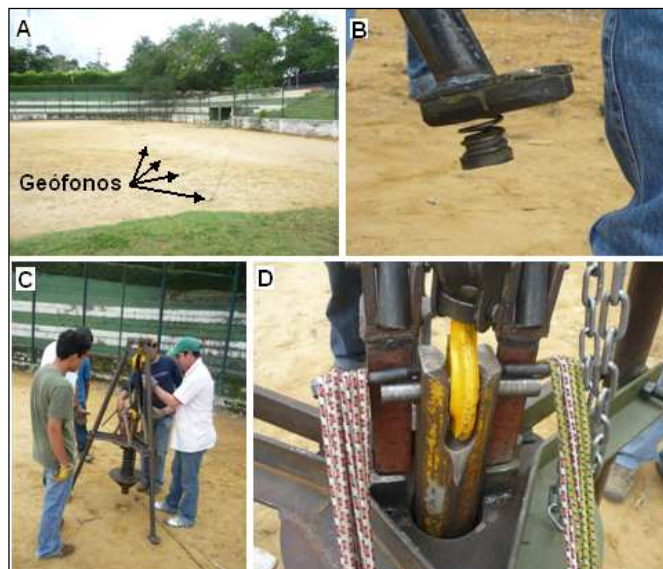
Para este problema se planteó como solución el pretensionamiento del martillo contra la platina de acero (ubicada sobre la superficie de la tierra). Este pretensionamiento fue llevado a cabo instalando bandas elásticas (pulpos) enganchadas a unas varillas soldadas al disco de la unión inferior (ver Figura 62.). Estas bandas iban a ambos lados del martillo sujetas a éste por medio de dos tornillos, los cuales estaban atornillados al mismo. Las bandas ejercen un pretensionamiento en la posición de no disparo del equipo, las cuales ejercen una fuerza que obliga al martillo a estar ejerciendo la misma fuerza contra la tierra (ó platina), de manera que cuando este impacte, la fuerza de pretensionamiento obligue al martillo a estar ejerciendo contacto con la tierra, de modo que no haya rebote .



**Figura 62.** Montaje del martillo pre-tensionado

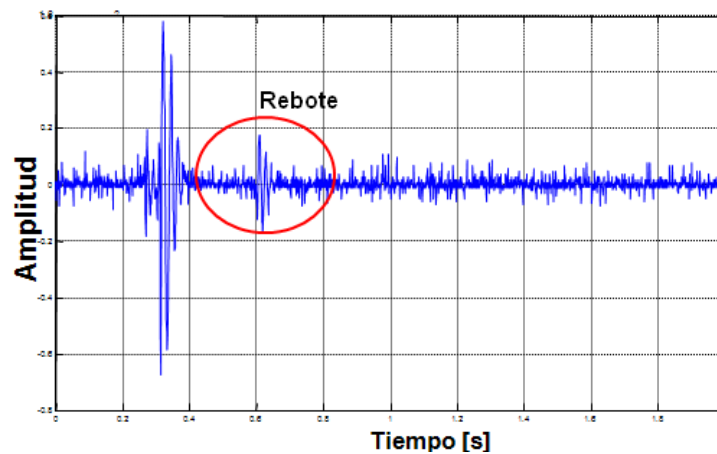
### 6.3 Adquisición sísmica, Noviembre 05 de 2008.

Esta adquisición sísmica fue llevada a cabo en la cancha de softbol de la UIS (ver Figura 63.(a)). El objetivo de esta adquisición era probar el buen funcionamiento de los resortes a compresión (ver Figura 63.(b)) ubicados en las patas inferiores y probar el pretensionamiento (ver Figura 63.(c) y (d)) con el fin de observar si se producía o no, rebote del martillo.



**Figura 63.** (a) Cancha Softbol UIS. (b) Resorte pata  
(c) Equipo. (d) Pretensionamiento

Después se realizó la respectiva prueba y se notó en las señales captadas y visualmente, que la señal contenía menor ruido que en las adquisiciones anteriores, también que la amortiguación en las patas para el salto del equipo funcionó bien y disminuyó ruido considerable, al mismo tiempo que la vibración de los resortes que entregan la energía de impacto se había eliminado. Además, se notó por las imágenes, que el rebote seguía existiendo (ver Figura 64) y que el pretensionamiento no había cumplido con el objetivo de quitar ó al menos disminuir la amplitud del rebote.



**Figura 64.** Rebote del martillo

Debido al inconveniente del rebote, se optó por entender por completo la dinámica del martillo al chocar contra la platina de metal ubicada sobre la superficie de la tierra. Por conceptos físicos, se asume que el equipo es disparado, los resortes (con constante elástica de 100.000 N/m aprox.) entregan la energía al martillo, éste se empieza a acelerar hasta impactar la platina, luego del choque, el martillo rebota con una velocidad inicial y sube hasta donde su velocidad es cero, luego éste cae por gravedad, impacta de nuevo la platina y así sucesivamente para los otros rebotes.

Después de comprender esta dinámica, se propuso diseñar dos resortes a tensión, de manera que soportaran el peso del martillo por gravedad en el

instante en que fuese a ocurrir el rebote. Teniendo en cuenta esta idea, los resortes a tensión fueron instalados entre el disco de la unión inferior y el disco del martillo (ver Figura 65.(a) y (b)), estos deben evitar que el martillo haga contacto con la platina cuando ya se presenten los rebotes.



**Figura 65.** (a) Conjunto con resortes a tensión  
(b) Detalle de resortes a tensión

#### **6.4 Prueba Rebote, Diciembre 17 de 2008.**

Esta prueba, se llevó a cabo en la zona verde de la escuela de Ing. Mecánica de la UIS (ver Figura 66). La prueba consistió en observar si la señal generada por el equipo y reproducida en MATLAB, tenía algún rebote.



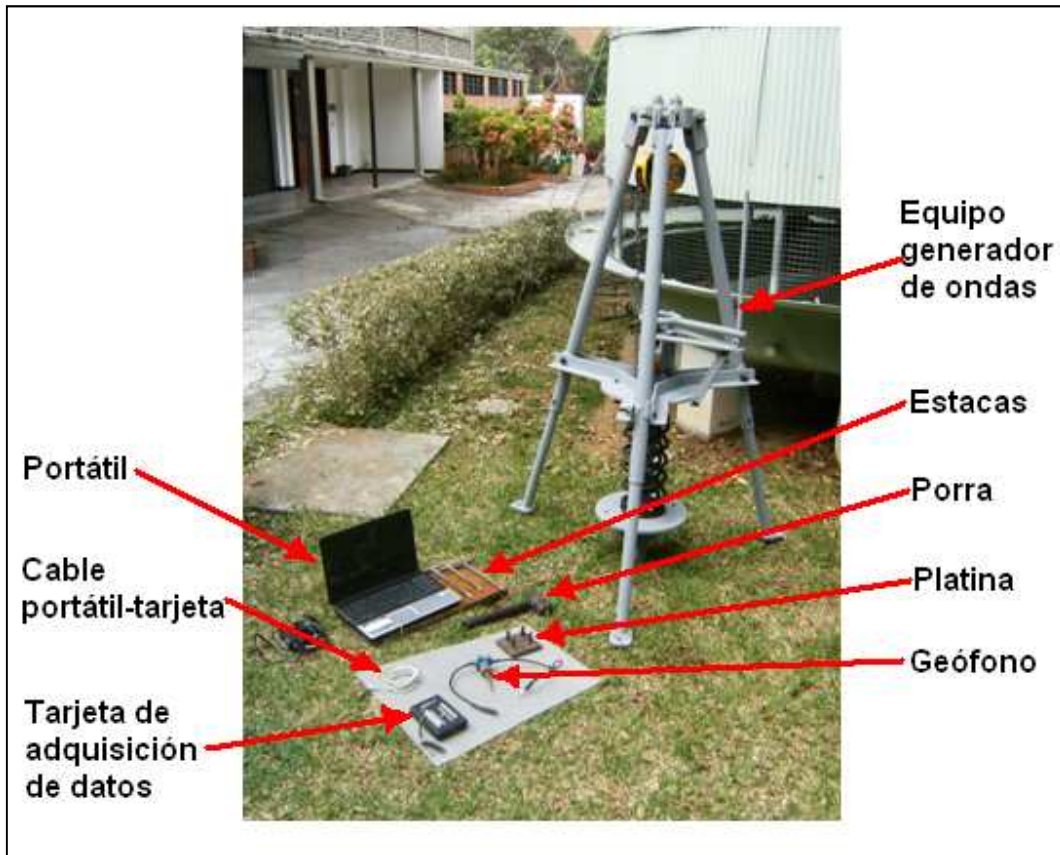
**Figura 66.** Adquisición prueba de rebote

Los resortes a tensión utilizados son los observados en la siguiente figura.



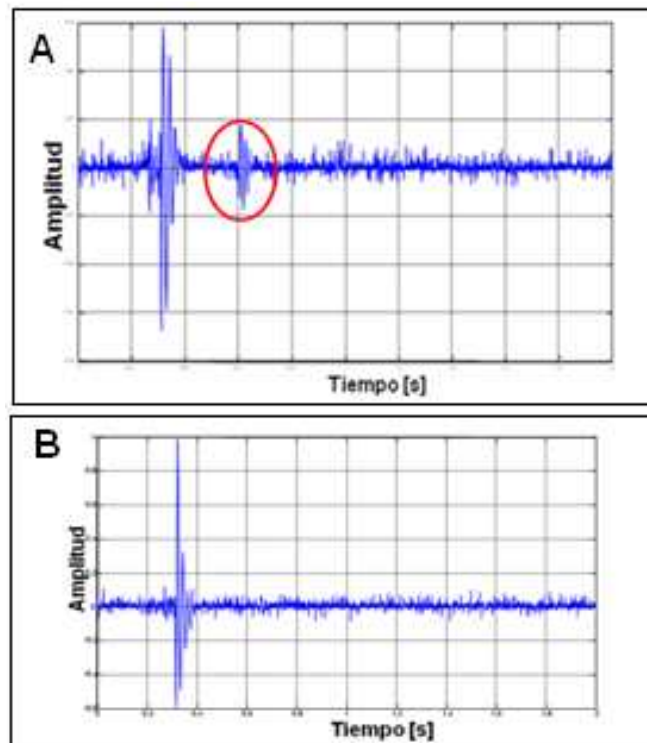
**Figura 67.** Resortes a tensión

Para realizar la prueba, se dispuso del equipo de adquisición sísmica con el cual hemos trabajado (ver Figura 68). Este equipo consta de portátil, geófonos, tarjeta de adquisición, estacas, porra, platina, equipo generador de ondas y cables de conexión.



**Figura 68.** Equipo de adquisición sísmica

Los datos que se obtuvieron en esta prueba corresponden a la energía obtenida por los dos resortes a compresión en paralelo (los dos montados en el equipo), la compresión de estos resortes fue de 15 cm. El equipo fue anclado con las estacas para evitar su salto. Para el primer disparo, éste se llevó a cabo sin los resortes de tensión (ver Figura 69.(a)), en el segundo disparo, los resortes a tensión fueron ubicados en el equipo (ver Figura 69.(b))



**Figura 69.** (a) Sin resortes de tensionamiento  
(b) Con resortes de tensionamiento

Finalmente, por las gráficas de Matlab, se notó que el rebote había sido solucionado por medio de los resortes a tensión.

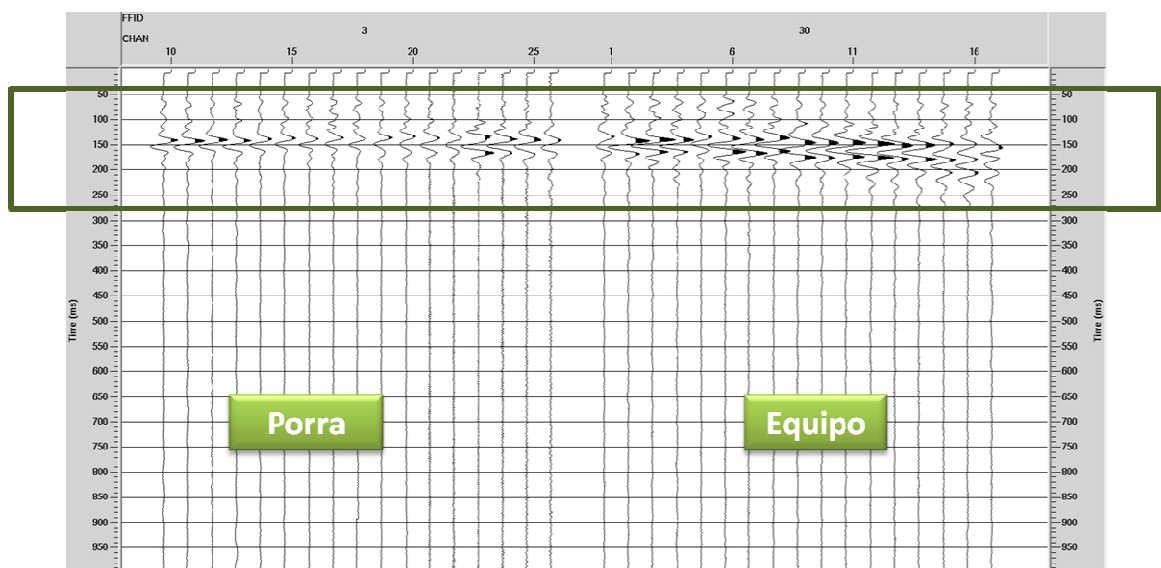
### 6.5 Adquisición sísmica, Abril 07 de 2009.

Esta adquisición fue llevada a cabo sobre la vía que conduce hacia los Ermitaños, contigua a las instalaciones del ICP en Piedecuesta. El objetivo de esta adquisición es comparar la misma línea (establecida espacialmente) utilizando dos fuentes diferentes, el equipo y porra (Ver Figura 70), extraer las imágenes en 2D y generar conclusiones al respecto.



Los resultados obtenidos fueron procesados y analizados en el software ProMAX por el Geofísico Andrés E. Calle, Ecopetrol-ICP. Estos resultados se analizaron individualmente para Equipo y Porra (ver Figuras 72-78); y cada fuente (Equipo y Porra) se analizó en sus tres componentes: Vertical, Radial y Transversa, por ser geófono multicomponente.

Componente vertical:



**Figura 72.** Comparación componente vertical Equipo-Porra

**Conclusión:** Mejor resolución vertical aparente.

Componente vertical, Equipo y Porra, respectivamente:

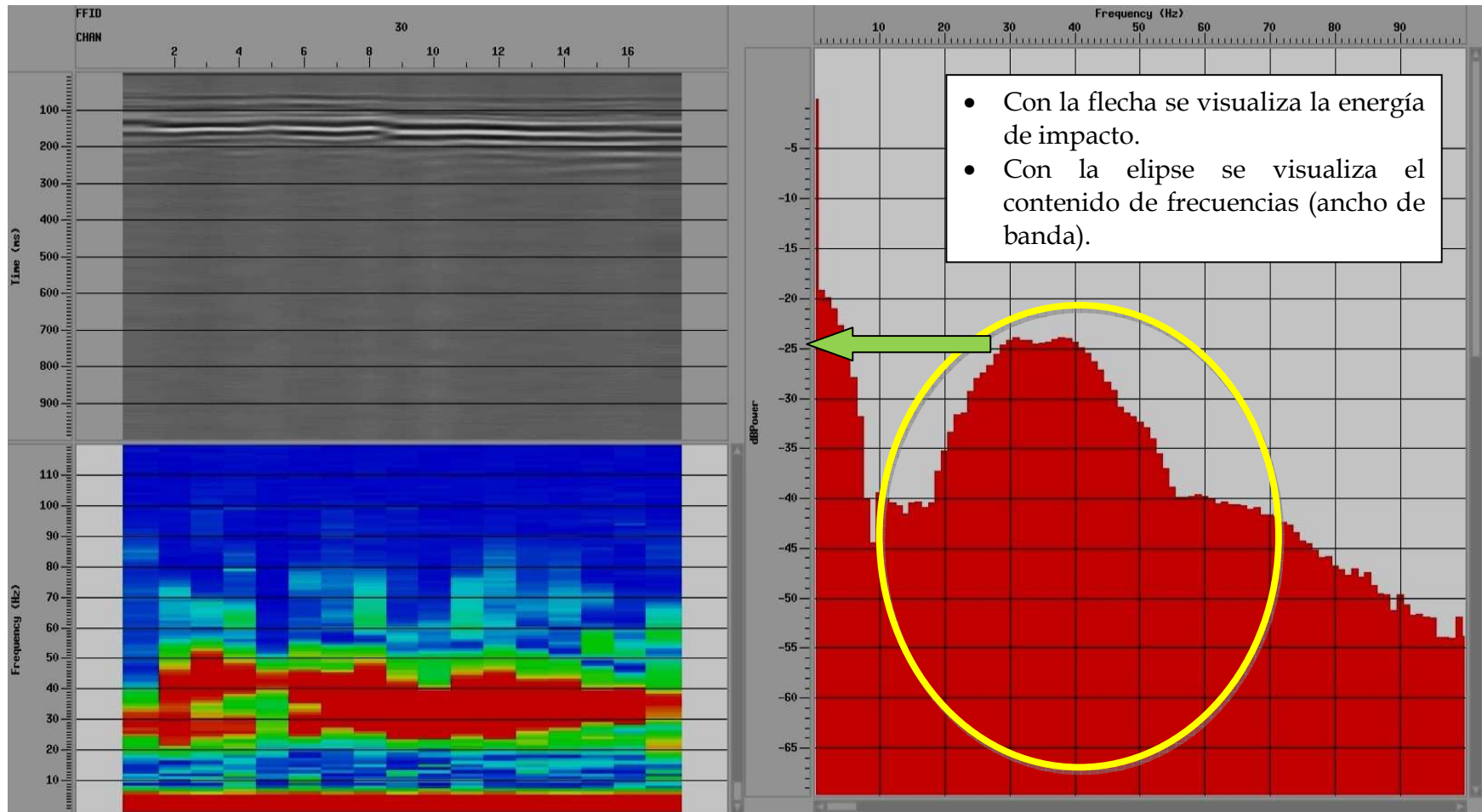


Figura 73. Componente vertical - Equipo

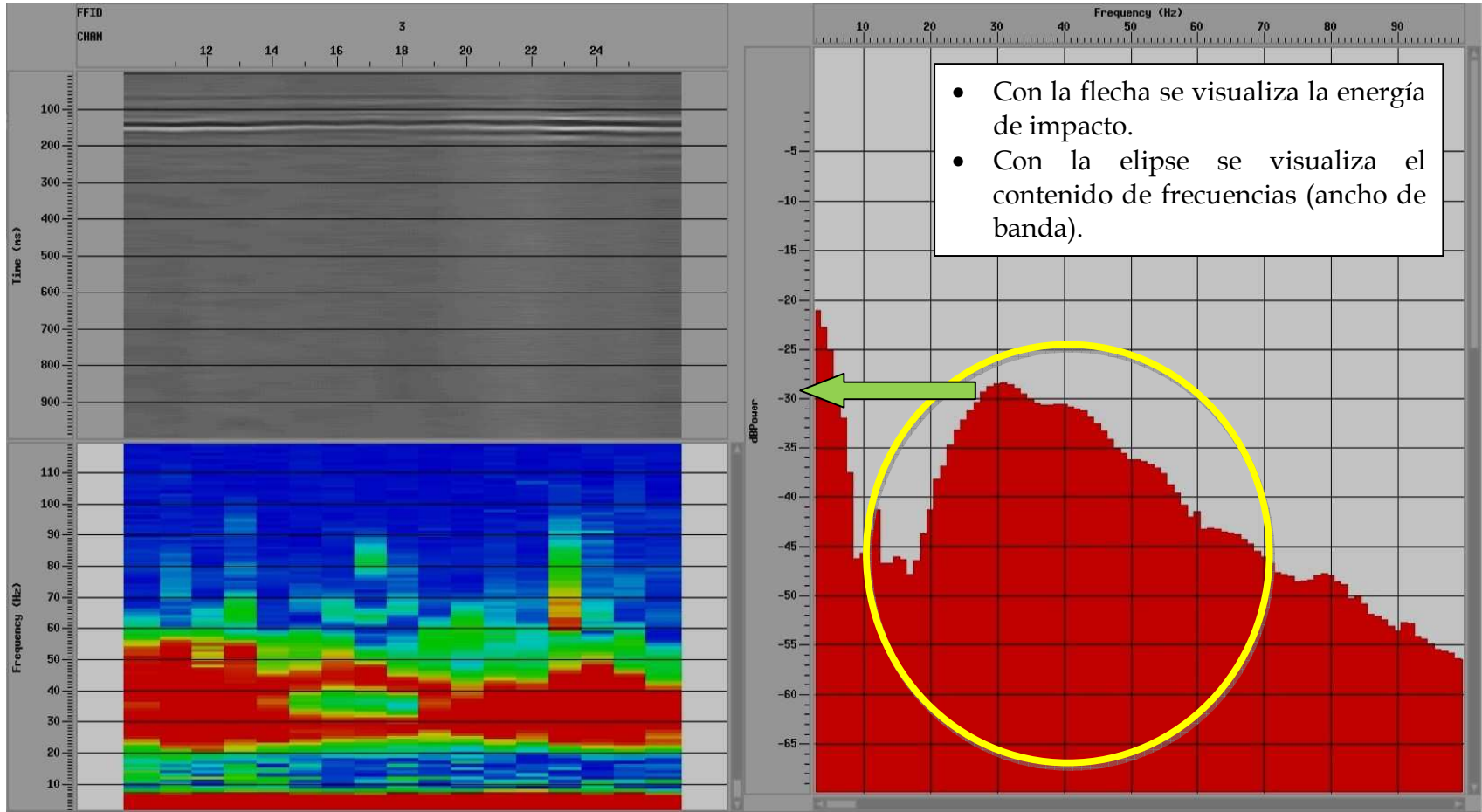


Figura 74. Componente vertical – Porra

**Conclusión:** El equipo posee mayor energía y un leve contenido de frecuencias superior.

Componente radial, Equipo y Porra, respectivamente:

