



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Labranza vertical empleando la teoría  
de profundidad crítica

Por:

**Prisciliano Pérez Martínez**

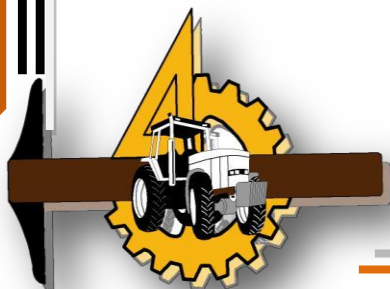
Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener  
El título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Junio del 2013



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
"ANTONIO NARRO"

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA

*Labranza vertical empleando la teoría de profundidad crítica*

POR:

Prisciliano Pérez Martínez

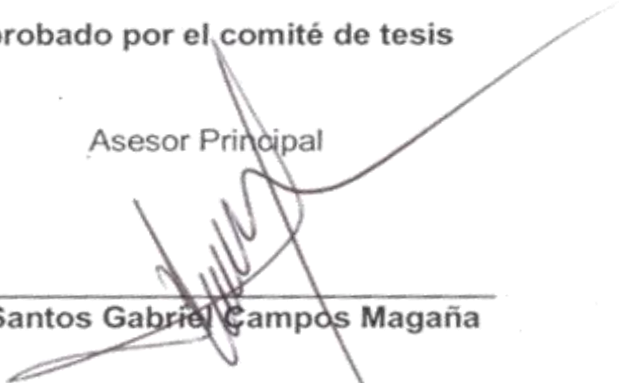
TESIS

Que Somete a Consideración del H. Jurado Examinador Como Requisito  
Parcial para Obtener el Título de:

**INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA**

Aprobado por el comité de tesis

Asesor Principal

  
Dr. Santos Gabriel Campos Magaña

Co-director

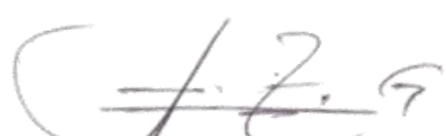
  
Dr. Martin Cadena Zapata

Asesor externo

  
MC. Marco A. Reynolds Chávez

Coordinador de la división de ingeniería

Universidad Autónoma Agraria  
"ANTONIO NARRO"

  
M.C. Luis Rodriguez Gutiérrez

  
Coordinación de  
Ingeniería

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a **DIOS** por darme la oportunidad de vivir y por la dicha de haber concluido una etapa más en la vida, por cuidarme siempre.

A mi alma mater la **UAAAN** por abrirme sus puertas estos años que hicieron de mí un profesionalista “Ingeniero Mecánico Agrícola” y ser una persona que puede ayudar a la sociedad. Gracias Alma Mater.

Al **Dr. Santos G. Campos Magaña**, por su apoyo, confianza y paciencia hacia mi persona, por permitirme participar en el desarrollo de este proyecto, por sus excelentes consejos y asesoría en este trabajo de tesis.

Al **M.C. Marco Antonio Reynolds Chávez**, por su enseñanza, por compartir sus conocimientos y experiencia conmigo, porque fue parte esencial en el desarrollo de esta etapa. Sobre todo por ser una persona con la que pude compartir buenos momentos.

A los distinguidos profesores del departamento de Maquinaria Agrícola en especial al **M. C. Héctor Uriel Serna Fernández, M. C. Juan Antonio Guerrero Hernández, Dr. Martin Cadena Zapata, Ing. Juan Arredondo Valdez, Dr. Jesús Valenzuela García, Ing. Tomás Gaytán Muñiz, Ing. Jorge Flores Berrueto, Ing. Rosendo González Garza, M. C. Blanca Elizabeth de la Peña Casas**, y a todos aquellos profesores que aportaron sus conocimientos y experiencias durante el desarrollo de mi carrera.

A mis **Compañeros de Generación CXIV** de la carrera de Ing. Mecánico Agrícola, en especial a, **José Alonso Solís, Iván Pacheco , Moisés Guadarrama, Juan Gonzales, Reynaldo Pérez, Marlene Bustos, Rafael Salas, Ezequiel Sánchez, Dayana Martínez, Ervin Pérez, Daniel Rodríguez, Ramaosiris Espinoza, Abraham Rivera, Jorge Asís, Leandro Alvares**, gracias a todos ellos por su amistad. Por brindarme su amistad sincera.

A los compañeros del dormitorio Porfirio 12, a los Ing. Juan Antonio y Cuervo Piña, a los compañeros que me apoyaron durante el desarrollo de la tesis. Julio A. Ruiz, Gilbert Fresh, Diego Cruz, Lili Ramón, Milton R, Karen Bautista S. Miguel.