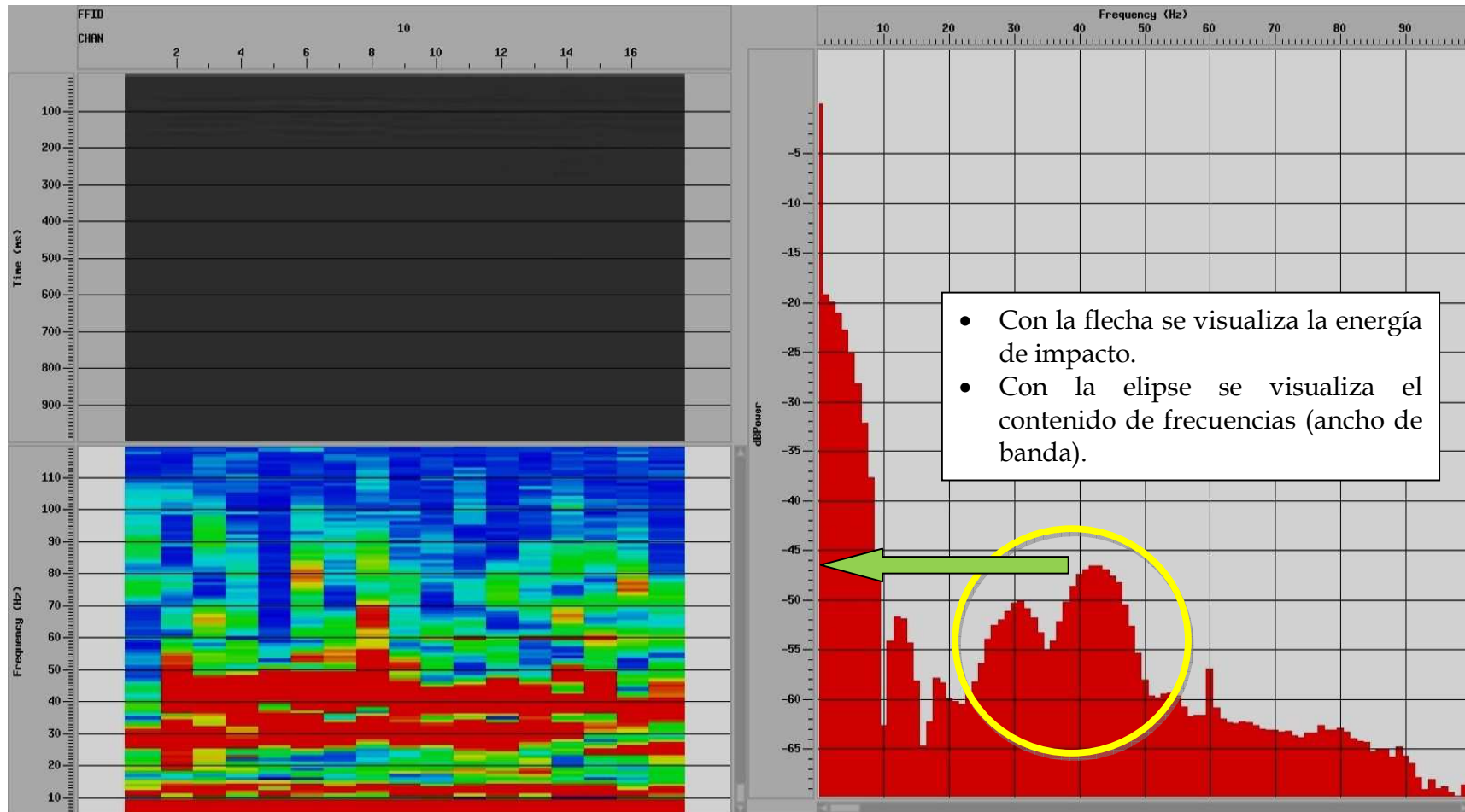


Figura 75. Componente radial - Equipo

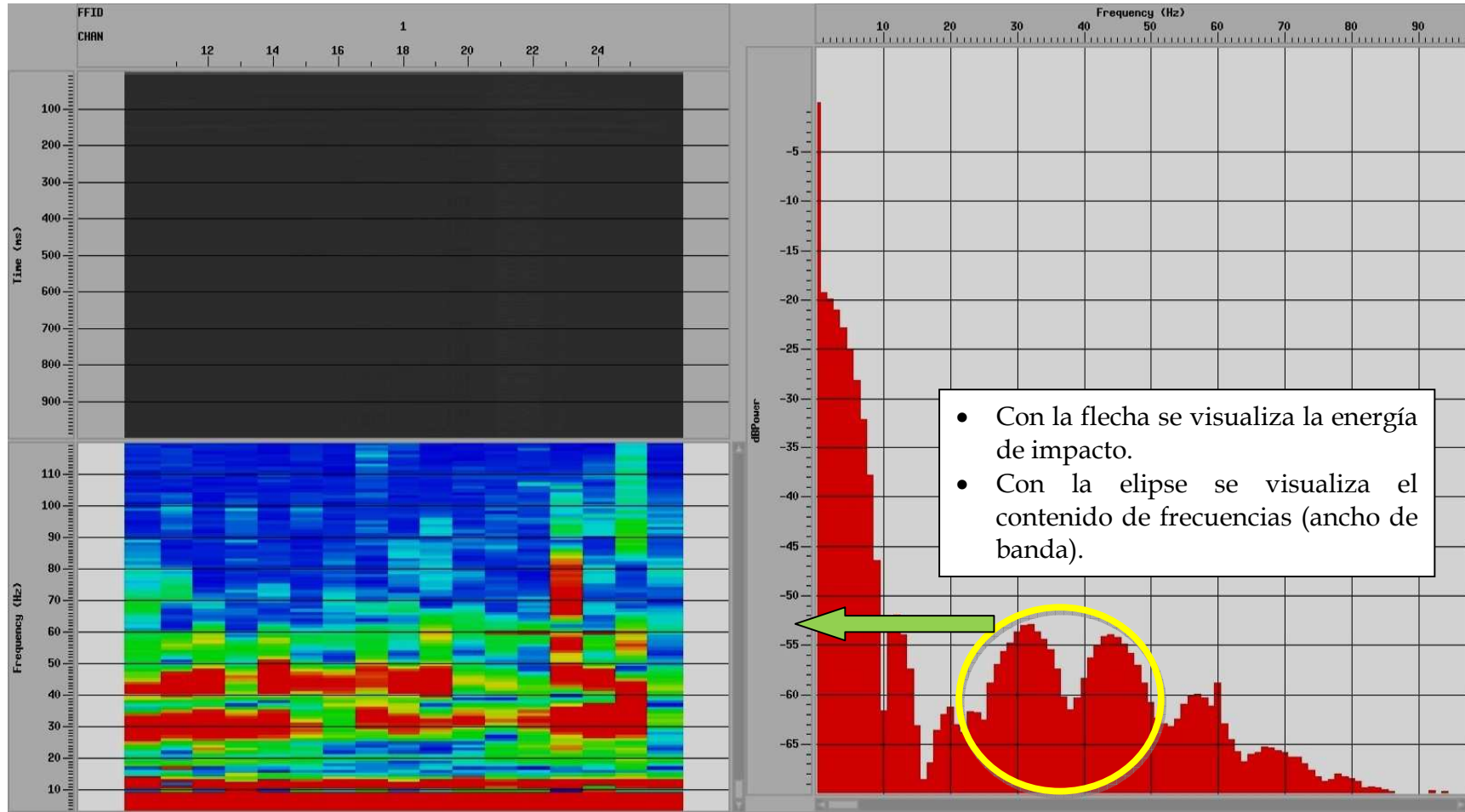


Figura 76. Componente radial – Porra

**Conclusión:** El equipo posee mayor energía

Componente transversal, Equipo y Porra, respectivamente:

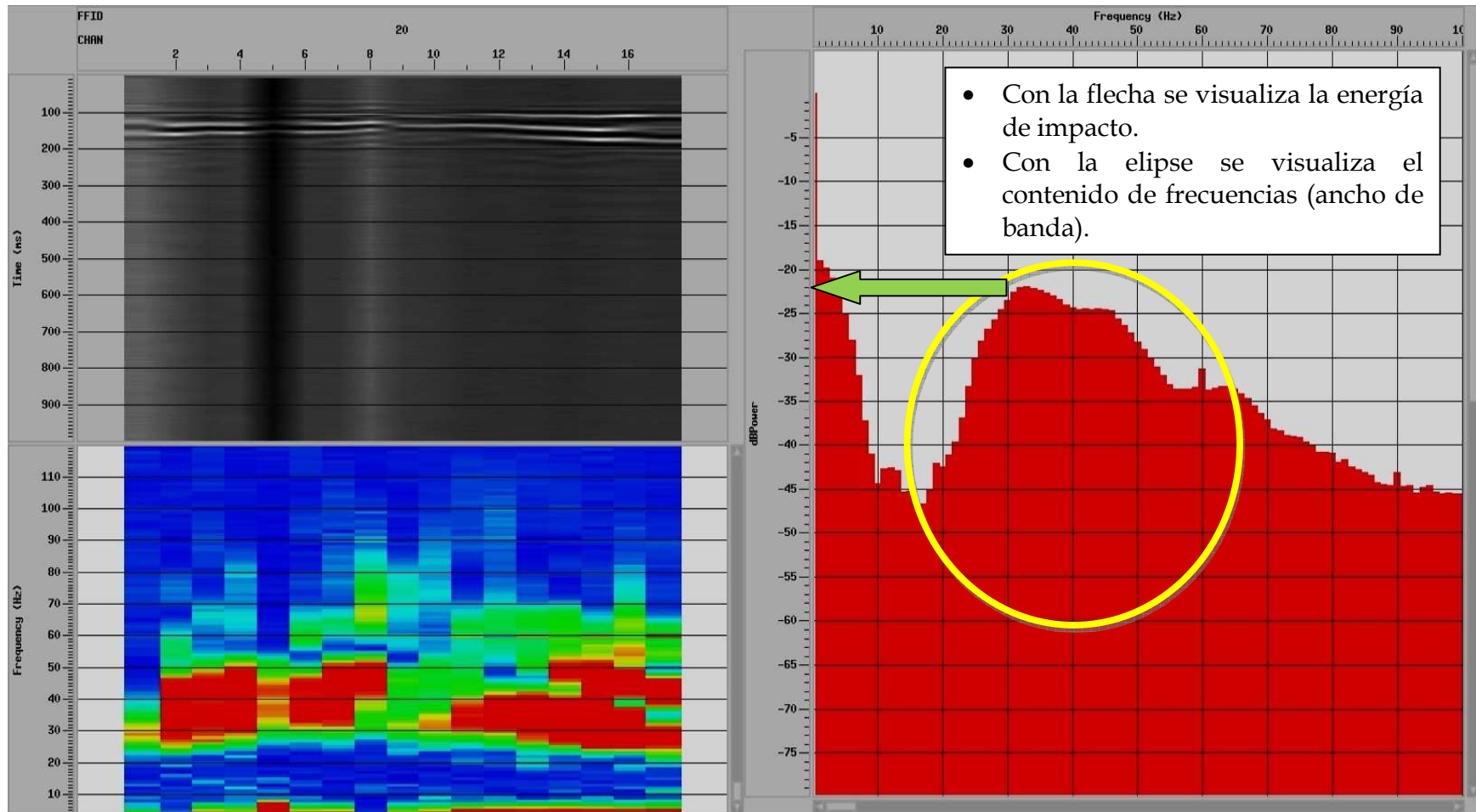
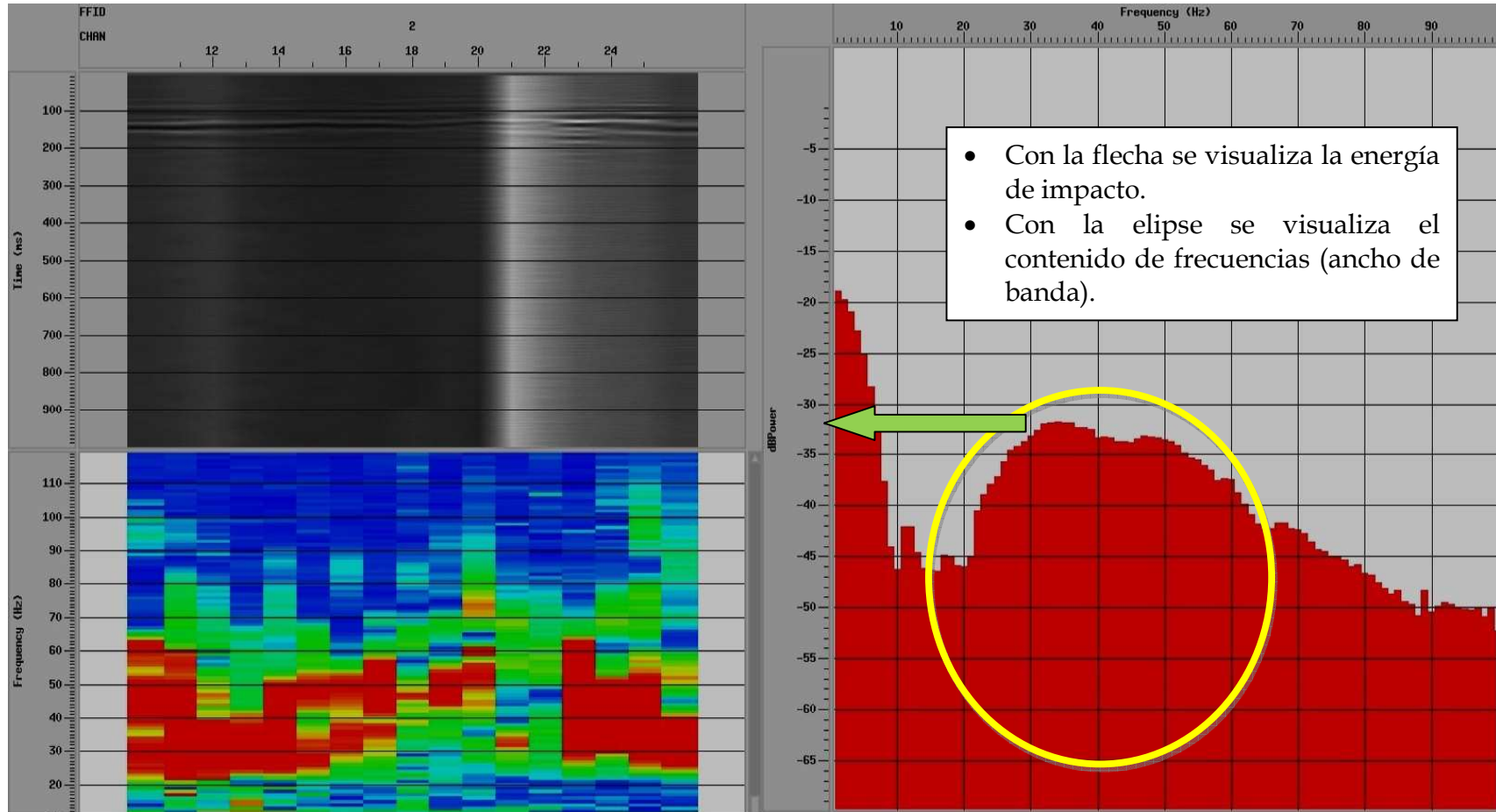


Figura 77. Componente transversal - Equipo



**Figura 78.** Componente transversal – Porra

**Conclusión:** El equipo posee mayor energía y un leve contenido de frecuencias superior.

## 7. ESPECIFICACIONES GENERALES DEL EQUIPO

### 7.1 Ficha técnica

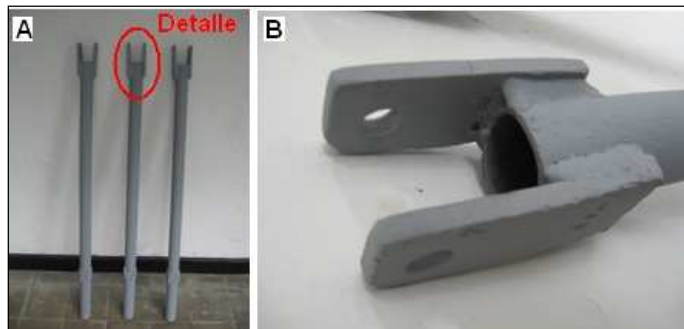
Descripción	Fuente de energía sísmica por impacto
Tipo	Equipo mecánico cargado por medio de una diferencial. Este equipo acelera una masa que da el impacto.
Acelerador del martillo	Dos resortes en paralelo con constante elástica total de 100.000 N/m aprox.
Peso de la masa ó martillo	30 Kg
Peso total del equipo	98 Kg aprox.
Energía de impacto	1.500 N.m aprox.
Carrera del martillo	13 – 15 – 17 cm
Platina de impacto	15 X 15 X 2.5 cm

**Tabla 11.** Ficha técnica del equipo

### 7.2 Módulos del equipo

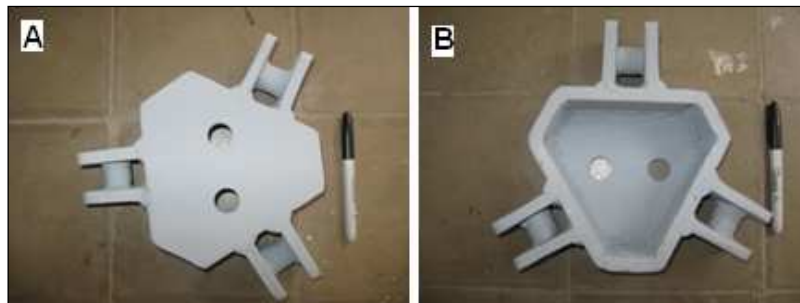
Para poder llevar a cabo el ensamble del todo el equipo, inicialmente es necesario identificar los diferentes módulos que componen la máquina:

✓ Patas superiores:



**Figura 79.** (a) Patas superiores. (b) Detalle pata superior

✓ Unión superior:



**Figura 80.** Unión superior (a) Vista superior  
(b) Vista inferior

✓ Tornillos 5/8":



**Figura 81.** Tornillos 5/8"

✓ Patas inferiores:



**Figura 82.** (a) y (b) Patas inferiores  
(c), (d) y (e) Detalles patas inferiores

✓ Tornillos 5/16":



**Figura 83.** Tornillos 5/16"

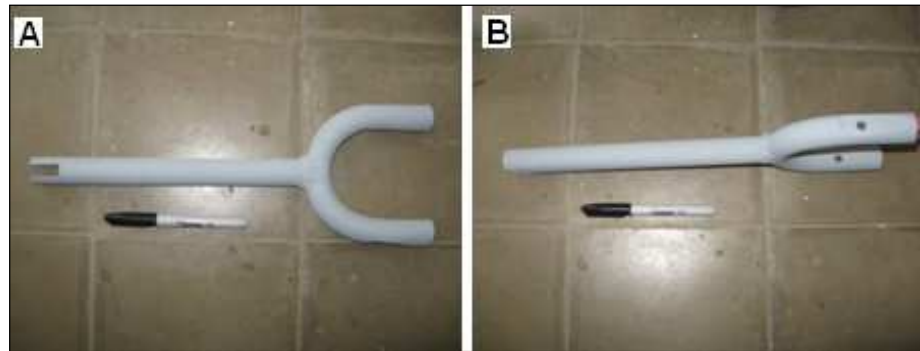
✓ Unión inferior:



**Figura 84.** Unión inferior. (a) Vista isométrica  
(b) Vista inferior. (c) Vista superior

✓ Sistema de disparo:

- Palanca principal:



**Figura 85.** Palanca principal. (a) Vista superior  
(b) Vista lateral

- Palanca secundaria:



**Figura 86.** (a) Palanca secundaria  
(b) y (c) Detalle palanca secundaria

- Soporte:



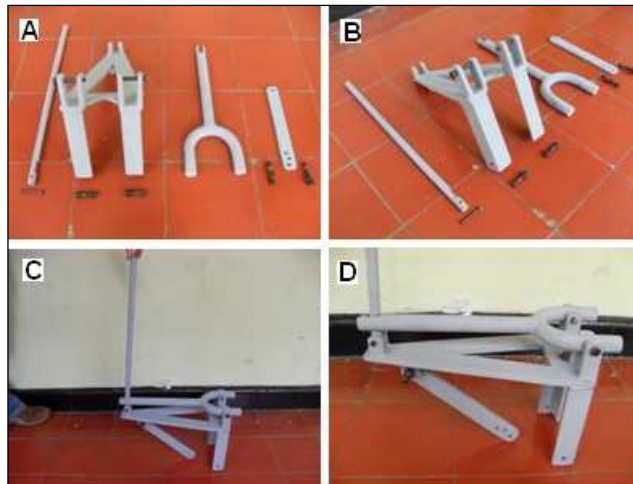
**Figura 87.** Soporte. (a) Vista isométrica  
(b) Vista superior. (c) Vista lateral

- Barra de apoyo:



**Figura 88.** Barra de apoyo

- Ensamble sistema de disparo:



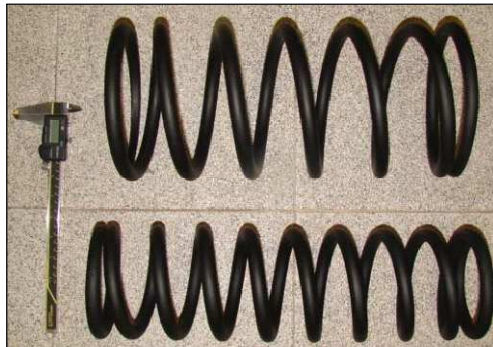
**Figura 89.** Sistema de disparo. (a) y (b) Piezas  
(c) y (d) Ensamble

- ✓ Martillo:



**Figura 90.** (a) Martillo. (b) Detalle 1.  
(c) Detalle2

✓ Resortes:



**Figura 91.** Resortes

✓ Soportes resortes:



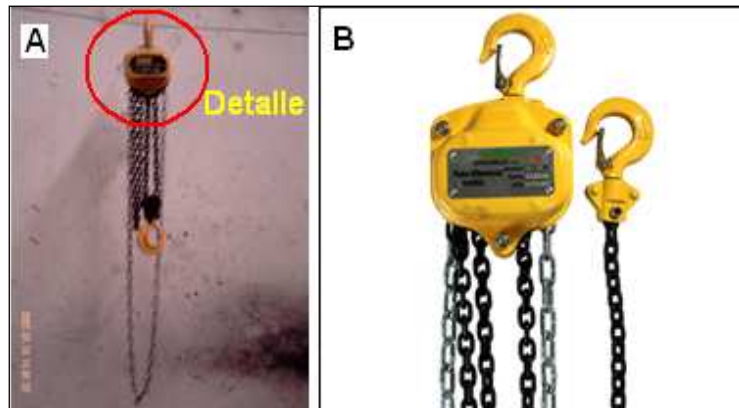
**Figura 92.** Soportes de resortes

✓ Elemento de sujeción en U



**Figura 93.** Elemento de sujeción en U

✓ Diferencial



**Figura 94.** (a) Diferencial  
(b) Detalle de la diferencial

✓ Pasador:



**Figura 95.** Pasador 2510

✓ Resortes a tensión:



**Figura 96.** Resortes a tensión

### 7.3 Ensamble del equipo.

Antes de empezar el ensamble del equipo, se deben tener algunas consideraciones previas para el buen funcionamiento de este:

- ✓ El terreno debe ser lo más plano posible, de modo que el equipo esté nivelado para realizar los impactos, si esta condición es difícil de obtener, las patas inferiores se pueden insertar ó extraer de las patas superiores de manera que se nivele el equipo; al mismo tiempo se busca que el terreno sea estable.
- ✓ Al momento de realizar el ensamble es recomendable por seguridad utilizar guantes y casco.

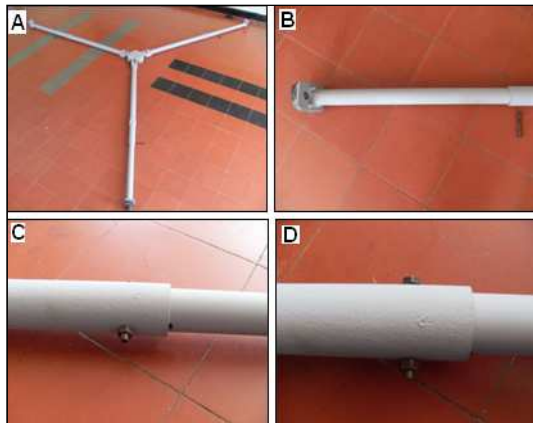
Teniendo en cuenta que ya se conocen todos los módulos del equipo y que las recomendaciones ya fueron tenidas en cuenta, los pasos para realizar el ensamble son los siguientes:

1. Ensamblar las patas superiores a la unión superior con los tornillos de 5/8" (ver Figura 97).



**Figura 97.** Ensamble patas superiores - unión superior

2. Insertar las patas inferiores en las patas superiores (ver Figura 98.(a) y (b)), después insertar el tornillo-pasador para unir las patas (ver Figura 100.C.D). El pasador se debe insertar en el segundo agujero de abajo hacia arriba de la pata inferior (esta es la óptima posición de trabajo).



**Figura 98.** Ensamble patas superiores con inferiores

3. Levantar el trípode (ver Figura 99).



**Figura 99.** Trípode

4. Ensamblar la unión inferior a las patas superiores, esta se debe sujetar en sus tres extremos y después insertar los tornillos de 5/8", para hacer la conexión.



**Figura 100.** Ensamble patas superiores – unión inferior

5. Ubicar todas las partes que componen el sistema de disparo (ver Figura 101)



**Figura 101.** Partes sistema de disparo

- Después ensamblar todas las partes del sistema de disparo (ver Figura 102)



**Figura 102.** Ensamble sistema de disparo

- Ubicar el conjunto del sistema de disparo en el equipo (ver Figura 103.(a)), después sujetarlo con los tornillos de 3/8", como se observa en la Figura 103.(b).

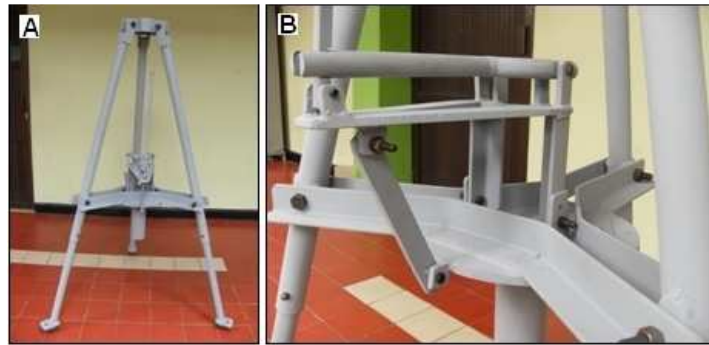


Figura 103. (a) Sistema de disparo en el equipo  
(b) Sujeción del sistema de disparo en el equipo

- Insertar los resortes en el martillo, de manera que estos se apoyen en el disco que está soldado al mismo (ver Figura 104).



**Figura 104.** Resortes insertados en el martillo

Después inclinar el equipo para insertar el martillo (junto con los resortes) por el tubo guía de la unión inferior (ver Figura 105.(a)). Seguidamente el equipo puede ser puesto en posición normal para que el martillo y resortes sean insertados completamente en el tubo guía de la unión inferior (ver Figura 105.(b)).



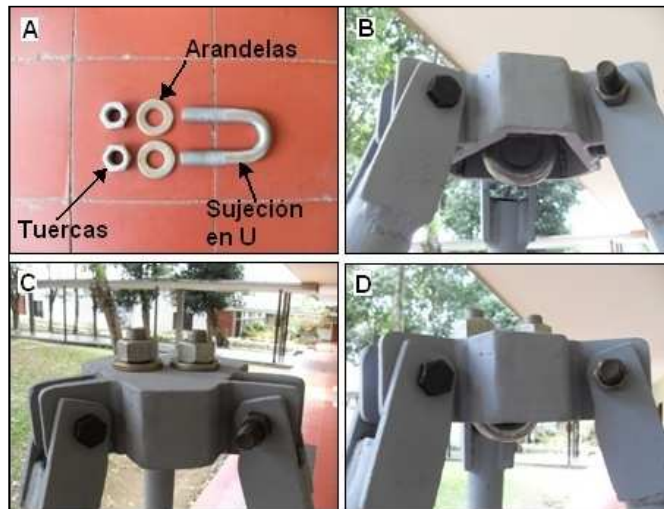
**Figura 105.** Ensamble martillo y resortes en equipo

8. Insertar los soportes de los resortes en la unión inferior y sujetarlos con tornillos de 3/8". Después sujetar los resortes con los soportes.



**Figura 106.** (a) Soporte resortes  
(c) y (d) Soportes en el equipo

9. Insertar el elemento de sujeción en U (ver Figura 107.(a)) en la unión superior (ver Figura 107.(b)), después ubicar las arandelas en la U para finalmente ensamblarlo con las tuercas en la unión superior (ver Figura 107.(c) y (d)).



**Figura 107.** (a) Elemento sujeción, arandelas y tuercas  
 (b), (c) y (d) Ensamble unión superior-sujeción en U

10. Colgar la diferencial en la sujeción en U, ubicada bajo la unión superior.



**Figura 108.** Diferencial ubicada en el equipo

11. Insertar el pasador 2510 (ver Figura 109.(a)) en la parte superior del martillo (ver Figura 109.(c) y (d)).



**Figura 109.** (a) Pasador 2510.  
(b) y (c) Pasador insertado en el martillo

12. Instalar los resortes a tensión entre el disco de la unión inferior y el disco del martillo. Primero es necesario insertar el gancho de los resortes a tensión en las tuercas soldadas a la tapa de la unión inferior (ver Figura 110).



**Figura 110.** Resortes a tensión colgados de la unión inferior

Es necesario subir el martillo con la diferencial para poder enganchar los resortes a tensión con las tuercas soldadas al disco del martillo. Antes de subir el martillo, es de vital importancia tener en cuenta que la palanca principal se debe inclinar para que el pasador 2510 suba sin ninguna interrupción en su ascenso (ver Figura 111).



**Figura 111.** Inclinación de la palanca principal para el ascenso martillo

Después de subir correctamente el martillo, los resortes a tensión son enganchados a las tuercas soldadas al disco del martillo (ver Figura 112).



**Figura 112.** Resortes a tensión enganchados al martillo

13. Finalmente el equipo completamente ensamblado, se observará como en la siguiente figura.



**Figura 113.** Equipo ensamblado

#### **7.4 Protocolo de operación del equipo**

Después de tener completamente ensamblado el equipo, se deben tener en cuenta algunas recomendaciones para su operación, estas son:

- ✓ Tener accesorios que brinden seguridad para la operación como gafas, guantes y casco.
- ✓ Verificar que:
  - El equipo esté nivelado.
  - Los resortes a compresión estén bien apoyados y sujetos.
  - Todas las tuercas estén bien apretadas.

- El gancho de la diferencial esté sujetando el martillo por medio del pasador de acero 2510.
- Las cadenas de la diferencial no estén torcidas y enredadas.
- El pasador se encuentre centrado en la cabeza del martillo.

Después de haber tenido en cuenta las recomendaciones anteriores, se puede proceder a trabajar el equipo de la siguiente manera:

1. Anclar con las estacas de acero el equipo a la tierra, para que éste no salte al momento de ser disparado.
2. Enganchar (con el gancho de la diferencial) el pasador ubicado en la parte superior del martillo.
3. Utilizar la diferencial para subir el martillo, tirando una de sus cadenas.
4. Al momento de empezar a subir el martillo, es necesario inclinar (verticalmente) la palanca principal del sistema de disparo, de manera que el martillo no interfiera con esta (al ir subiendo).
5. Después de que el pasador del martillo pase la palanca principal, esta puede ser puesta horizontalmente para ver hasta donde es necesario subir el martillo.
6. Cuando la palanca principal se encuentre en posición horizontal, es necesario apoyarla en el tope de la palanca secundaria, luego el martillo es bajado por la diferencial hasta que éste se apoye sobre la tenaza de la palanca principal. Acá empieza el proceso para dejar el equipo listo para disparar.
7. Al apoyarse el pasador del martillo en la palanca principal, después se debe seguir bajando el gancho de la diferencial de manera que éste pueda ser desenganchado del pasador del martillo. En este instante el operador debe presionar horizontalmente el mango de la palanca secundaria en dirección hacia el equipo, garantizando que este no se dispare.

8. Después se debe observar, que no haya ninguna interferencia de algún elemento con el martillo al momento de que éste descienda. En este momento el equipo ya está completamente cargado.
9. Seguidamente se acciona la palanca secundaria (del sistema de disparo) hacia atrás, de manera que el equipo sea disparado.
10. Después de realizar el disparo, el equipo queda listo para poder llevar a cabo más impactos. Si se van a realizar más disparos, los operadores se deben remitir al paso 1 del protocolo de operación del equipo.

## **7.5 Protocolo de mantenimiento del equipo**

Para la operación normal del equipo generador de ondas acústicas GIS-1500, el mantenimiento es mínimo. El mantenimiento general que se le debe realizar al equipo es un Mantenimiento Preventivo. Este mantenimiento se puede llevar a cabo visualmente.

### **7.5.1 Sistema de disparo**

En el sistema de disparo, se debe tener especial cuidado con la palanca principal, debido a que ésta se puede flectar por sobrecargas o por fatiga. La palanca secundaria debe estarse inspeccionando visualmente en el tope ó área donde se apoya con la palanca secundaria; a pesar de tener tratamiento térmico de endurecimiento, ésta puede desgastarse con el tiempo por factores como fricción y corrosión.

### **7.5.2 Pasador 2510**

Este pasador es de gran utilidad para el funcionamiento del equipo porque por medio de este elemento, el martillo es enganchado por la diferencial y es subido. Además cumple la función pasador de seguridad para que el martillo no salga disparado, si por algún caso el equipo se vuelca (se cae).

Este pasador se debe estar inspeccionando visualmente para observar que no ha sufrido impactos y por consiguiente que no esté flectado.

### **7.5.3 La diferencial**

La diferencial, debe estarse revisando antes de realizar alguna adquisición sísmica, con el fin de ajustar los tornillos los cuales se desajustan producto de la vibración por parte del trinquete y las cadenas al momento de cargar (subir el martillo) y descargar (bajar el gancho de la diferencial para volver a sujetar el martillo) el equipo.

### **7.5.4 Demás módulos del equipo.**

Para los demás módulos del equipo, se debe tener en cuenta que el mantenimiento es preventivo. Es recomendable revisar visualmente todas las partes y módulos que componen el equipo antes de llevar a cabo una adquisición sísmica, con el fin de detectar posibles efectos de mala instalación del equipo, posibles sobrecargas, fatiga, etc.

## CONCLUSIONES

- El equipo generador de ondas acústicas por impacto, presenta las siguientes ventajas:
  - Es un equipo compacto, portable, modular, de fácil ensamble y desmontaje, el cual facilita su operación y traslado por diferentes zonas de topografía Santandereana.
  - Genera ondas acústicas cuando el martillo golpea la platina de acero ubicada sobre la superficie de la tierra a una velocidad de 10 m/s (36 Km/h) (ver Tabla 2).
  - Es operado manualmente y no depende de fuentes de energía convencional (eléctrica, motores de combustión, etc.) para su funcionamiento.
  - El peso total del equipo no sobrepasa los 100 Kg y cada módulo no sobrepasa los 30 Kg, facilitando de esta manera el transporte e instalación.
  
- Se optó por construir el equipo en forma de trípode, debido a que esta configuración hace al equipo portable y estable (para evitar volcamiento) y además involucra menos elementos que garantizan buena estabilidad.
  
- Debido a que el resorte a compresión de 100.000 N/m de constante elástica no se pudo diseñar (en fábricas locales) y no se encontró en el mercado, fue necesario la utilización de dos resortes de manera que garantizaran dicha energía (ver Tabla 3, Figura 13 y Anexo A).
  
- Se llevó a cabo en las palancas principal y secundaria del sistema de disparo un tratamiento térmico de Temple y Revenido con el fin de

aumentar el esfuerzo de fluencia y a la vez aumentar la resistencia al desgaste por fricción.

- Después de construido el equipo, se identificaron tres problemas principales durante las primeras pruebas de campo realizadas: Vibración de los resortes, salto del equipo y rebote del martillo (por medio de resortes a tensión). Las alternativas de solución propuestas para estos problemas fueron efectivas, generándose así, imágenes sísmicas de mejor calidad para su interpretación.
- La última adquisición realizada, evidenció que la energía de impacto y contenido frecuencial del equipo es superior al generado con la porra.
- Debido a la diversidad de terrenos, es difícil establecer niveles constantes de energía por parte del equipo.
- El análisis de elementos finitos realizado en ANSYS, validó el modelamiento matemático que se aplicó en el diseño estructural del equipo.

## RECOMENDACIONES

La energía en un objeto móvil es proporcional a su masa y el cuadrado de su velocidad, si se dobla la masa, se obtiene el doble de energía, pero también se tiene el doble del peso a levantar y transportar. Sin embargo, si se dobla la velocidad se obtiene hasta cuatro veces más energía sin aumentar el peso del mecanismo. Por consiguiente se recomienda disminuir la masa del martillo para hacer el equipo más liviano, lo cual no afecta significativamente la energía de impacto entregada.

Se recomienda aumentar la carrera de aceleración del martillo, con el fin disminuir la fuerza de reacción del equipo (salto) al realizar el disparo; sin embargo si la carrera del martillo es superior a 20 cm, es aconsejable utilizar un sistema automático.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**[1] SHIGLEY, Joseph Edward**, Diseño en Ingeniería Mecánica. Mc. Graw Hill. 2002. 6ª Edición.

**[2] BEER, Ferdinand P. y RUSSELL, Johnston E**, Mecánica de Materiales. Mc. Graw-Hill. 2000.

**[3] ARTOBOLEVSKI, Ivan I**, Mecanismos en la técnica moderna. Moscu: Mir, 1976-1990.

**[4] MILLER, R., PULLAN, S., WALDER, J.** Field Comparison of Shallow Seismic Sources, Geophysics, Vol 51 N° 11 Kansas Geological Survey, USA. (1986).

**[5] STEEPLES, D., KEISWETTER D.**, Practical Modifications to Improve the Sledgehammer Seismic Source, Geophysical Research Letter, Vol 21 N° 20, University of Kansas, USA (1994).

**[6] GISCO.** GISCO ESS200 Electronic Seismic Source. Operation and Maintenance Manual. 2004 Geophysical Instrument Supply Company. [www.giscogeo.com](http://www.giscogeo.com).

## **ANEXOS**

## **ANEXO A**

### **DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE ELÁSTICA DE LOS RESORTES**



SO014 – ID0112 - T67 – 08

Piedecuesta, Agosto 06 de 2008

Ingeniero:  
**Alexander Martinez Ramirez.**  
PROFESIONAL DE PROYECTOS  
ECOPETROL - ICP

Asunto: Pruebas de Laboratorio a dos Resortes de 5" y 7" de Diámetro.

Adjunto enviamos el informe No 08 08-186 de la referencia.

Estamos a su disposición para cualquier consulta adicional.

Cordialmente,

**HECTOR DANILO ORDOÑEZ LOZANO**  
Líder Laboratorio Ingeniería de Materiales

*Vinculada al Ministerio de Minas y Energía  
Autopista a Piedecuesta Km. 7  
Teléfono: (577) 6847001 Fax: (577) 6847443  
[www.ecopetrol.com.co](http://www.ecopetrol.com.co)  
Piedecuesta - Colombia*



**ECOPETROL S. A.**  
**INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLEO**  
**LABORATORIO DE INGENIERIA DE MATERIALES**  
*Pruebas acreditadas por la SIC*

**PRUEBAS DE LABORATORIO A DOS**  
**RESORTES DE 5" Y 7" DE DIAMETRO**  
**(STE. 08 08-186)**

**SOLICITADO POR:** ALEXANDER MARTINEZ RAMIREZ  
PROFESIONAL DE PROYECTOS

**REALIZADO POR:** JULIO ANDRES FORERO A.

**REVISADO POR:** CARLOS JAVIER MATEUS C.

**APROBADO POR:** HECTOR DANILO ORDOÑEZ LOZANO

PIEDRECUESTA – SANTANDER, AGOSTO 06 DE 2008

*Los datos aquí reportados corresponden únicamente a la(s)  
muestra(s) analizadas.  
No pueden ser reproducidos en forma parcial.*

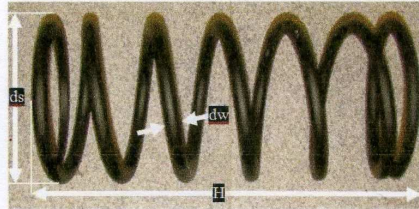
*Pruebas acreditadas por la SIC.  
Resolución No8288 del 31 de Marzo de 2006*

## 1. OBJETIVO

Determinar la constante de elasticidad  $K$  en dos (2) resortes provenientes de la Universidad Industrial de Santander (UIS) entregados por el estudiante de Ingeniería Mecánica Omar Fernando Pinto Quintero.