A todas la personas que fueron el impulso de que estudiara esta ingeniería, a la señora **Beatriz Romero** y su familia. Y que me apoyaron de diferentes maneras aun estudiando la carrera.

Al Sr. Gerardo Saucedo y familia, Por su apoyo y confianza que me dieron durante mi estancia en esta ciudad.

## DEDICATORIA

A mis padres:

- **Sr. Iginio Pérez Ordoñez**
  
- **Sra. Consuelo Martínez Flores**

A mis padres por la darme la oportunidad de permitirme crecer y ser orgullo de pertenecer a ustedes en la familia, el tomar mi propio camino en la vida, a pesar de los obstáculos de la misma, gracias a mi padres por ser mi motor en esta vida, a pesar de las preocupaciones que les pueda dar y de las decisiones que tome siempre me apoyan a pesar de la distancia.

A mis hermanos:

- **Bernardino**
  
- **Francisca**
  
- **Catalina**
  
- **Teresita**
  
- **Luis miguel**
  
- **Mariana**
  
- **Marbella**

A todo ustedes que apoyo brindado en la vida, la confianza, el respeto de hermanos y por sus consejos brindados.

Mis sobrinas:

- ❖ **Julia**
  
- ❖ **Noelia**
  
- ❖ **Lizbeth**

Por que estoy feliz de que estén en la familia y que siempre hacen feliz mi vida.

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iv
ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	5
2.1. Manejo de suelos con implementos de labranza. ....	5
2.2. Labranza primaria.....	5
2.3. Labranza vertical .....	6
2.3.1. Conceptos y parámetros de la labranza vertical .....	7
2.3.2. Ventajas de la labranza vertical.....	8
2.3.3. Las limitaciones de la labranza vertical .....	9
2.3.4. Pre-requisitos para la implementación de la labranza vertical.....	9
2.4. Profundidad crítica .....	10
2.5. Cinceles, su modo de acción, fuerzas y ajustes.....	14
2.6. Factores que determinan la fuerza de arrastre en las herramientas de labranza .....	15
2.7. Consumo de energía en la labranza .....	21
2.8. Tecnología de implementos .....	24
2.9. Factores de diseño para herramientas de labranza.....	26
2.10. Análisis de fuerzas .....	31
2.11. Análisis Teórico del Diseño del Anillo.....	34
2.12. Transductores de fuerza.....	39
2.12.1. Factores involucrados en la selección para el diseño de un transductor. ....	42
2.12.2. Galgas extensiométricas.....	43
2.12.3. Puente de Wheatstone .....	46
2.13. Sistema de adquisición de datos.....	47
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	49
3.1. Construcción y calibración del transductor octagonal extendido. ....	49
3.1.1. Determinación de selección y requerimiento de materiales para el acoplamiento de sensores. ....	51

3.2.	Fabricación de los sensores transductores (octagonales) .....	52
3.3.	Acondicionamiento del cuerpo del octagonal extendido y galgas extensiométricas.	52
3.4.	Calibración de los octagonales extendidos (Amarillo-Rojo y Verde-Azul) .....	53
3.5.	Evaluaciones bajo condiciones de laboratorio.....	54
3.6.	Procesamiento y análisis de la información.....	56
3.6.1.	Análisis de información para determinar las constantes de calibración de lo octagonales. ....	56
3.6.2.	Análisis de información de datos obtenidos en campo .....	57
3.7.	Variables a medir.....	58
3.8.	Guía rápida para la evaluación de herramientas de labranza vertical.....	59
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
4.1.	Construcción y calibración de dos octagonales de anillo extendido. ....	60
4.1.1.	Pruebas de laboratorio para la calibración de octagonal extendido Amarillo-Rojo en el eje horizontal FX.....	60
4.1.2.	Pruebas de laboratorio para la calibración de octagonal extendido en el eje vertical FY.....	63
4.1.3.	.....	63
4.1.4.	Pruebas de laboratorio para la calibración de octagonal extendido en momento.....	66
4.1.5.	.....	66
4.1.6.	Pruebas de laboratorio para la calibración del octagonal extendido Verde-Azul en el eje horizontal FX.....	69
4.1.7.	.....	69
4.1.8.	Pruebas de calibración para la medición del momento del octagonal extendido Verde-Azul.....	71
4.2.	Evaluaciones bajo condiciones de campo.....	75
4.2.1.	Medición de profundidad.....	75
4.2.2.	.....	75
4.2.3.	Porcentaje de patinaje .....	76
4.2.4.	Análisis de datos obtenidos en campo.....	79
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90
VI.	BIBLIOGRAFÍA.....	91
VII.	ANEXOS .....	98
6.1.	Características del material a usar en los sensores octagonales transductores de fuerza	98
6.2.	Construcción de dinamómetros (Maquinado, pegado de galgas y cableado).....	99

6.3. Especificaciones y características del tractor utilizado en monitoreo de campo con el transductor octagonal extendido.....	105
6.4. Características del implemento de cinceles utilizado para las pruebas en campo...	107
6.5. Programa utilizado para los analisis espectrales en matlab .....	108

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 2.1.</b> Sistemas de labranza, contenido de humedad	9
<b>Cuadro 2.2.</b> Determinación de fuerza de tiro	29
<b>Cuadro 2.3</b> Medias de fuerzas y momentos en subsolador	30
<b>Cuadro 2.4.</b> Rango de fuerzas de implementos	31
<b>Cuadro 2.5.</b> Análisis de fuerza requerida en implementos	31
<b>Cuadro 2.6.</b> Nudos de concentración de esfuerzos	41
<b>Cuadro 4.1.</b> Medias de los seis pesos y su deformación en mili Volts.	64
<b>Cuadro 4.2.</b> Análisis de varianza de la regresión lineal para la variable FX	65
<b>Cuadro 4.3.</b> Medias de los pesos (N) y su deformación en mili Volts	67
<b>Cuadro 4.4.</b> Análisis de varianza de la regresión lineal para la variable FY.	67
<b>Cuadro 4.5.</b> Medias obtenidas de calibración M 67 cm.	70
<b>Cuadro 4.6</b> Medias de calibración a 47 cm	70
<b>Cuadro 4.7.</b> Anva y regresión lineal para M	71
<b>Cuadro 4.8.</b> Medias de pesos (N) y su deformación en mV	73
<b>Cuadro 4.9.</b> Anova y regresión lineal para FX	73
<b>Cuadro 4.10.</b> Datos de calibración para M a 55 cm	76
<b>Cuadro 4.11</b> Datos de calibración para M a 65 cm	76
<b>Cuadro 4.12.</b> Anva y regresión lineal para M	76
<b>Cuadro 4.13.</b> Constantes de calibración	77
<b>Cuadro 4.14.</b> Medias y Desv. estd. de profundidad a 2F201T20	78
<b>Cuadro 4.15.</b> Medias y Desv. estd. de profundidad 2F201T30	79
<b>Cuadro 4.16.</b> Distancia y tiempo de recorrido por el tractor en 20 vueltas	80
<b>Cuadro 4.17.</b> Distancias recorridas y tiempos para determinación de patinaje a 20 cm de profundidad	80
<b>Cuadro 4.18.</b> Distancias recorridas y tiempos para determinación de patinaje a 30 cm de profundidad	80
<b>Cuadro 4.19.</b> Porcentaje de patinaje	81
<b>Cuadro 4.20.</b> Análisis de varianza del porcentaje de patinaje	82
<b>cuadro 4.21.</b> Comparación de medias	82
<b>Cuadro 4.22.</b> Medias y Desv. estd. de datos multiplicados por la constante de calibración	84
<b>Cuadro 4.23.</b> Anva de datos recopilados en campo para FX	85
<b>Cuadro 4.24.</b> Comparación de medias para la dirección FX	85
<b>Cuadro 4.25.</b> Medias multiplicadas por la constante de calibración	87
<b>Cuadro 4.26.</b> Análisis de varianza de datos recopilados en campo	88
<b>Cuadro 4.27.</b> Comparación de medias de los seis diferentes arreglos en FY	89
<b>Cuadro 4.28.</b> Medias multiplicadas por la constante de calibración para Momento	91
<b>Cuadro 4.29.</b> Análisis de varianza de datos recopilados en campo para el Momento	92
<b>Cuadro 4.30.</b> Comparación de medias del Momento	92
<b>cuadro 6.1</b> Adicion de medias y espectrales de todas las corridas	104
<b>cuadro 6.2</b> Muestras de profundidad y distancias por repetición	105
<b>Cuadro 6.3.</b> Velocidades de avance del tractor	108