## 2. MATERIAL INSPECCIONADO

El día 01 de Agosto 2008 el Laboratorio de Ingeniería de Materiales recibió dos resortes de las siguientes características:



Muestra	*Longitud libre H	*Diámetro del Resorte – ds	*Diámetro del alambre -dw
Resorte 1 – M1	17.5	5	0.629
Resorte 2 – M2	15.0	7	0.649

\*Unidades en pulgadas

Para las pruebas de laboratorio las muestras fueron codificadas con el consecutivo interno 08 08-186. La Figura 1 ilustra el material recibido para estudio.

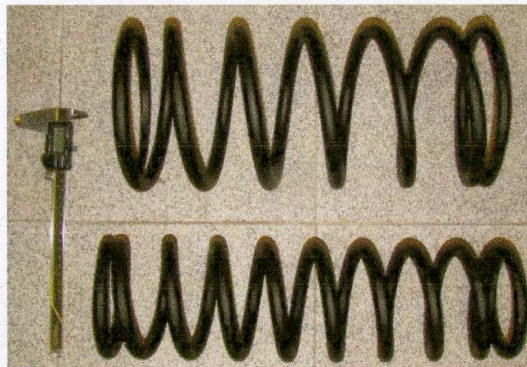


Figura 1. Muestras recibidas para realizar el ensayo.

Los datos aquí reportados corresponden únicamente a la(s) muestra(s) analizadas.  
No pueden ser reproducidos en forma parcial.

Pruebas acreditadas por la SIC.  
Resolución No8288 del 31 de Marzo de 2006

### 3. RESULTADOS DEL ENSAYO

#### 3.1 Determinación de la Constante de Elasticidad:

Se determinó el valor de la constante de elasticidad K a 2 resortes usados según información del estudiante y se acondicionaron para el ensayo el cual se realizó utilizando la máquina universal de ensayos MTS modelo 810, del Laboratorio de Ingeniería de Materiales. Los resultados de este ensayo se reportan en la Tabla 1.

En la Figura 2 se observan el montaje de las muestras para la realización del ensayo.

Tabla 1. Resultados de la constante de elasticidad K.

Resorte 7" –M2		Carga	Constante K	Resorte 5" –M1		Carga	Constante K
Desplazamiento				Desplazamiento			
mm	m	kN	kN/m	mm	m	kN	kN/m
40	0.04	1.64	<b>41.00</b>	40	0.04	2.60	<b>65.00</b>
50	0.05	1.97	<b>39.40</b>	50	0.05	3.16	<b>63.20</b>
60	0.06	2.29	<b>38.17</b>	60	0.06	3.71	<b>61.83</b>
70	0.07	2.62	<b>37.43</b>	70	0.07	4.27	<b>61.00</b>
80	0.08	2.95	<b>36.88</b>	80	0.08	4.82	<b>60.25</b>
90	0.09	3.28	<b>36.44</b>	90	0.09	5.38	<b>59.78</b>
100	0.10	3.62	<b>36.20</b>	100	0.10	5.94	<b>59.40</b>
Promedio		<b>37.93</b>		Promedio		<b>61.49</b>	
Desviación		<b>1.74</b>		Desviación		<b>2.02</b>	

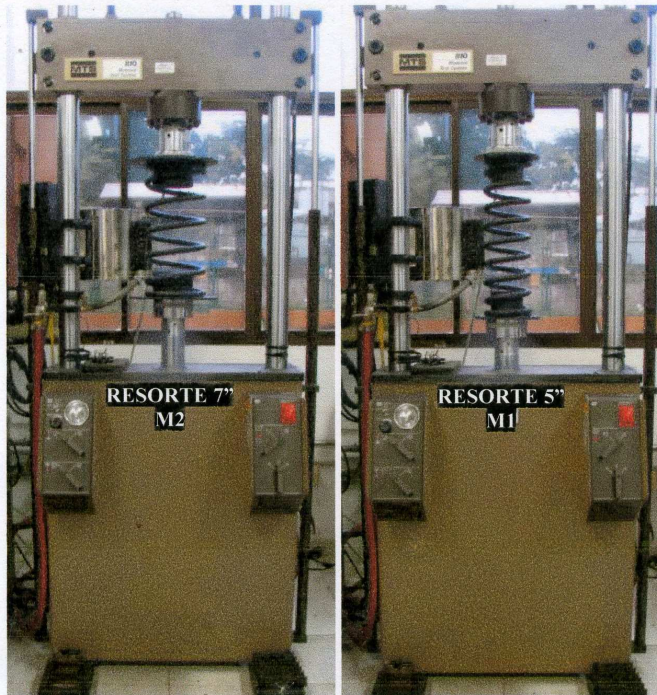


Figura 2. Montaje de los resortes en la Maquina MTS (Material Test System).

Los resultados referidos en este informe solamente corresponden y afectan al área inspeccionada mencionada anteriormente en el ítem 2 Material Inspeccionado.

Este informe puede ser reproducido total pero no parcialmente, excepto cuando se haya obtenido previamente la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite.

**CARLOS JAVIER MATEUS CAICEDO**  
Laboratorio Ingeniería de Materiales

**JULIO ANDRES FORERO ANGARITA**  
Laboratorio Ingeniería de Materiales

**HECTOR DANILO ORDOÑEZ LOZANO**  
Líder Laboratorio Ingeniería de Materiales

Los datos aquí reportados corresponden únicamente a la(s)  
muestra(s) analizadas.  
No pueden ser reproducidos en forma parcial.

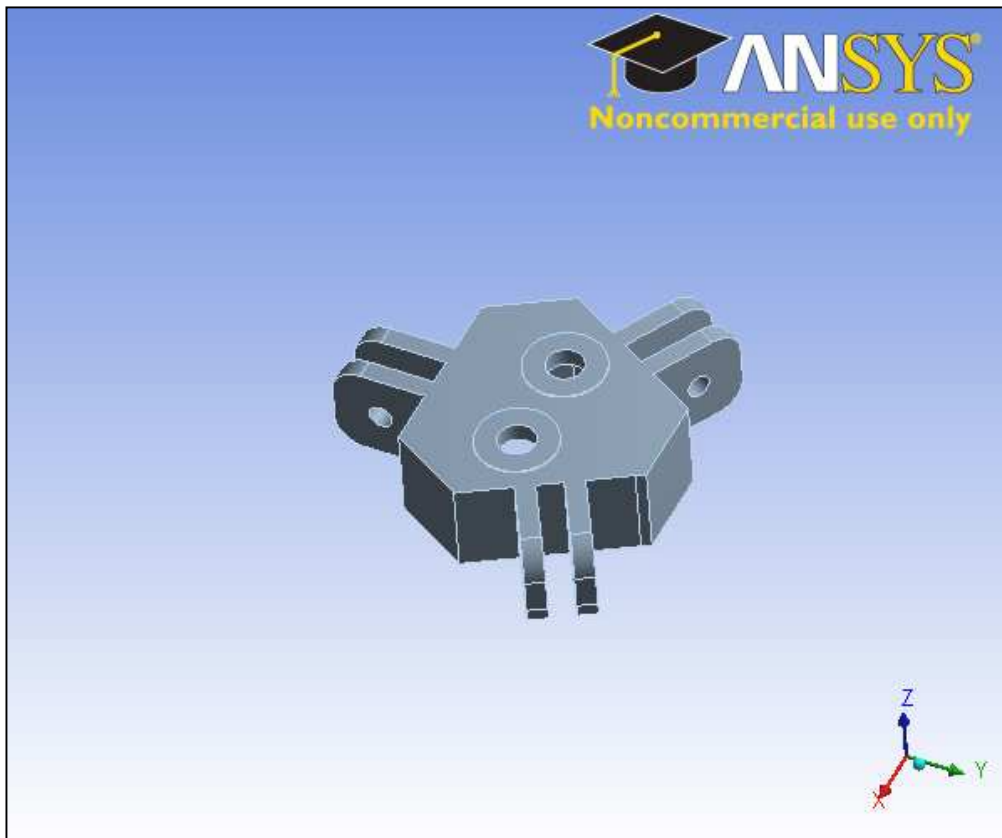
Pruebas acreditadas por la SIC.  
Resolución No8288 del 31 de Marzo de 2006

**ANEXO B. ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR ELEMENTOS FINITOS  
ANSYS - WORKBENCH**



**Project**

First Saved	Monday, March 09, 2009
Last Saved	Tuesday, March 10, 2009
Product Version	11.0 Release



# Contents

- **Union superior**
  - Geometry
    - Part 1
  - Mesh
  - **Static Structural**
    - Analysis Settings
    - Loads
    - Solution
      - Solution Information
      - Results
      - Stress Tool
        - Safety Factor
- **Union Inferior**
  - Geometry
    - Part 1
  - Mesh
  - **Static Structural**
    - Analysis Settings
    - Loads
    - Solution
      - Solution Information
      - Results
      - Stress Tool
        - Safety Factor
- **Pata superior**
  - Geometry
    - Part 1
  - Mesh
  - **Static Structural**
    - Analysis Settings
    - Loads
    - Solution
      - Solution Information
      - Results
      - Stress Tool
        - Safety Factor
- **Material Data**
  - Structural Steel

# Units

**TABLE 1**

Unit System	Metric (m, kg, N, °C, s, V, A)
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s

# Union superior

## Geometry

**TABLE 2**  
**Union superior > Geometry**

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Source	D:\Ansys\union superior.x_t
Type	Parasolid
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Part Color
<b>Bounding Box</b>	
Length X	0,25617 m
Length Y	0,22243 m
Length Z	6,5e-002 m
<b>Properties</b>	
Volume	8,5664e-004 m <sup>3</sup>
Mass	6,7247 kg
<b>Statistics</b>	
Bodies	1
Active Bodies	1
Nodes	6008
Elements	2816
<b>Preferences</b>	
Import Solid Bodies	Yes
Import Surface Bodies	Yes
Import Line Bodies	Yes
Parameter Processing	Yes
Personal Parameter Key	DS
CAD Attribute Transfer	No
Named Selection Processing	No
Material Properties Transfer	No
CAD Associativity	Yes
Import Coordinate Systems	No
Reader Save Part File	No
Import Using Instances	Yes
Do Smart Update	No
Attach File Via Temp File	No
Analysis Type	3-D
Mixed Import Resolution	None
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

**TABLE 3**  
**Union superior > Geometry > Parts**

Object Name	<i>Part 1</i>
State	Meshed
<b>Graphics Properties</b>	
Visible	Yes
Transparency	1
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Material	Structural Steel
Stiffness Behavior	Flexible
Nonlinear Material Effects	Yes
<b>Bounding Box</b>	
Length X	0,25617 m
Length Y	0,22243 m
Length Z	6,5e-002 m
<b>Properties</b>	
Volume	8,5664e-004 m <sup>3</sup>
Mass	6,7247 kg
Centroid X	1,5343e-004 m
Centroid Y	9,0186e-005 m
Centroid Z	3,7105e-002 m
Moment of Inertia Ip1	2,5891e-002 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip2	2,5787e-002 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip3	4,6523e-002 kg·m <sup>2</sup>
<b>Statistics</b>	
Nodes	6008
Elements	2816

## Mesh

**TABLE 4**  
**Union superior > Mesh**

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
<b>Advanced</b>	
Relevance Center	Coarse
Element Size	Default
Shape Checking	Standard Mechanical
Solid Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Low
Transition	Fast

Statistics	
Nodes	6008
Elements	2816

## Static Structural

**TABLE 5**  
**Union superior > Analysis**

Object Name	<i>Static Structural</i>
State	Fully Defined
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Options	
Reference Temp	22, °C

**TABLE 6**  
**Union superior > Static Structural > Analysis Settings**

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
Nonlinear Controls	
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Output Controls	
Calculate Stress	Yes
Calculate Strain	Yes
Calculate Results At	All Time Points
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	D:\Ansys\Analisis GIS1500 Simulation Files\Static Structural\
Future Analysis	None
Save ANSYS db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No

**TABLE 7**  
**Union superior > Static Structural > Loads**

Object Name	<i>Pressure</i>	<i>Pressure 2</i>	<i>Fixed Support</i>
State	Fully Defined		
<b>Scope</b>			
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	1 Face	6 Faces	
<b>Definition</b>			
Define By	Normal To		
Type	Pressure	Fixed Support	
Magnitude	4,5093e+006 Pa (ramped)		
Suppressed	No		

**FIGURE 1**  
**Union superior > Static Structural > Pressure**



**FIGURE 2**  
**Union superior > Static Structural > Pressure 2**



**Solution**

**TABLE 8**  
**Union superior > Static Structural > Solution**

Object Name	<i>Solution</i>
State	Solved
<b>Adaptive Mesh Refinement</b>	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,

**TABLE 9**  
**Union superior > Static Structural > Solution > Solution Information**

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
<b>Solution Information</b>	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Update Interval	2,5 s
Display Points	All

**TABLE 10**  
**Union superior > Static Structural > Solution > Results**

Object	<i>Total</i>	<i>Equivalent</i>	<i>Maximum</i>	<i>Equivalent</i>	<i>Maximum</i>
--------	--------------	-------------------	----------------	-------------------	----------------

Name	<i>Deformation</i>	<i>Elastic Strain</i>	<i>Principal Elastic Strain</i>	<i>Stress</i>	<i>Principal Stress</i>
State	Solved				
<b>Scope</b>					
Geometry	All Bodies				
<b>Definition</b>					
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Elastic Strain	Maximum Principal Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress	Maximum Principal Stress
Display Time	End Time				
<b>Results</b>					
Minimum	0, m	4,0955e-007 m/m	-3,5528e-007 m/m	81910 Pa	-8,2918e+006 Pa
Maximum	2,9167e-005 m	3,013e-004 m/m	1,7217e-004 m/m	6,0259e+007 Pa	3,8013e+007 Pa
<b>Information</b>					
Time	1, s				
Load Step	1				
Substep	1				
Iteration Number	1				

**TABLE 11**  
**Union superior > Static Structural > Solution > Results**

Object Name	<i>Shear Stress</i>
State	Solved
<b>Scope</b>	
Geometry	All Bodies
<b>Definition</b>	
Type	Shear Stress
Orientation	XY Plane
Display Time	End Time
<b>Results</b>	
Minimum	-2,0854e+007 Pa
Maximum	1,948e+007 Pa
<b>Information</b>	
Time	1, s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

**TABLE 12**  
**Union superior > Static Structural > Solution > Stress Safety Tools**

Object Name	<i>Stress Tool</i>
State	Solved
<b>Definition</b>	
Theory	Max Equivalent Stress

Stress Limit Type	Tensile Yield Per Material
-------------------	----------------------------

**TABLE 13**  
**Union superior > Static Structural > Solution > Stress Tool > Results**

Object Name	<i>Safety Factor</i>
State	Solved
<b>Scope</b>	
Geometry	All Bodies
<b>Definition</b>	
Type	Safety Factor
Display Time	End Time
<b>Results</b>	
Minimum	4,1487
<b>Information</b>	
Time	1, s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

## Union Inferior

### *Geometry*

**TABLE 14**  
**Union Inferior > Geometry**

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Source	D:\Ansys\union inferior.x_t
Type	Parasolid
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Part Color
<b>Bounding Box</b>	
Length X	0,72215 m
Length Y	0,83387 m
Length Z	0,3625 m
<b>Properties</b>	
Volume	2,7015e-003 m <sup>3</sup>
Mass	21,207 kg
<b>Statistics</b>	
Bodies	1
Active Bodies	1
Nodes	20392
Elements	9625
<b>Preferences</b>	

Import Solid Bodies	Yes
Import Surface Bodies	Yes
Import Line Bodies	Yes
Parameter Processing	Yes
Personal Parameter Key	DS
CAD Attribute Transfer	No
Named Selection Processing	No
Material Properties Transfer	No
CAD Associativity	Yes
Import Coordinate Systems	No
Reader Save Part File	No
Import Using Instances	Yes
Do Smart Update	No
Attach File Via Temp File	No
Analysis Type	3-D
Mixed Import Resolution	None
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

**TABLE 15**  
**Union Inferior > Geometry > Parts**

Object Name	<i>Part 1</i>
State	Meshed
<b>Graphics Properties</b>	
Visible	Yes
Transparency	1
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Material	Structural Steel
Stiffness Behavior	Flexible
Nonlinear Material Effects	Yes
<b>Bounding Box</b>	
Length X	0,72215 m
Length Y	0,83387 m
Length Z	0,3625 m
<b>Properties</b>	
Volume	2,7015e-003 m <sup>3</sup>
Mass	21,207 kg
Centroid X	1,0238e-008 m
Centroid Y	-6,7274e-010 m
Centroid Z	2,9929e-004 m
Moment of Inertia Ip1	0,52409 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip2	0,52409 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip3	0,9413 kg·m <sup>2</sup>
<b>Statistics</b>	
Nodes	20392
Elements	9625

## Mesh

**TABLE 16**  
**Union Inferior > Mesh**

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
<b>Advanced</b>	
Relevance Center	Coarse
Element Size	Default
Shape Checking	Standard Mechanical
Solid Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Low
Transition	Fast
<b>Statistics</b>	
Nodes	20392
Elements	9625

## Static Structural

**TABLE 17**  
**Union Inferior > Analysis**

Object Name	<i>Static Structural</i>
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
<b>Options</b>	
Reference Temp	22, °C

**TABLE 18**  
**Union Inferior > Static Structural > Analysis Settings**

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
<b>Step Controls</b>	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
<b>Solver Controls</b>	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled

Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
<b>Nonlinear Controls</b>	
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
<b>Output Controls</b>	
Calculate Stress	Yes
Calculate Strain	Yes
Calculate Results At	All Time Points
<b>Analysis Data Management</b>	
Solver Files Directory	D:\Ansys\Analysis GIS1500 Simulation Files\Static Structural (2)\
Future Analysis	None
Save ANSYS db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No

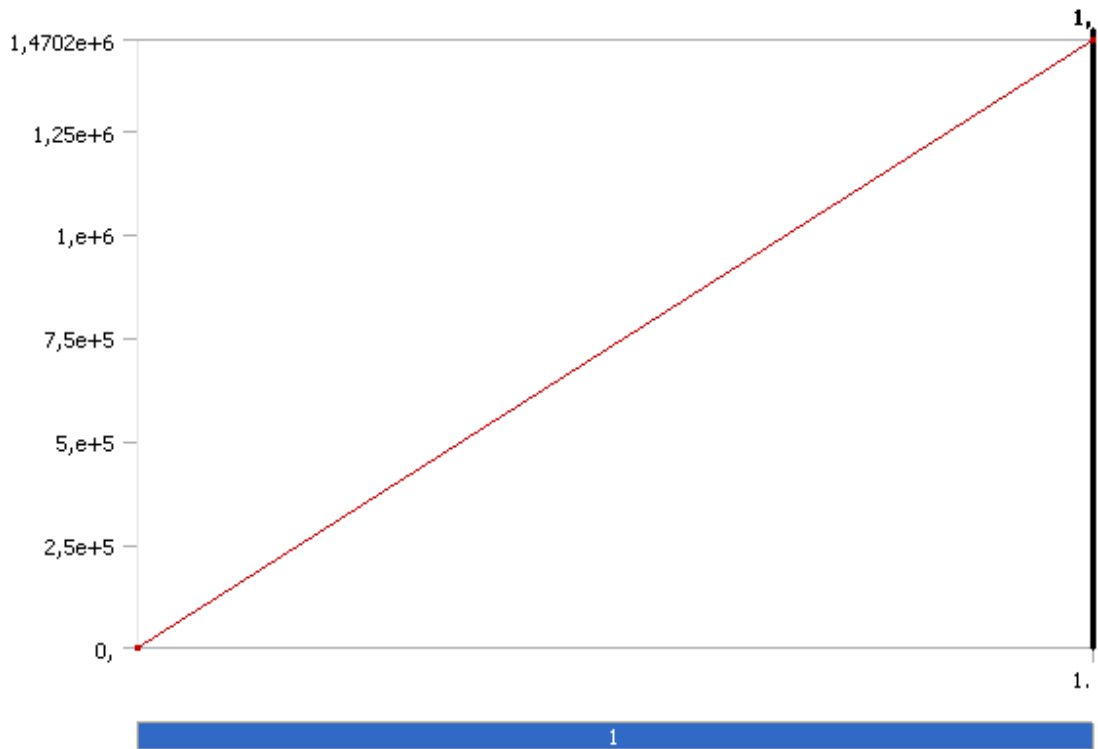
**TABLE 19**  
**Union Inferior > Static Structural > Loads**