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Implementos principales en la labranza vertical	8
<b>Figura 2.2.</b> Comparación entre un muro de contención y una pala de suelo con cuchilla de corte	11
<b>Figura 2.3.</b> Diferencia en momento entre una cuchilla ancha y una cuchilla de corte estrecha	12
<b>Figura 2.4.</b> Modelo de falla tridimensional del suelo	12
<b>Figura 2.5.</b> Ilustración de la profundidad crítica del corte de suelo	13
<b>Figura 2.6.</b> Modelo de la fuerza para la falla de profundidad crítica de Godwin	14
<b>Figura 2.7.</b> Relación del contenido de humedad del suelo con la resistencia de terrones	17
<b>Figura 2.8.</b> Efectos del contenido de humedad sobre el esfuerzo del deslizamiento suelo/metal	17
<b>Figura 2.9.</b> Efecto del pulimiento de superficie de contacto sobre el ángulo de fricción suelo/metal	18
<b>Figura 2.10.</b> Efecto del ángulo de ataque sobre la fuerza de arrastre	19
<b>Figura 2.11.</b> Relación del ángulo de ataque de un diente angosto con las fuerzas ejercidas	19
<b>Figura 2.12.</b> Mala ubicación de la rueda soporte de herramienta sobrecarga la falla del suelo	20
<b>Figura 2.13.</b> Diseño o uso inapropiado de la herramienta puede producir sobrecarga innecesaria	21
<b>Figura 2.14.</b> Relación de fuerza de arrastre de un diente con la velocidad	22
<b>Figura 2.15.</b> El valor de la fuerza vertical V se incrementa con la velocidad	32
<b>Figura 2.16.</b> Estado de deformación en tensión o compresión	33
<b>Figura. 2.17.</b> Estado de deformación-flexión	34
<b>Figura. 2.18.</b> Estado de deformación en torsión	35
<b>Figura 2.19</b> Fuerzas actuando en un elemento del anillo	36
<b>Figura. 2.20.</b> Diagrama de adquisición y procesamiento de datos	44
<b>Figura. 2.21.</b> Galgas extensiométricas	46
<b>Figura 2.22.</b> Muestra de diferentes rosetas de dos elementos	46
<b>Figura. 2.23</b> Puente de Wheatstone	48
<b>Figura. 2.24.</b> Diagrama de bloques del sistema de instrumentación completo del tractor	50
<b>Figura 3.1.</b> Ubicación del taller de Maquinaria Agrícola	51
<b>Figura 3.2.</b> Dimensiones del sensor octagonal	53
<b>Figura 3.3.</b> Modelo de galga extensiométrica	54
<b>Figura 3.4.</b> Puente de Wheatstone	55
<b>Figura 3.5</b> Localización de galgas en el octagonal	55
<b>Figura. 3.6.</b> Frecuencia de monitoreo y comportamiento de sensores en laboratorio	59
<b>Figura 3.7.</b> Frecuencia de monitoreo y comportamiento de sensores en campo	64
<b>Figura. 3.8.</b> Superficie total por prueba	66
<b>Figura 3.9.</b> Geometría de alas	67
<b>Figura 4.1.</b> Calibración del sensor octagonal extendido Rojo-Amarillo	68
<b>Figura 4.2.</b> Registro de los pesos del octagonal extendido Rojo-Amarillo	68
<b>Figura 4.3</b> Gráfica escalonada de calibración de la fuerza horizontal FX	69
<b>Figura 4.4.</b> Constante de calibración para la (FX) del octagonal Rojo-Amarillo	70
<b>Figura 4.5.</b> Calibración del sensor octagonal en el eje vertical (FY)	71
<b>Figura 4.6.</b> Registro de la fuerza vertical (FY) aplicada al octagonal extendido	71
<b>Figura 4.7.</b> Gráfica escalonada de calibración de la fuerza vertical (FY)	71
<b>Figura 4.8.</b> Constante de calibración para la (FY) del octagonal extendido	73
<b>Figura 4.9.</b> Proceso de calibración del octagonal extendido Amarillo-Rojo (M) y calibración	74
<b>Figura 4.10.</b> Registro del Momento del octagonal Amarillo-Rojo	74
<b>Figura 4.11.</b> Gráfica escalonada de calibración del momento	74
<b>Figura 4.12.</b> Constante de calibración para el momento del octagonal extendido	76
<b>Figura 4.13.</b> Gráfica escalonada de calibración de la horizontal FX del octagonal Verde-Azul	77
<b>Figura 4.14.</b> Constante de calibración en (FX) del octagonal extendido verde-azul	79
<b>Figura 4.15.</b> Gráfica escalonada de calibración del momento del octagonal Verde-Azul	80
<b>Figura 4.16.</b> Constante de calibración en (M) del octagonal extendido verde-azul	82
<b>Figura 4.17.</b> Medición de profundidades de los arreglos	83
<b>Figura 4.18.</b> (a) Arreglos de 2F201T20SA y 2F201T30SA para el monitoreo de FX	87
<b>Figura 4.18.</b> (b) Arreglos de 2F201T20AM y 2F201T30AM para el monitoreo de FX	87
<b>Figura 4.18.</b> (c) Arreglos de 2F201T20AG y 2F201T30AM para el monitoreo de FX	87
<b>Figura 4.19.</b> Registro en tiempo real de datos recopilados en campo	89
<b>Figura 4.20.</b> (a) Arreglos sin alas no existe fuerza de resistencia a la penetración	91