Object Name	<i>Pressure</i>	<i>Pressure 2</i>	<i>Cylindrical Support</i>
State	Fully Defined		
<b>Scope</b>			
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	1 Face	6 Faces	
<b>Definition</b>			
Define By	Normal To		
Type	Pressure	Cylindrical Support	
Magnitude	3,524e+006 Pa (ramped)	1,4702e+006 Pa (ramped)	
Suppressed	No		
Radial			Fixed
Axial			Fixed
Tangential			Free

**FIGURE 3**  
**Union Inferior > Static Structural > Pressure**



**FIGURE 4**  
**Union Inferior > Static Structural > Pressure 2**



## Solution

**TABLE 20**  
**Union Inferior > Static Structural > Solution**

Object Name	<i>Solution</i>
State	Solved
<b>Adaptive Mesh Refinement</b>	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,

**TABLE 21**  
**Union Inferior > Static Structural > Solution > Solution Information**

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
<b>Solution Information</b>	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Update Interval	2,5 s
Display Points	All

**TABLE 22**  
**Union Inferior > Static Structural > Solution > Results**

Object	<i>Total</i>	<i>Equivalent</i>	<i>Maximum</i>	<i>Equivalent</i>	<i>Maximum</i>
--------	--------------	-------------------	----------------	-------------------	----------------

Name	<i>Deformation</i>	<i>Elastic Strain</i>	<i>Principal Elastic Strain</i>	<i>Stress</i>	<i>Principal Stress</i>
State	Solved				
<b>Scope</b>					
Geometry	All Bodies				
<b>Definition</b>					
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Elastic Strain	Maximum Principal Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress	Maximum Principal Stress
Display Time	End Time				
<b>Results</b>					
Minimum	1,7022e-005 m	3,2283e-008 m/m	-4,1932e-006 m/m	6456,6 Pa	-2,5356e+007 Pa
Maximum	7,3759e-004 m	8,5379e-004 m/m	5,7923e-004 m/m	1,7076e+008 Pa	1,1916e+008 Pa
<b>Information</b>					
Time	1, s				
Load Step	1				
Substep	1				
Iteration Number	1				

**TABLE 23**  
**Union Inferior > Static Structural > Solution > Results**

Object Name	<i>Shear Stress</i>
State	Solved
<b>Scope</b>	
Geometry	All Bodies
<b>Definition</b>	
Type	Shear Stress
Orientation	XY Plane
Display Time	End Time
<b>Results</b>	
Minimum	-6,4574e+007 Pa
Maximum	6,2411e+007 Pa
<b>Information</b>	
Time	1, s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

**TABLE 24**  
**Union Inferior > Static Structural > Solution > Stress Safety Tools**

Object Name	<i>Stress Tool</i>
State	Solved
<b>Definition</b>	
Theory	Max Equivalent Stress

Stress Limit Type	Tensile Yield Per Material
-------------------	----------------------------

**TABLE 25**  
**Union Inferior > Static Structural > Solution > Stress Tool > Results**

Object Name	<i>Safety Factor</i>
State	Solved
<b>Scope</b>	
Geometry	All Bodies
<b>Definition</b>	
Type	Safety Factor
Display Time	End Time
<b>Results</b>	
Minimum	1,4641
<b>Information</b>	
Time	1, s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

## Pata superior

### Geometry

**TABLE 26**  
**Pata superior > Geometry**

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Source	D:\Ansys\pata compression.x_t
Type	Parasolid
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Part Color
<b>Bounding Box</b>	
Length X	5,688e-002 m
Length Y	4,788e-002 m
Length Z	1,2 m
<b>Properties</b>	
Volume	4,3198e-004 m <sup>3</sup>
Mass	3,391 kg
<b>Statistics</b>	
Bodies	1
Active Bodies	1
Nodes	20754
Elements	10231
<b>Preferences</b>	

Import Solid Bodies	Yes
Import Surface Bodies	Yes
Import Line Bodies	Yes
Parameter Processing	Yes
Personal Parameter Key	DS
CAD Attribute Transfer	No
Named Selection Processing	No
Material Properties Transfer	No
CAD Associativity	Yes
Import Coordinate Systems	No
Reader Save Part File	No
Import Using Instances	Yes
Do Smart Update	No
Attach File Via Temp File	No
Analysis Type	3-D
Mixed Import Resolution	None
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

**TABLE 27**  
**Pata superior > Geometry > Parts**

Object Name	<i>Part 1</i>
State	Meshed
<b>Graphics Properties</b>	
Visible	Yes
Transparency	1
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Material	Structural Steel
Stiffness Behavior	Flexible
Nonlinear Material Effects	Yes
<b>Bounding Box</b>	
Length X	5,688e-002 m
Length Y	4,788e-002 m
Length Z	1,2 m
<b>Properties</b>	
Volume	4,3198e-004 m <sup>3</sup>
Mass	3,391 kg
Centroid X	-9,6173e-009 m
Centroid Y	4,39e-010 m
Centroid Z	0,24377 m
Moment of Inertia Ip1	0,43003 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip2	0,43026 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip3	1,8502e-003 kg·m <sup>2</sup>
<b>Statistics</b>	
Nodes	20754
Elements	10231

## Mesh

**TABLE 28**  
**Pata superior > Mesh**

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
<b>Advanced</b>	
Relevance Center	Coarse
Element Size	Default
Shape Checking	Standard Mechanical
Solid Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Low
Transition	Fast
<b>Statistics</b>	
Nodes	20754
Elements	10231

## Static Structural

**TABLE 29**  
**Pata superior > Analysis**

Object Name	<i>Static Structural</i>
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
<b>Options</b>	
Reference Temp	22, °C

**TABLE 30**  
**Pata superior > Static Structural > Analysis Settings**

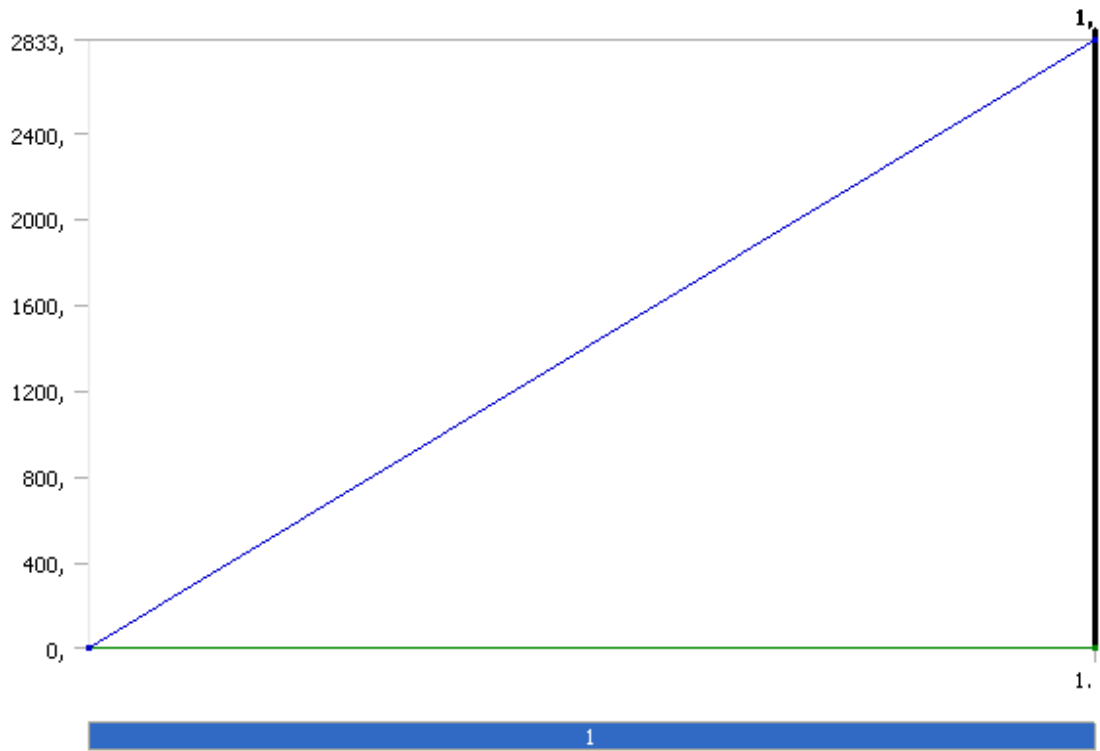
Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
<b>Step Controls</b>	
Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,
Step End Time	1, s
Auto Time Stepping	Program Controlled
<b>Solver Controls</b>	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled

Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
<b>Nonlinear Controls</b>	
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
<b>Output Controls</b>	
Calculate Stress	Yes
Calculate Strain	Yes
Calculate Results At	All Time Points
<b>Analysis Data Management</b>	
Solver Files Directory	D:\Ansys\Analysis GIS1500 Simulation Files\Static Structural (3)\
Future Analysis	None
Save ANSYS db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No

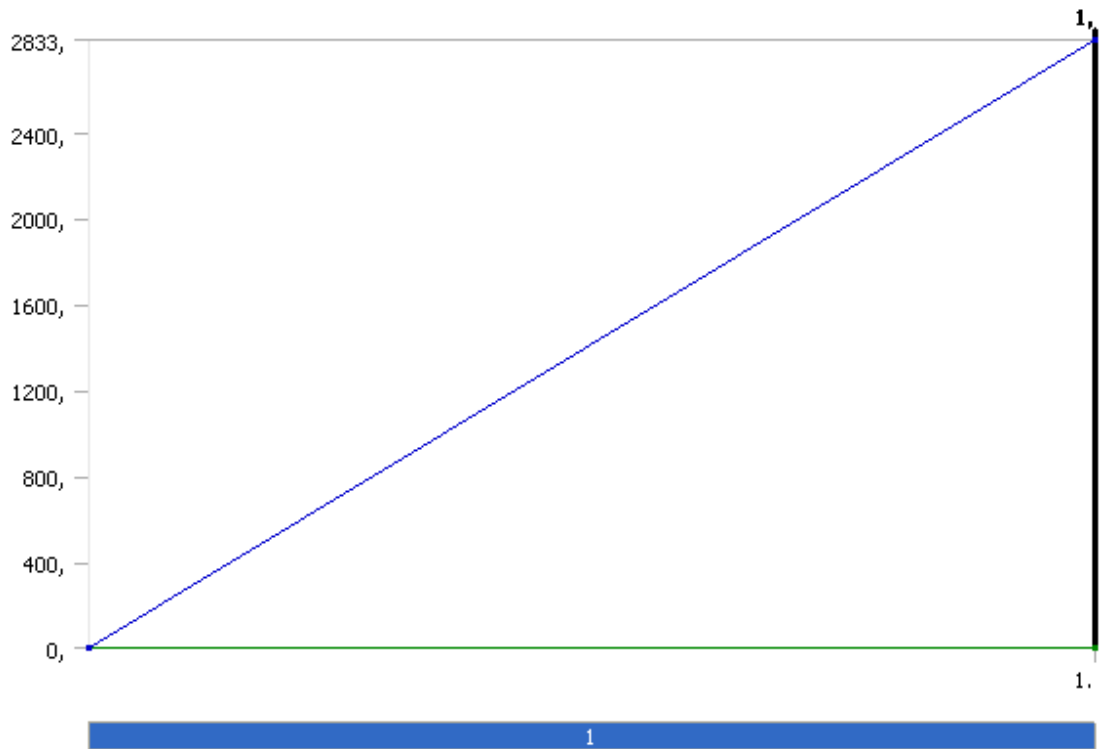
**TABLE 31**  
**Pata superior > Static Structural > Loads**

Object Name	<i>Force</i>	<i>Force 2</i>	<i>Cylindrical Support</i>
State	Fully Defined		
<b>Scope</b>			
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	2 Faces	1 Face	2 Faces
<b>Definition</b>			
Define By	Components		
Type	Force	Cylindrical Support	
X Component	0, N (ramped)		
Y Component	0, N (ramped)		
Z Component	2833, N (ramped)		
Suppressed	No		
Radial			Fixed
Axial			Fixed
Tangential			Free

**FIGURE 5**  
**Pata superior > Static Structural > Force**



**FIGURE 6**  
**Pata superior > Static Structural > Force 2**



## Solution

**TABLE 32**  
Pata superior > Static Structural > Solution

Object Name	<i>Solution</i>
State	Solved
<b>Adaptive Mesh Refinement</b>	
Max Refinement Loops	1,
Refinement Depth	2,

**TABLE 33**  
Pata superior > Static Structural > Solution > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
<b>Solution Information</b>	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Update Interval	2,5 s
Display Points	All

**TABLE 34**  
Pata superior > Static Structural > Solution > Results

Object	<i>Total</i>	<i>Equivalent</i>	<i>Maximum</i>	<i>Equivalent</i>	<i>Maximum</i>
--------	--------------	-------------------	----------------	-------------------	----------------

Name	<i>Deformation</i>	<i>Elastic Strain</i>	<i>Principal Elastic Strain</i>	<i>Stress</i>	<i>Principal Stress</i>
State	Solved				
<b>Scope</b>					
Geometry	All Bodies				
<b>Definition</b>					
Type	Total Deformation	Equivalent (von-Mises) Elastic Strain	Maximum Principal Elastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress	Maximum Principal Stress
Display Time	End Time				
<b>Results</b>					
Minimum	2,1094e-009 m	7,3728e-009 m/m	-9,2049e-007 m/m	1474,6 Pa	-5,3754e+006 Pa
Maximum	2,3156e-003 m	2,6189e-004 m/m	1,312e-004 m/m	5,2379e+007 Pa	2,0775e+007 Pa
<b>Information</b>					
Time	1, s				
Load Step	1				
Substep	1				
Iteration Number	1				

**TABLE 35**  
**Pata superior > Static Structural > Solution > Results**

Object Name	<i>Shear Stress</i>
State	Solved
<b>Scope</b>	
Geometry	All Bodies
<b>Definition</b>	
Type	Shear Stress
Orientation	XY Plane
Display Time	End Time
<b>Results</b>	
Minimum	-8,6373e+006 Pa
Maximum	9,784e+006 Pa
<b>Information</b>	
Time	1, s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

**TABLE 36**  
**Pata superior > Static Structural > Solution > Stress Safety Tools**

Object Name	<i>Stress Tool</i>
State	Solved
<b>Definition</b>	
Theory	Max Equivalent Stress

Stress Limit Type	Tensile Yield Per Material
-------------------	----------------------------

**TABLE 37**  
**Pata superior > Static Structural > Solution > Stress Tool > Results**

Object Name	<i>Safety Factor</i>
State	Solved
<b>Scope</b>	
Geometry	All Bodies
<b>Definition</b>	
Type	Safety Factor
Display Time	End Time
<b>Results</b>	
Minimum	4,7729
<b>Information</b>	
Time	1, s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

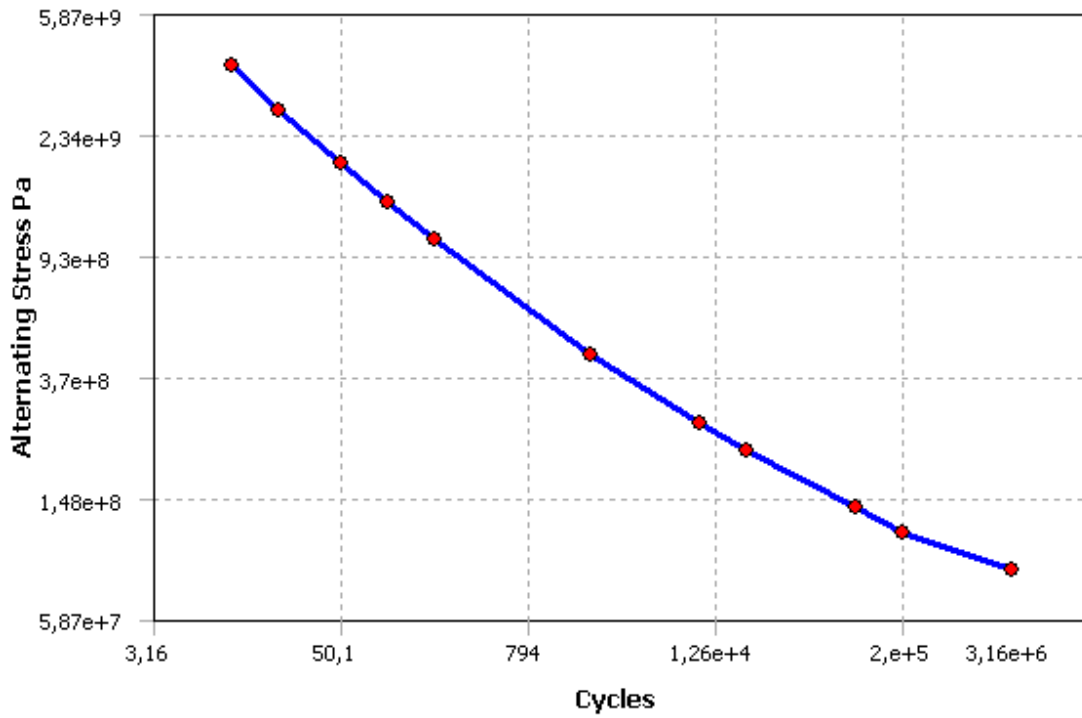
## Material Data

### *Structural Steel*

**TABLE 38**  
**Structural Steel > Constants**

<b>Structural</b>	
Young's Modulus	2,e+011 Pa
Poisson's Ratio	0,3
Density	7850, kg/m <sup>3</sup>
Thermal Expansion	1,2e-005 1/°C
Tensile Yield Strength	2,5e+008 Pa
Compressive Yield Strength	2,5e+008 Pa
Tensile Ultimate Strength	4,6e+008 Pa
Compressive Ultimate Strength	0, Pa
<b>Thermal</b>	
Thermal Conductivity	60,5 W/m·°C
Specific Heat	434, J/kg·°C
<b>Electromagnetics</b>	
Relative Permeability	10000
Resistivity	1,7e-007 Ohm·m

**FIGURE 7**  
**Structural Steel > Alternating Stress**



**TABLE 39**  
Structural Steel > Alternating Stress > Property Attributes

Interpolation	Log-Log
Mean Curve Type	Mean Stress

**TABLE 40**  
Structural Steel > Alternating Stress > Alternating Stress Curve Data

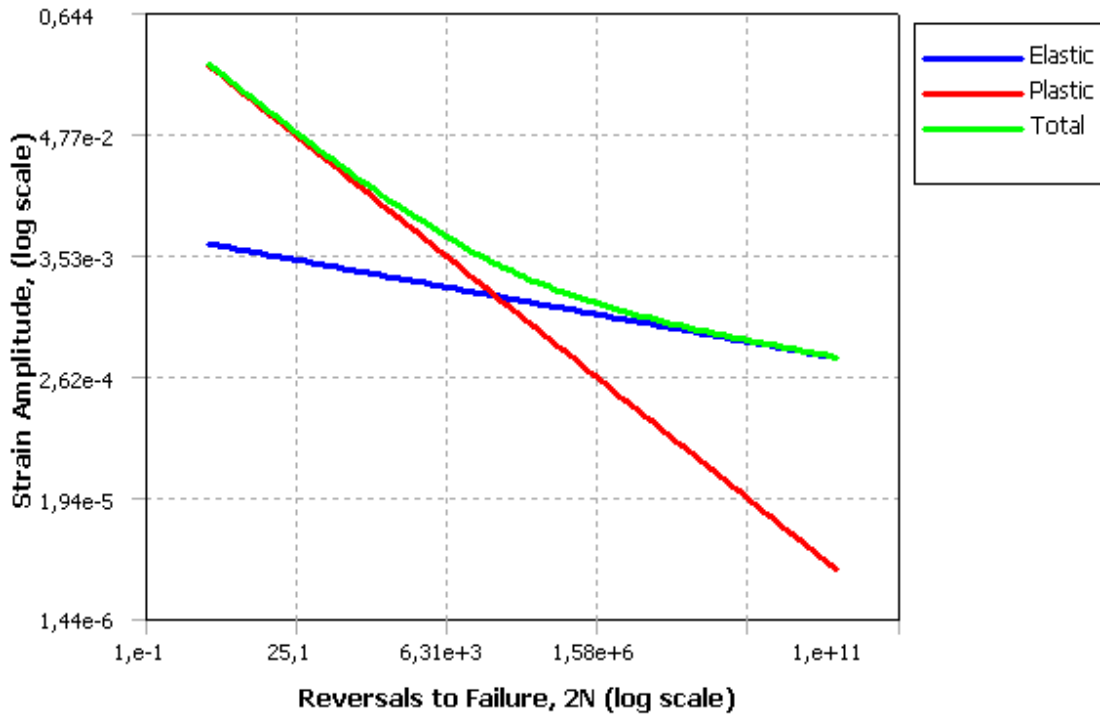
Mean Value Pa
0,

**TABLE 41**  
Structural Steel > Alternating Stress > Alternating Stress vs. Cycles

Cycles	Alternating Stress Pa
10,	3,999e+009
20,	2,827e+009
50,	1,896e+009
100,	1,413e+009
200,	1,069e+009
2000,	4,41e+008
10000	2,62e+008
20000	2,14e+008
1,e+005	1,38e+008
2,e+005	1,14e+008

1,e+006	8,62e+007
---------	-----------

**FIGURE 8**  
**Structural Steel > Strain-Life Parameters**



**TABLE 42**  
**Structural Steel > Strain-Life Parameters > Property Attributes**

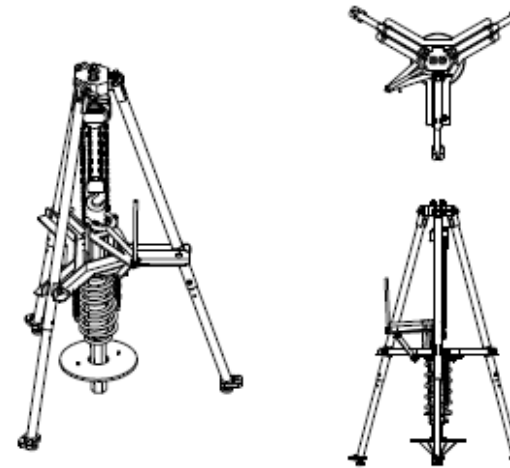
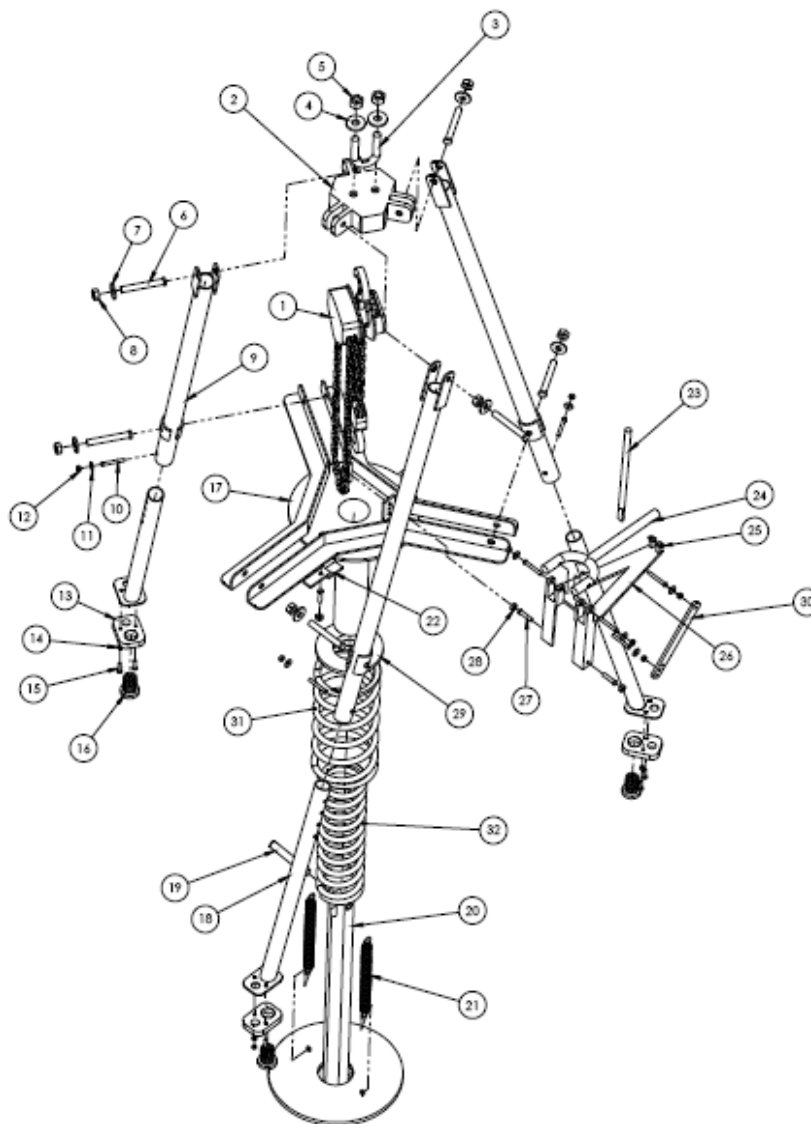
Display Curve Type	Strain-Life
--------------------	-------------

**TABLE 43**  
**Structural Steel > Strain-Life Parameters > Strain-Life Parameters**

Strength Coefficient Pa	9,2e+008
Strength Exponent	-0,106
Ductility Coefficient	0,213
Ductility Exponent	-0,47
Cyclic Strength Coefficient Pa	1,e+009
Cyclic Strain Hardening Exponent	0,2

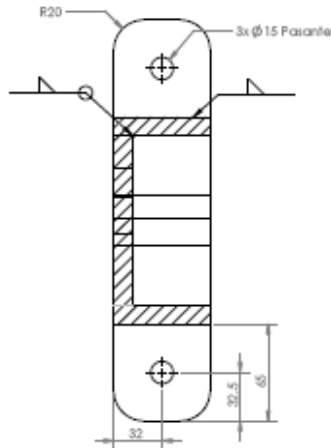
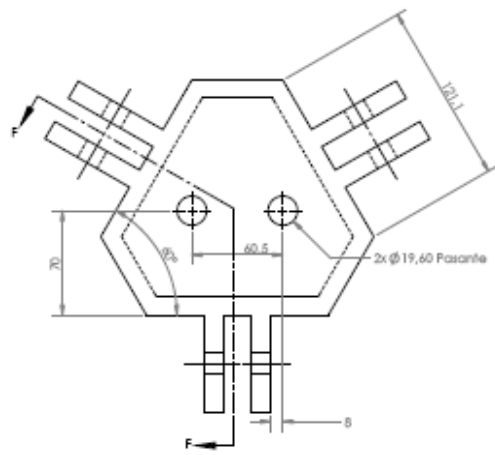
**ANEXO C**

**PLANOS**

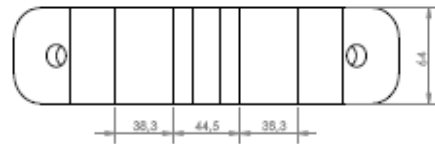


Item	Descripción	Cantidad	Observaciones
1	Flecha diferencial	1	Capacidad 2 toneladas
2	Unión superior	1	Acero A-36
3	Elemento de sujeción en "U"	1	Acero Inoxidable
4	Arandela	2	Acero Inoxidable
5	Tuerca	2	M20
6	Tomillo 5/8"	4	Hexagonal G8
7	Arandela	6	Plano 5/8"
8	Tuerca	4	M16
9	Pata superior	3	Acero A-36
10	Tomillo 5/16"	7	Hexagonal G8
11	Arandela	7	Plano 5/16"
12	Tuerca	7	M8
13	Soprote de caucho	3	
14	Tuerca	4	M5
15	Tomillo 3/16	4	Acero Inoxidable
16	Resorte de amortiguación	2	Cuerda de piano
17	Unión inferior	1	Acero A-36
18	Pata inferior	3	Acero A-36
19	Fusador del martillo	1	Acero 2510
20	Martillo	1	Acero A-36
21	Resortes de tensión	2	Cuerda de piano
22	Soprote de resortes	2	Acero A-36
23	Falanca secundaria	1	Acero 4140 endurecido
24	Falanca principal	1	Acero 4140 endurecido
25	Tomillo 5/32"	1	Brilol G8
26	Soprote del sistema de disparo	1	Acero A-36
27	Tomillo 3/8"	2	Hexagonal G8
28	Tuerca	2	M10
29	Sombbrero de caucho	1	
30	Soporte de apoyo	1	Acero A-36
31	Resorte de compresión 1	1	
32	Resorte de compresión 2	1	

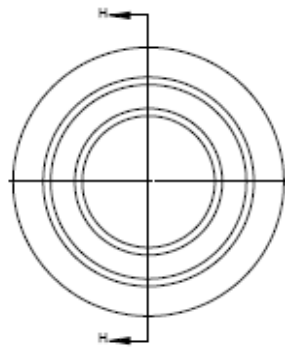
A2	Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
Dibujo	03-05-09			
Comprobo				
Norma		ISO		
ESC:	EXPLOSIÓN DE EQUIPO GENERADOR DE ONDAS ACÚSTICAS POR IMPACTO PARA SU APLICACIÓN EN ADQUISICIÓN SÍSMICA			PROYECTO DE GRADO
2030e02 2033032				LAMINA 1 DE 6



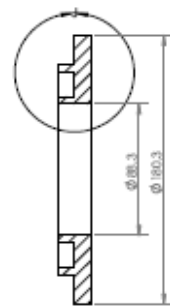
SECCIÓN F-F  
ESCALA 1:2



Pieza Nº 02. Unión superior



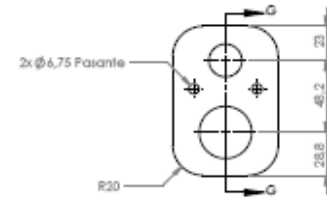
Pieza Nº 29. Sombrero de caucho



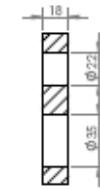
SECCIÓN H-H  
ESCALA 1:2



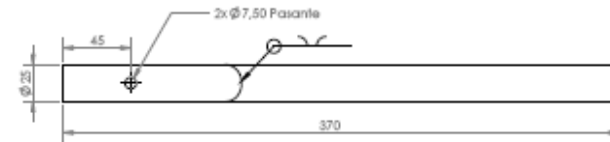
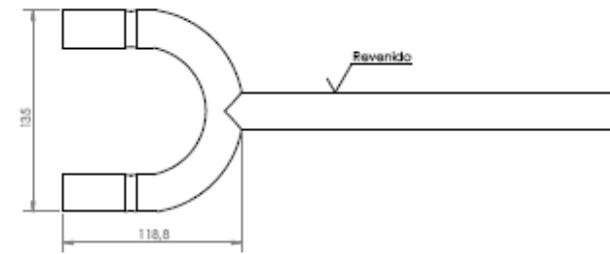
DETALLE J  
ESCALA 1:1



Pieza Nº 13. Soporte de caucho

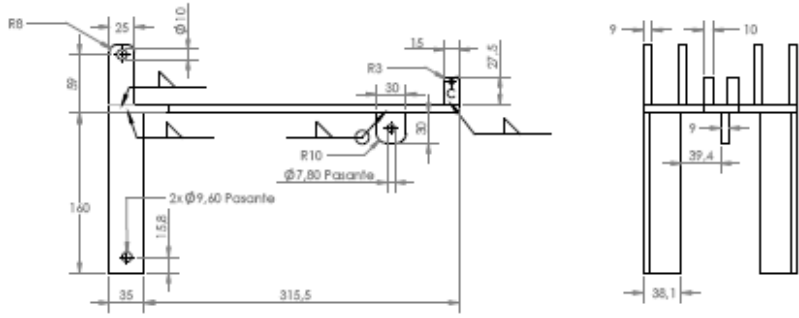
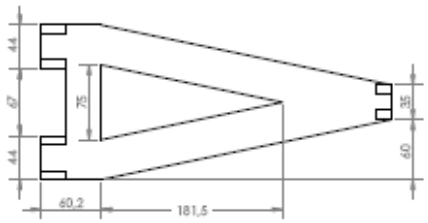


SECCIÓN G-G  
ESCALA 1:2

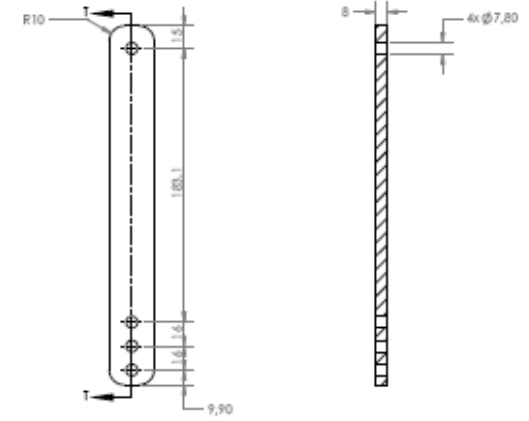


Pieza Nº 24. Palanca principal

A2	Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENIERÍA MÉCANICA
Dibujo	03-05-09			
Comprobo				
Norma		ISO		
ESC: 1:2	SOMBRERO Y SOPORTE DE CAUCHO, UNIÓN SUPERIOR Y PALANCA PRINCIPAL			PROYECTO DE GRADO
2030402 2030332				LAMINA 2 DE 6

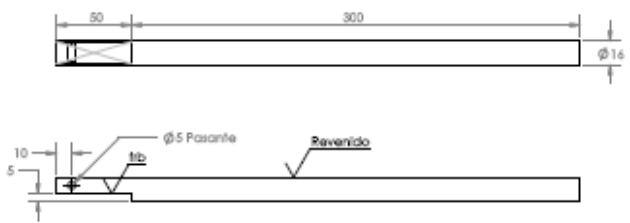


Pieza Nº 26. Soporte del sistema de disparo  
ESC: 1:3



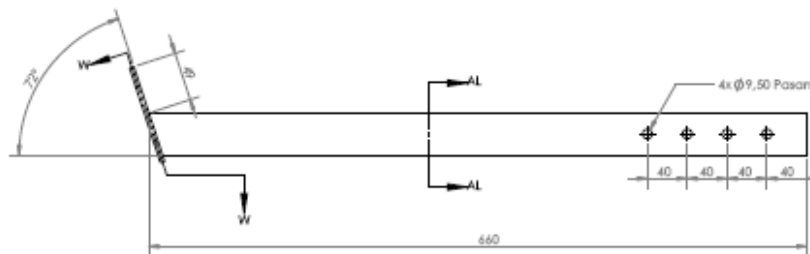
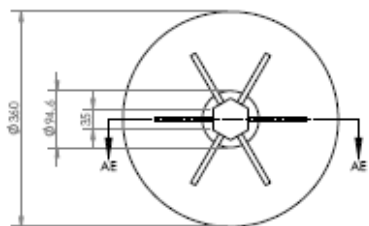
SECCIÓN T-T  
ESCALA 1:2

Pieza Nº 30. Barra de apoyo

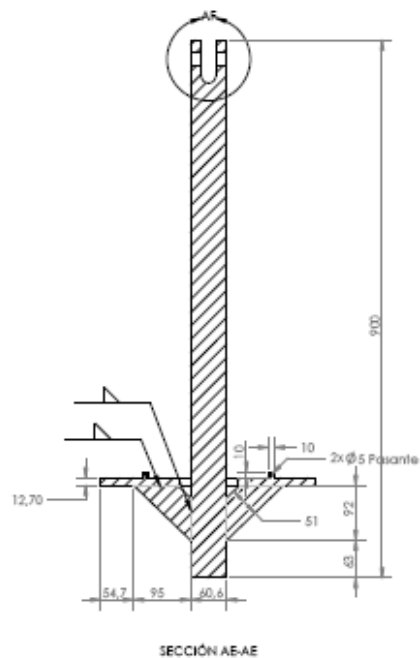
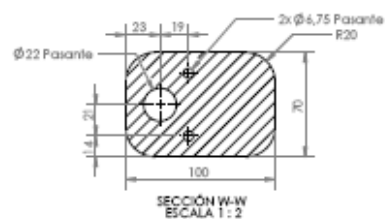


Pieza Nº 23. Palanca secundaria

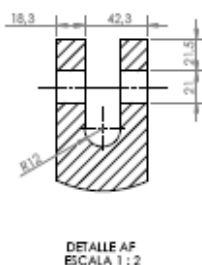
A2	Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
Dibujo	03-05-09			
Comprabo				
Norma		ISO		
ESC: 1:2	SOPORTE DE SISTEMA DE DISPARO, PALANCA SECUNDARIA Y BARRA DE APOYO			PROYECTO DE GRADO
2030x02 2033032				LAMINA 3 DE 6



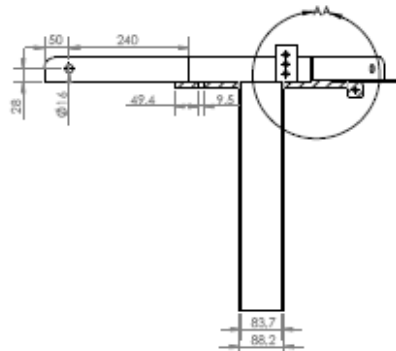
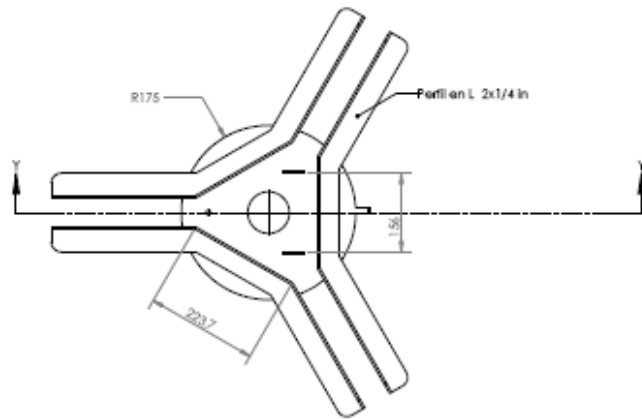
Pieza N° 18. Pata inferior  
ESC 1:3



Pieza N° 20. Martillo

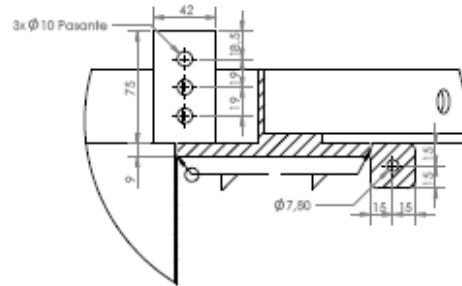


A2	Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
Dibujo	03-05-09			
Comprobo				
Norma		ISO		PROYECTO DE GRADO
ESC: 1:5	MARTILLO Y PATA INFERIOR			LAMINA 4 DE 6
20304/02 2033032				

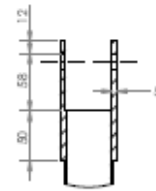


SECCIÓN Y-Y  
ESCALA 1:6

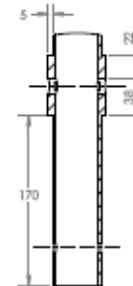
Pieza N° 17. Unión inferior



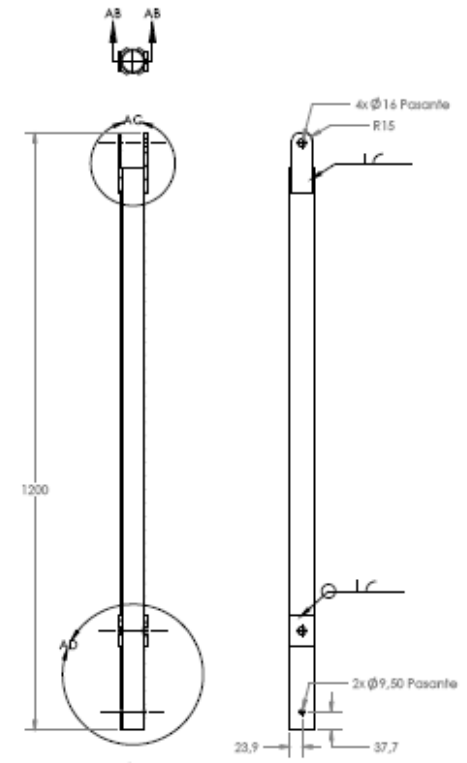
DETALLE AA  
ESCALA 1:2



DETALLE AC  
ESCALA 1:3



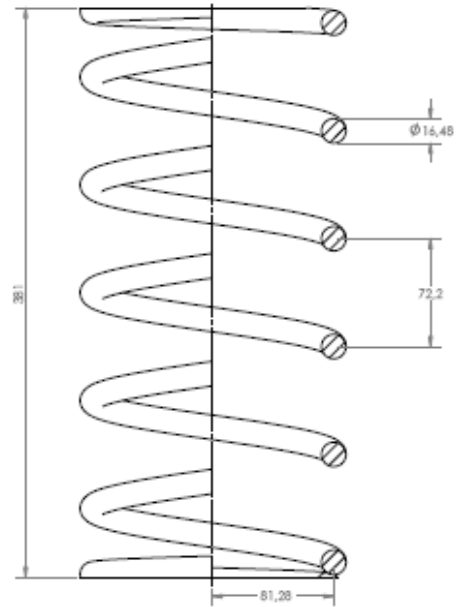
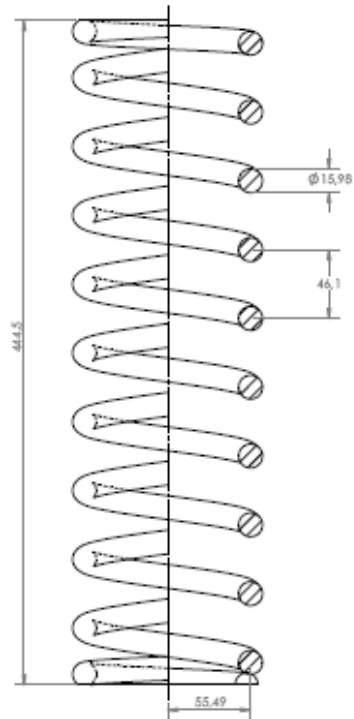
DETALLE AD  
ESCALA 1:3



SECCIÓN AB-AB  
ESCALA 1:6

Pieza N° 09. Pata superior

A2	Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
Dibujo	03-05-09			
Comprobo				
Norma		ISO		
ESC: 1:6	UNIÓN INFERIOR Y PATA SUPERIOR		PROYECTO DE GRADO	
2030602 2033032			LAMINA 5 DE 6	



A2	Fecha	Nombre	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
Dibujo	03-05-09			
Comprobo		ISO	RESORTES DE COMPRESIÓN Y TENSION	PROYECTO DE GRADO
Norma				
ESC: 1:2				LAMINA 6 DE 6
2030402 2039032				

**ANEXO D**  
**PAPER**

## Diseño de un equipo portable para la generación de ondas acústicas por impacto para su aplicación en adquisición sísmica somera

Omar Pinto y Diego Rivera

Grupo de investigación en Estabilidad de Pozo, Convenio UIS-ICP numero 002

**Resumen.** El objetivo de este proyecto es el diseño y construcción de un equipo generador de ondas acústicas por impacto para su aplicación en adquisición sísmica somera. Dicha idea surge de la necesidad de reemplazar en las adquisiciones sísmicas someras llevadas a cabo en el ICP, la utilización de una maza ó porra (con la cual se impacta un plato ó disco metálico situado sobre la superficie de la tierra con el fin de generar ondas acústicas que viajen por las capas estratigráficas del subsuelo) por un equipo que impacte la superficie de la tierra. Se construyó el equipo, debido a que en una adquisición sísmica se pueden dar de 200 a 300 impactos/día aproximadamente, trabajo que realizaría una persona o un grupo de personas (variando la intensidad del impacto), al mismo tiempo se busca que el impacto tenga la misma intensidad en toda la prueba, también se busca que la masa que impacte el disco de metal lo haga siempre en el centro de éste debido a que aquí se propaga la mayor energía de impacto que después se transforma en ondas acústicas [1] .

### Introducción

La adquisición sísmica como rama de la geofísica, busca emplear los principios físicos de reflexión y refracción, para determinar la disposición y tipo de rocas bajo la superficie de la tierra; esto con el fin de predecir y ubicar la presencia ó ausencia de hidrocarburos, "morfologías del subsuelo, estado de compactación y fracturación de los materiales, medición de parámetros para la ingeniería y geotecnia, etc."<sup>1</sup>.

Las adquisiciones sísmicas (ver Figura 1), constan principalmente de:

1. Fuente que emite energía a la tierra, la cual es la encargada de generar ondas acústicas y hacer que

estas ondas se transfieran a la tierra y viajen por el subsuelo.

2. Geófonos, los cuales son sensores que captan las ondas que viajan por el subsuelo al ser reflejadas y refractadas.
3. Sistema que almacena los datos. A este sistema van conectados todos los geófonos, los cuales entregan la información que es posteriormente guardada.

El objetivo de este trabajo, estará dirigido principal y únicamente al desarrollo de una fuente que descarga energía a la superficie de la tierra (ver Figura 1. Zona resaltada por el círculo en rojo).

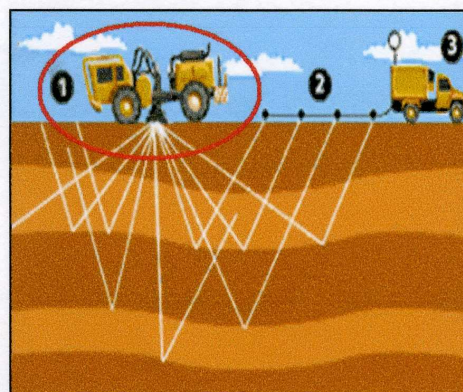


Figura 1. Sistema de adquisición de datos sísmicos (Tomada de [www.mssu.edu](http://www.mssu.edu))

Por lo general, las fuentes de energía utilizadas para generar y transmitir ondas acústicas (ver Figura 2) en el subsuelo son principalmente:

- Impactos mecánicos (Thumper)
- Dinamita
- Impactos con vehículos a una determinada frecuencia (Vibroseis)

<sup>1</sup> <http://www.ugr.es/~geofisic/sismica/sismica.html>

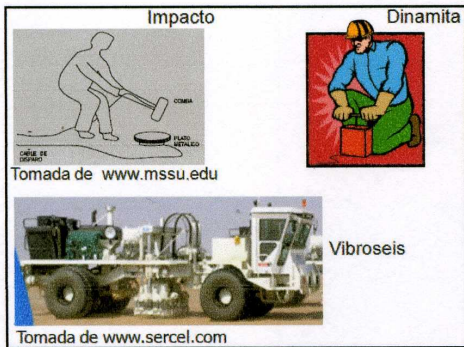


Figura 2. Fuentes que generan ondas acústicas

Al momento de generar el impacto sobre la superficie de la tierra, se crean ondas acústicas que pasan a través del subsuelo. Las ondas acústicas son reflejadas y refractadas (ver Figura 3) por discontinuidades presentadas en estas rocas, éstas viajan con velocidades que dependen de las propiedades físicas de las rocas y dependiendo de estas velocidades los geofísicos determinan las capas subterráneas, su espesor, composición, profundidad a las que se encuentran, etc.

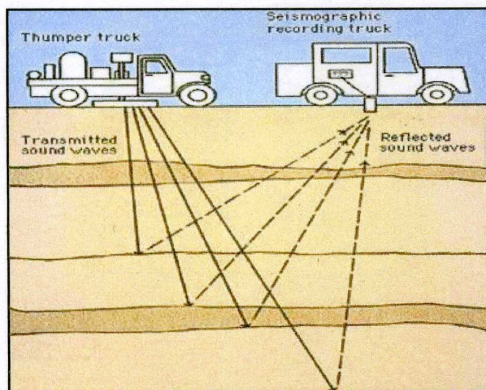


Figura 3. Tránsito de las ondas acústicas por el subsuelo

Tomada de [www.geomore.com](http://www.geomore.com)

Para llevar a cabo las adquisiciones sísmicas, el método más usual es generar las ondas acústicas mediante el impacto de una porra o maza (ver Figura 4) contra una platina de metal, este impacto es realizado por una persona.



Figura 4. Elementos utilizados en el método tradicional de generación de ondas acústicas; (A) Porra, (B) Platina

Antes de empezar a realizar los impactos, se debe planificar los siguientes aspectos: La ubicación de los puntos donde se va a ejecutar la adquisición sísmica, el número de impactos a realizar, la distancia entre estos, la distancia total recorrida para los impactos (línea trazada para la adquisición), y el número y ubicación de los geófonos (ver Figura 5A). A toda esta planificación se le conoce como arreglo geométrico y ésta es diseñada por un geofísico. Los círculos en la figura 5A, muestran los lugares en donde se va a golpear la platina con la porra, es decir, en cada círculo se da un disparo o golpe con porra y se avanza al siguiente punto planteado según el arreglo geométrico.

La figura 5B, muestra el arreglo geométrico de una adquisición sísmica, en la cual se pueden observar los diferentes elementos utilizados para dicha adquisición, entre estos se encuentra el receptor ó geófono, la porra, la platina, los cables que comunican el receptor con la tarjeta de adquisición de datos y las estacas que indican la ubicación de los impactos.



Figura 5. A. Arreglo geométrico

## B. Adquisición sísmica realizada en el ICP

Teniendo como objetivo principal el diseño y construcción de un equipo generador de ondas acústicas por medio de impacto, inicialmente se optó por identificar alternativas de diseño que dieran solución al problema. Al seleccionar esta alternativa se propuso, estableció y diseñó un equipo. Este equipo, inicialmente fue propuesto en borradores, después fueron seleccionados y calculados todos sus componentes. El siguiente paso fue hacer un análisis estructural por medio de elementos finitos para observar su respuesta al aplicarle las cargas de trabajo. Seguidamente se construyó el equipo y después se realizaron pruebas para ver su funcionamiento. Al llevar a cabo estas pruebas, se hicieron algunos cambios al equipo, los cuales garantizaron el buen funcionamiento. Después de haber superado estos inconvenientes, el equipo fue llevado a campo.

La prueba de campo, consistió en generar y comparar una línea sísmica obtenida con porra con la misma línea sísmica pero obtenida con el equipo. Los resultados garantizaron el buen desempeño del equipo, al obtener imágenes sísmicas 2D con mejor información para su procesamiento e interpretación.

### **Determinación de parámetros y requerimientos de diseño**

La alternativa de diseño seleccionada consiste de un sistema que genera un impacto en la superficie de la tierra, produciendo de esta manera ondas acústicas que viajan a través del subsuelo. Este impacto se lleva a cabo por medio de una masa que golpea una platina de metal, de modo que se transfiriera la mayor cantidad de energía a la tierra.

En la alternativa seleccionada la energía necesaria para el impacto, es entregada por un resorte, el cual al comprimirse, acumula energía suficiente para impulsar la masa que genera el impacto en la tierra, esta fuente elástica se comprime manualmente con la ayuda de una polea diferencial.

Para el diseño del equipo se tuvieron en cuenta algunos requerimientos generales tales como:

- Portabilidad (no robusto, bajo peso), para facilitar su traslado por zonas donde no se tenga acceso vehicular.
- Modular (desarmable), para que el equipo sea fácilmente transportable y de fácil instalación en el lugar de operación.
- Ensamblaje de módulos sencillo y rápido, para que la armada y desarmada del equipo sea llevada a cabo en el menor tiempo posible.
- No dependa de fuentes convencionales de energía (eléctrica, química, solar, etc.), con el fin de no depender de generadores ni acumuladores de energía.
- Sea operado manualmente.
- Sea económico.

También se tuvieron en cuenta algunos requerimientos particulares como son:

- El peso total del equipo fuera inferior a 100 kg.
- La energía de impacto generada por el equipo debió ser cuatro veces la energía obtenida por el golpe de una persona con un martillo de 18 libras.
- La energía de impacto tuvo que ser constante en todos los puntos de disparo propuestos en la adquisición sísmica.

### **Módulos del equipo**

A continuación se mencionan y se señalan los módulos que componen el equipo., los cuales son: Trípode, unión inferior, unión superior, polea diferencial (sistema de elevación), resortes, martillo y sistema de disparo (Ver Figura 6). Cabe anotar que el equipo tiene tres niveles diferentes de energía al comprimir los resortes 13, 15 y 17 cm.

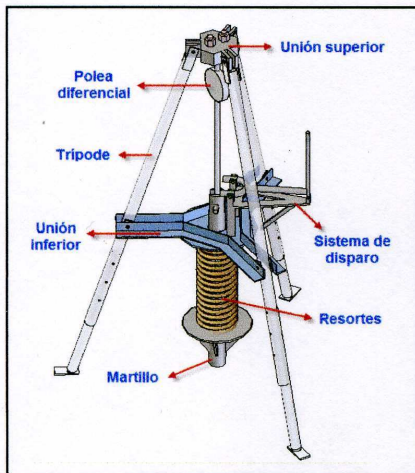


Figura 6. Módulos del equipo

### Validación analítica del equipo

El análisis estructural del equipo fue realizado examinando cada módulo por separado, teniendo en cuenta la mayor carga de trabajo y factores de seguridad conservadores para evitar cualquier riesgo de accidente durante la operación del equipo. Para el diseño del equipo se utilizaron dos metodologías: a)

Modelamiento matemático, en el cual se aplican fórmulas previamente establecidas para cada situación de carga, y b) Análisis por elementos finitos, el cual es un método aplicado en software que valida en resultados al modelo matemático.

A modo de información y para no hacer extenso el informe, se mostrará la metodología utilizada en el diseño estructural del equipo aplicado a un módulo cualquiera, que en este caso será el módulo del trípode.

#### (a) Modelamiento matemático

En este módulo, el elemento sometido a mayor carga es la pata superior, la cual se encarga de conectar la unión superior con la unión inferior y soporta una carga máxima de compresión igual a 1720 kg (fuerza generada por los resortes en su compresión máxima de 17 cm). Debido a que se cuenta con 3 patas superiores, cada una de estas soporta 1/3 de la carga máxima, equivalente a 567 kg aproximadamente. A continuación se realizará el cálculo por pandeo de la pata superior (ver Figura 7):

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTAND  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
BUCARAMANGA

Nombre del Componente:  
**Imagen del DCL o E.C.**

Carga a compresión

### Pata Superior

1  $\left(\frac{L}{k}\right)_1 = \left[\frac{2C\pi^2 E}{S_y}\right]^{1/2}$

2  $\left(\frac{L}{k}\right)_2 = \left[\frac{C\pi^2 E}{S_y}\right]^{1/2}$

Si  $(L/k) > (L/k)_1$  es Columna larga  
 Si  $(L/k)_2 < (L/k) < (L/k)_1$  es Columna Intermedia  
 Si  $(L/k) < (L/k)_2$  es Columna Corta

3  $\sigma = \frac{P}{A}$

4  $\sigma_{adm} = \frac{S_y}{N}$

Perfil pata superior

Eq	Variable	Parámetro	Unidades	Comentario
	P	567	Kg.	Carga a compresion soportada en cada pata
	A	3,56E-04	m <sup>2</sup>	Area transversal
	L	0,98	m.	Distancia entre apoyos
	K	0,0161	m.	Radio de giro
	(L/K)	60,8	cte.	Razon de esbeltez
	C	1	cte.	Apoyo tipo Pasador - Pasador
	E	2,10E+10	kg/m <sup>2</sup>	Módulo de elasticidad del material
	N	4	cte.	Factor de seguridad asumido
	Sy	3,24E+07	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia
1	(L/K) <sub>1</sub>	113	cte.	Valor limite superior de razon de esbeltez
2	(L/K) <sub>2</sub>	80	cte.	Valor limite inferior de razon de esbeltez
3	$\sigma$	1,60E+06	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de trabajo - Columna Corta
4	$\sigma_{adm}$	8,10E+06	kg/m <sup>2</sup>	Esfuerzo admisible

Figura 7. Calculo por pandeo pata superior

(b) Análisis estructural por elementos finitos (FEA)

Para este análisis estructural se utilizó el software ANSYS Workbench, para conocer qué factor de

seguridad calcula el software (ver Figura 8) y después compararlo con el método matemático con el fin de validar resultados.

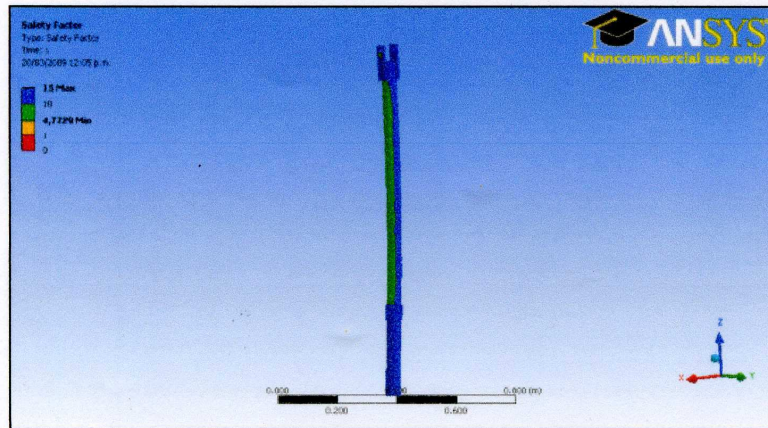


Figura 8. Cálculo del factor de seguridad

### Análisis de resultados obtenidos en campo

Inicialmente se llevó a cabo una comparación de cantidad de energía entregada por el impacto entre el equipo-GIS y una porra (maza ó martillo) de 18 lb (ver Figura 9). Es necesario mencionar que la energía de impacto del equipo estaba situada en la posición de menor energía (mínima compresión de los resortes, 13 cm).

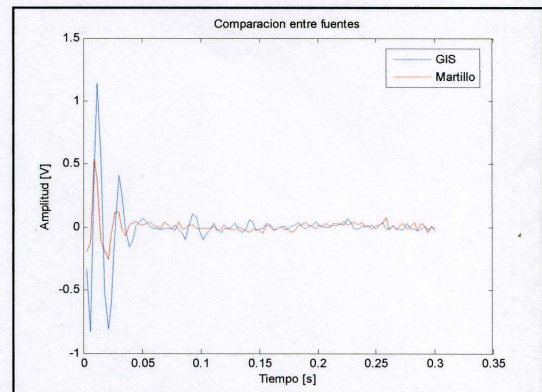


Figura 9. Comparación entre fuentes

**Adquisición sísmica, Octubre 01 de 2008.** La prueba consistió en un *walk away*<sup>2</sup> con 2 receptores (geófonos) espaciados a una distancia de 2 m, los disparos también fueron espaciados cada 2 m (ver Figura 10.(a)).

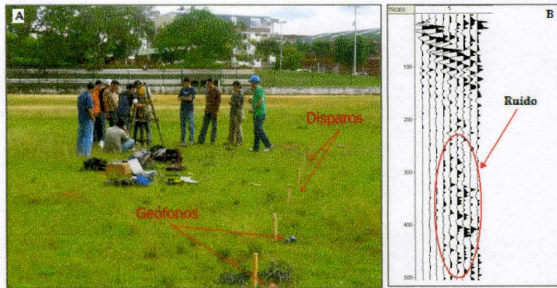


Figura 10. (a) Prueba cancha de Softbol –UIS. (b) Apilado de los disparos

La imagen sísmica de apilado realizada a partir del arreglo mostrado en la figura anterior se puede ver en la Figura 53. El eje vertical es tiempo y éste tiene unidades de milisegundos [ms], el eje horizontal es número de trazas<sup>3</sup>. El offset<sup>4</sup> más lejano fue de 18 metros, distancia a la cual aún fue captada y reconocible la señal producida por el equipo GIS-1500.

Teniendo en cuenta la Figura 10.(b), se presenta bastante ruido generado por:

1. Reverberación de los resortes a compresión, los cuales deben estar fijos a la unión superior, a la vez amortiguados para que no transmitan vibraciones (ver Figura 11).

<sup>2</sup> Prueba que consiste en dejar los receptores en una sola posición (fijos). Los disparos se inician al lado de los receptores y estos se van alejando cada vez más de los receptores.

<sup>3</sup> Es la sección geológica que un geófono capta (debajo de él), en el cual genera información de impedancia acústica, coeficiente de reflexión, función reflectividad, etc.

<sup>4</sup> Es la distancia más lejana entre geófonos y disparos.

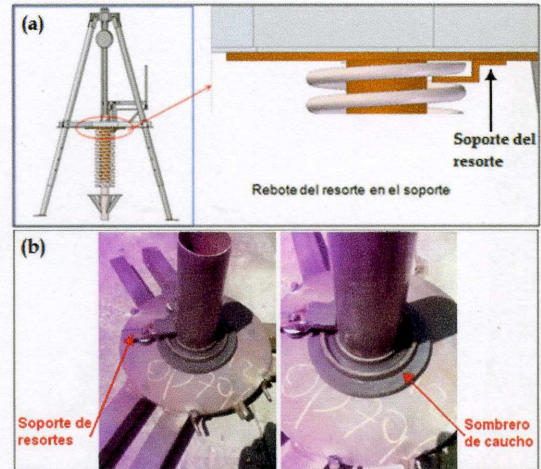
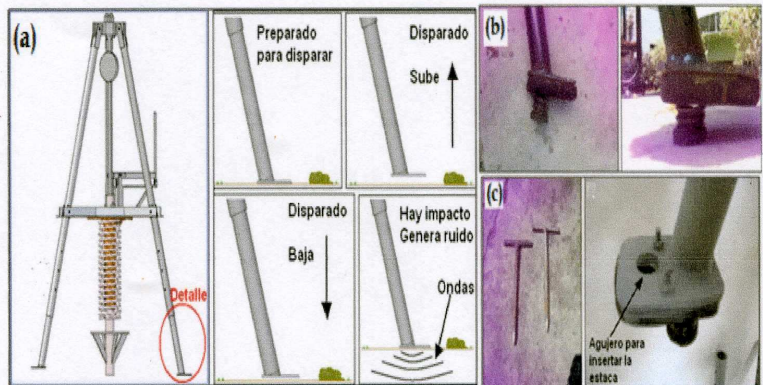


Figura 11. Ruido generado por resorte a compresión. (a) Problema.



(b) Solución

Figura 12. Salto del equipo. (a) Dinámica del equipo al ser disparado. (b) Solución para que cuando el equipo salte, éste sea amortiguado. (c) Solución para evitar que el equipo salte, por estacas.

2. En la prueba también se observó visualmente que el equipo saltaba al ser disparado el martillo (ver Figura 12), esto se debe a la reacción del equipo al momento de entregar la energía los resortes.
3. Rebote del martillo al impactar (ver Figura 13).

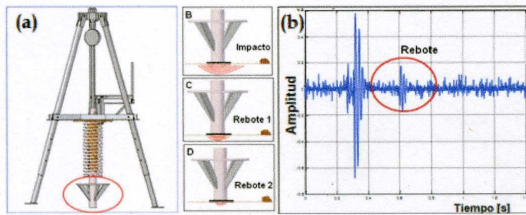


Figura 13. Rebote del martillo. (a) Problema del rebote (B) Impacto. (C) y (D) Rebotes. (b) Gráfica donde se observa el rebote del martillo

La solución del rebote consistió en ubicar dos resortes a tensión de manera que evitaran este fenómeno (ver Figura 14).

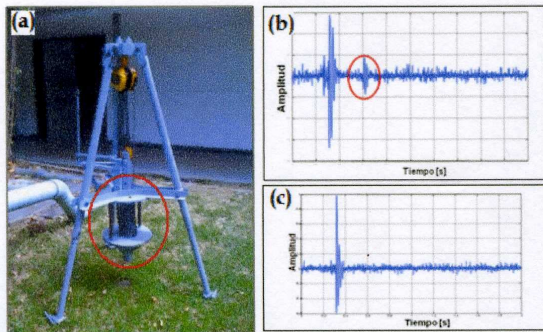


Figura 14. Solución rebote. (a) Resortes a tensión. (b) Equipo sin resortes a tensión. (c) Equipo con resortes a tensión.

**Adquisición sísmica, Abril 07 de 2009.** Esta adquisición fue llevada a cabo sobre la vía que conduce hacia los Ermitaños, contigua a las instalaciones del ICP en Piedecuesta. El objetivo de esta adquisición fue comparar la misma línea (establecida espacialmente) utilizando dos fuentes diferentes, el equipo y porra (Ver Figura 15), extraer las imágenes en 2D y generar conclusiones al respecto.



Figura 15. Adquisición en Piedecuesta

La adquisición consistió en una línea de 51 m de longitud, donde se utilizó el equipo generador de ondas, porra, un geófono multicomponente<sup>5</sup> y el SomerSi<sup>6</sup>. El arreglo geométrico propuesto, constó en mantener un offset constante de 27 m (entre geófono multicomponente y fuente o equipo) y estaciones constantes de 3 m, para avanzar los 51 m propuestos (ver Figura 16). Para la línea con porra, se realizaron cinco disparos (golpes) por estación; para la línea con el equipo, se realizaron dos disparos por estación.

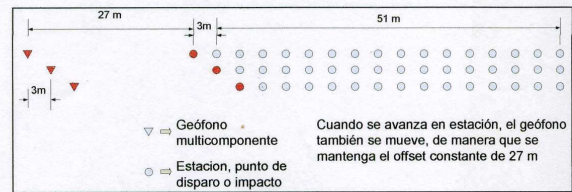


Figura 16. Arreglo geométrico

Los resultados obtenidos fueron procesados y analizados en el software ProMAX por el Geofísico Andrés E. Calle, Ecopetrol-ICP. Estos resultados se analizaron individualmente para Equipo y Porra (ver Figuras 17-19); y cada fuente (Equipo y Porra) se analizó en sus tres componentes: Vertical, Radial y Transversa, por ser geófono multicomponente. Para no hacer extenso el informe, se mostrarán las imágenes de las componentes vertical y Transversal.

<sup>5</sup> Este geófono (sensor) se caracteriza porque capta ondas a partir de tres coordenadas espaciales: Vertical, Radial y Transversal.

<sup>6</sup> Es el equipo que capta la señal de los geófonos y después la amplifica para aumentar la eficiencia al momento de procesar esta información.

Componente vertical:

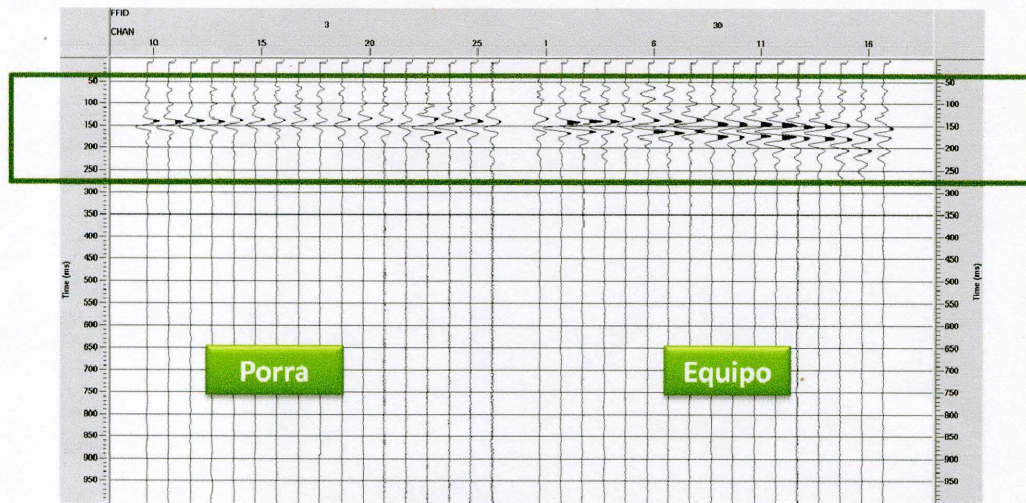
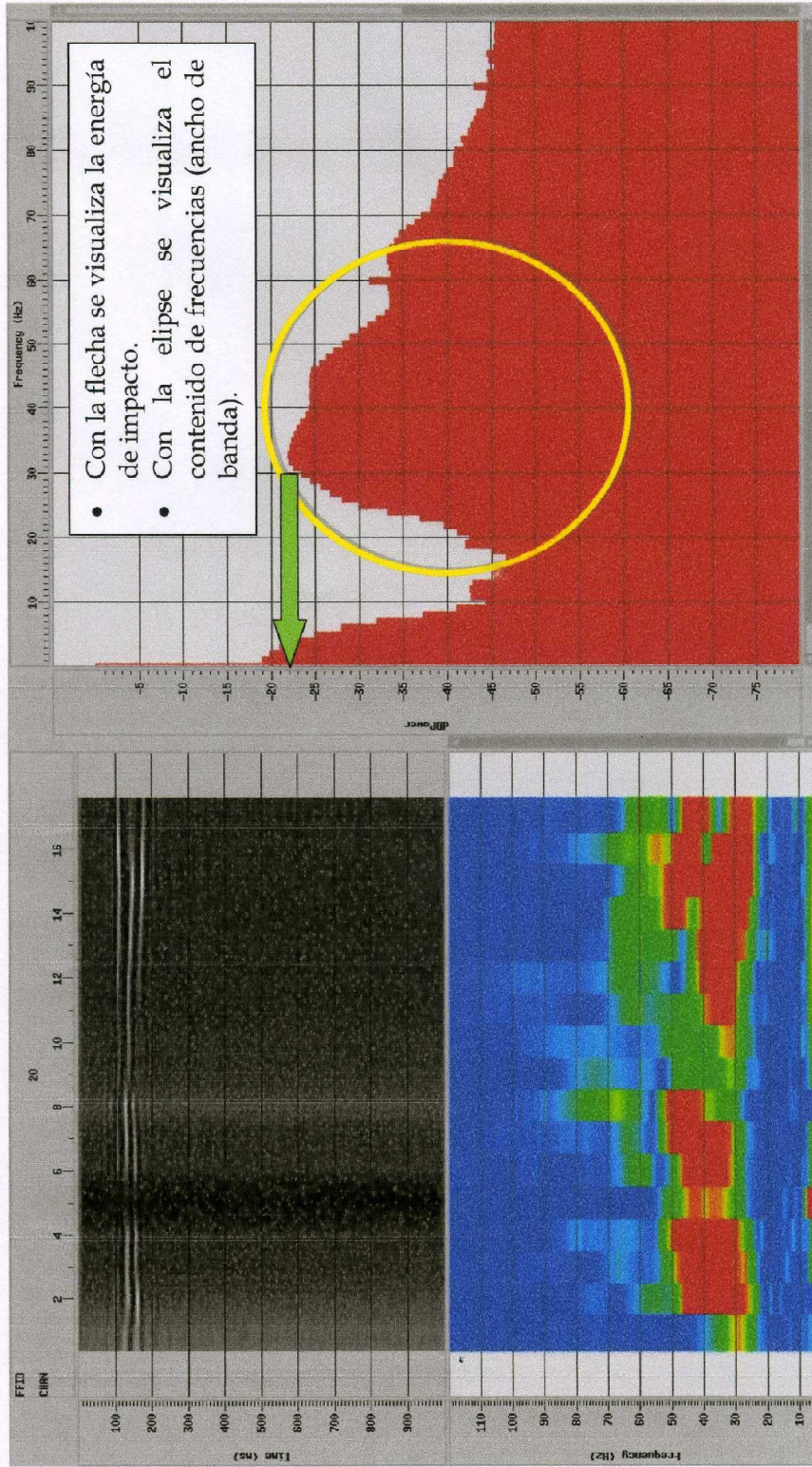


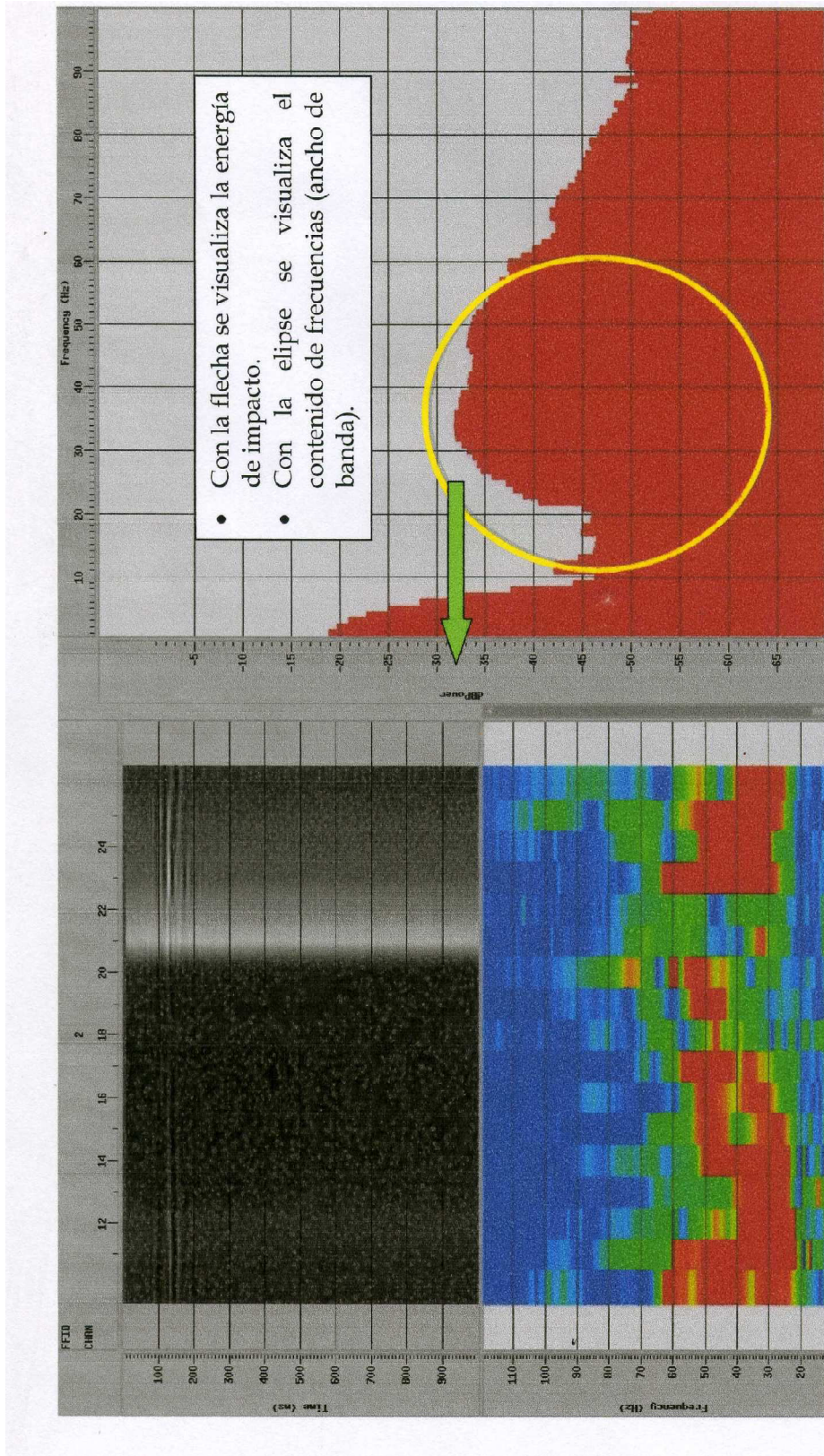
Figura 17. Comparación componente vertical Equipo-Porra

Conclusión: Mejor resolución vertical aparente.

**Componente transversal, Equipo y Porra, respectivamente:**



**Figura 77.** Componente transversal - Equipo



**Figura 78.** Componente transversal – Porra

**Conclusión:** El equipo posee mayor energía y un leve contenido de frecuencias superior.

## Conclusiones

- El equipo generador de ondas acústicas por impacto, presenta las siguientes ventajas:
  - Es un equipo compacto, portable, modular, de fácil ensamble y desmontaje, el cual facilita su operación y traslado por diferentes zonas de topografía Santandereana.
  - Es operado manualmente y no depende de fuentes de energía convencional (eléctrica, motores de combustión, etc.) para su funcionamiento.
  - El peso total del equipo no sobrepasa los 100 Kg y cada módulo no sobrepasa los 30 Kg, facilitando de esta manera el transporte e instalación.
- Se optó por construir el equipo en forma de trípode, debido a que esta configuración hace al equipo portable y estable (para evitar volcamiento) y además involucra menos elementos que garantizan buena estabilidad.
- Después de construido el equipo, se identificaron tres problemas principales durante las primeras pruebas de campo realizadas: Vibración de los resortes, salto del equipo y rebote del martillo (por medio de resortes a tensión). Las alternativas de solución propuestas para estos problemas fueron efectivas, generándose así, imágenes sísmicas de mejor calidad para su interpretación.
- Debido a la diversidad de terrenos, es difícil establecer niveles constantes de energía por parte del equipo.
- El análisis de elementos finitos realizado en ANSYS, validó el modelamiento matemático que se aplicó en el diseño estructural del equipo.
- La última adquisición realizada, evidenció que la energía de impacto y contenido frecuencial del equipo es superior al generado con la porra.

## Recomendaciones

La energía en un objeto móvil es proporcional a su masa y el cuadrado de su velocidad, si se dobla la masa, se obtiene el doble de energía, pero también se tiene el doble del peso a levantar y transportar. Sin embargo, si se dobla la velocidad se obtiene hasta cuatro veces más energía sin aumentar el peso del mecanismo. Por consiguiente se recomienda disminuir la masa del martillo para hacer el equipo más liviano, lo cual no afecta significativamente la energía de impacto entregada.

Se recomienda aumentar la carrera de aceleración del martillo, con el fin disminuir la fuerza de reacción del equipo (salto) al realizar el disparo; sin embargo si la carrera del martillo es superior a 20 cm, es aconsejable utilizar un sistema automático.

## Referencias

- [1] Dean Keiswetter and Don Steeples. Practical modifications to improve the sledgehammer seismic source. Department of Geology, University of Kansas Lawrence, Kansas
- [2] SHIGLEY, Joseph Edward, Diseño en Ingeniería Mecánica. Mc. Graw Hill. 2002. 6ª Edición.
- [3] BEER, Ferdinand P. y RUSSELL, Johnston E, Mecánica de Materiales. Mc. Graw-Hill. 2000.
- [4] ARTOBOLEVSKI, Ivan I, Mecanismos en la técnica moderna. Moscu: Mir, 1976-1990.
- [5] MILLER, R., PULLAN, S., WALDER, J. Field Comparison of Shallow Seismic Sources, Geophysics, Vol 51 N° 11 Kansas Geological Survey, USA. (1986).
- [6] STEEPLES, D., KEISWETTER D., Practical Modifications to Improve the Sledgehammer Seismic Source, Geophysical Research Letter, Vol 21 N°20, University of Kansas, USA (1994).
- [7] GISCO. GISCO ESS200 Electronic Seismic Source. Operation and Maintenance Manual. 2004 Geophysical Instrument Supply Company. [www.giscogeo.com](http://www.giscogeo.com).

**ANEXO E**  
**ESPECIFICACIONES EQUIPO DE ADQUISICIÓN**  
**DE DATOS**



Entrada Análoga		
Parámetro	Condiciones	Especificación
Tipo de convertidor D/A		Tipo de Aproximación Sucesivo
Rango de entrada de voltaje en operación lineal en modo Single Ended	CHx a GND	±10V max
Rango de entrada de voltaje en operación lineal en modo diferencial	CHx a GND	-10V min, +20V max
Voltaje de entrada máximo	CHx a GND	±40V max
Corriente de entrada (Nota 1)	Vin = +10V	70µA típica
	Vin = 0V	-12µA típica
	Vin = -10V	-94µA típica
Numero de canales		8 single ended / 4 diferenciales, seleccionable por software
Rangos de entrada en modo Single Ended		±10V, G=2
Rangos de entrada en modo diferencial		±20V, G=1 ±10V, G=2 ±5V, G=4 ±4V, G=5 ±2.5V, G=8 ±2.0V, G=10 ±1.25V, G=16 ±1.0V, G=20 Seleccionable por software
Rendimiento	Software paced	50 S/s
	Revisión continua	1.2kS/s
	Revisión para 4K muestras (FIFO)	8kS/s
Cola de ganancia de canal	Hasta de 8 elementos	Configurable por software canal, rango y ganancia
Resolución (Nota 2)	Diferencial	12 bits
	Single ended	11 bits
Exactitud CAL	CAL = 2.5V	±0.05% típica, ±0.25% max
Error de linealidad integral		±1 LSB típica
Error de linealidad diferencial		±0.5 LSB típica
Corriente CAL	Source	5mA max
	Sink	20µA min, 200nA típica
Fuente del trigger	Seleccionable por software	Digital externo: DIO0-DIO3

Salida Análoga		
Parámetro	Condiciones	Especificación
Tipo de convertidor D/A		PWM
Resolución		10-bits, 1 en 1024
Rango máximo de salida		0 -5 Volts
Numero de canales		2 salidas de voltaje
Rendimiento	Software paced	100 S/s Modo de un canal en uso
		50 S/s Dos canales en uso
Voltaje máximo (Nota 3)	Sin carga	Vs
	Carga de 1mA	0.99*Vs
	Carga de 5mA	0.98*Vs
Salida	Cada salida D/A	30mA

Entrada /Salida Digital (Terminal a tornillo DIO3:0)		
Parámetro	Condiciones	Especificación
Tipo		Discreto, compatible con 5V/TTL
Numero de E/S		4
Configuración		4 bits, Programables independientemente para entrada o salida
Voltaje de entrada "Alto" (1)		3.0V min, 15.0V max absoluto
Voltaje de entrada "Bajo" (0)		0.8V max
Voltaje de salida (Nota 4)	Sin carga	Vs - 0.4Vmin, Vs típica
	Carga de 1mA	Vs - 1.5V
Corriente de escape de entrada		±1.0μA
Corriente de cortocircuito de salida	En estado alto (1)	3.3mA
Estado de ensendido / reset		Modo de entrada (Alta impedancia)

Entrada /Salida Digital (DB37)	
Tipo	82C55
Numero de E/S	24 ( Puerto A0 atravez del puerto C7)
Configuración	2 bancos de 8 y 2 bancos de 4, o 3 bancos de 8
Configuración Pull-up/pull-down	Todos los pines están unidos a Vs con resistencias de 47K. Están disponibles las posiciones para "pull-down" a tierra. Seleccionable por Hardware con resistencias de cero ohms
Voltaje de entrada "Alto" (1)	2.0V min, 5.5V max absoluto
Voltaje de entrada "bajo" (0)	0.8V max, -0.5V min absoluto
Salida de voltaje en estado "alto" (IOH = - 2.5mA)	3.0V min
Salida de voltaje en estado "bajo" (IOL = 2.5mA)	0.4V max

## GEOFONO SG-10

SG-10 SPECIFICATIONS	
<b>Distortion</b>	≤ 0.075% with tilt from 0° to 15° *
<b>Spurious Frequency</b>	Beyond 240 Hz
<b>Natural Frequency</b>	10 Hz ± 2.5% with tilt from 0° to 15°
<b>Open Circuit Damping</b>	0.68 ± 5%
<b>Damping Constant</b>	4925 Ω Hz
<b>Sensitivity @ 68% Damping</b>	22.8 V/m/sec ± 2.5%
<b>Coil Resistance</b>	350 Ω ± 3.5%
<b>Moving Mass</b>	8.4 g (0.29 oz)
<b>Coil Travel</b>	1.78 mm (0.07 in.) peak-to-peak
<b>Diameter</b>	27.4 mm (1.08 in.)
<b>Length</b>	30.15 mm (1.19 in.)
<b>Weight</b>	78 g (2.74 oz)
<b>Operating Temperature Range</b>	-40°C to +90°C

All parameters are specified at 20°C

\* measured at 12 Hz and 17.8 mm/sec peak-to-peak velocity