<b>Figura 4.20 (b)</b> Arreglos con alas medianas, existe resistencia a la penetración del suelo mayor	92
<b>Figura 4.20 (c)</b> Arreglos con alas grandes, hay mayor resistencia a la penetración	93
<b>Figura 4.21.</b> Registro en tiempo real de datos recopilados en campo	93
<b>Figura 4.22. (a)</b> Arreglos sin alas para monitoreo del Momento	94
<b>Figura 4.22. (b)</b> Arreglos con alas medianas para monitoreo del Momento	94
<b>Figura 4.22. (c)</b> Arreglos con alas grandes para monitoreo del Momento	94
<b>Figura 4.23.</b> Ejemplo de monitoreo en tiempo real del Momento para el arreglo 2F201T20SA.	96
<b>Figura 6.1.</b> Octagonal lijado listo para montaje de galgas extensiométricas	106
<b>Figura 6.2.</b> Numeración y posición de las galgas extensiométricas según el puente de Wheatstone	107
<b>Figura 6.3.</b> Colocación de las galgas extensiométricas en el octagonal extendido	107
<b>Figura 6.4.</b> secado de las galgas en el octagonales extendidos	108
<b>Figura 6.5.</b> Sistema de cableado de los sensores octagonales	108
<b>Fig. 6.6.</b> Implemento articulado con el octagonal ya protegido	109
<b>Figura 6.7.</b> Dimensiones del tractor Jhon Deere 6403	113
<b>Figura 6.8. (a)</b> Prototipo articulado	114
<b>Figura 6.8. (b)</b> Prototipo Articulado	114

## RESUMEN

Para determinar los requerimientos de fuerza en la labranza vertical en esta investigación se desarrollaron y evaluaron dos transductores integrales de 40kN de capacidad cada uno, para la medición de la fuerza en dos direcciones y el Momento, se utilizaron dos cinces frontales sin alas a 20 cm de profundidad y un cincel trasero con seis arreglos diferentes (sin alas, con alas medianas y grandes) trabajando a 20 y 30 cm de profundidad.

Las constantes de calibración de los octagonales bajo condiciones de laboratorio fueron para FX(13.58), FY(20.33), Momento(4.37) en el caso del octagonal Rojo-Amarillo, para el octagonal Verde-Azul, FX(15.29), FY(6.88) ambos octagonales con un coeficiente de correlación superior al 99% en la eficiencia del monitoreo y teledetección de las fuerzas. En el monitoreo del eje horizontal FX, la menor demanda de fuerza fue de 3.75 kN y se obtuvo con el arreglo 2F201T20SA, la mayor demanda de fuerza fue de 18.40 kN y se obtuvo con los arreglos 2F201T30AM y 2F201T30AG.

Durante el monitoreo en campo para el eje vertical (FY), en las corridas realizadas de los arreglos sin alas a la profundidad de 20 y 30 cm se observa que no existe una fuerza de resistencia a la penetración del suelo por el implemento, a diferencia de los arreglos con alas medianas y grandes a las mismas profundidades. En el monitoreo de Momento, se muestra un registro similar al del eje horizontal FX, con una magnitud menor para el arreglo 2F201T20SA. El mayor porcentaje de patinaje registrado durante el monitoreo fue de 6.11 % con el arreglo 2F201T30AM y el menor fue para los otros cinco arreglos con un porcentaje de patinaje promedio de 2.54 %.

**Palabras clave:** *Transductor octagonal, profundidad crítica, labranza vertical, puente de Wheatstone, galga extensiométrica, monitoreo, correlación.*

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha incrementado el interés por el uso eficiente de la energía, la conservación de los recursos del suelo y agua, principalmente donde es escasa, lo que ha traído un cambio en actitudes con respecto a las prácticas de manejo del suelo y los residuos. Cada año se da más énfasis al uso de las labranzas mínimas y a la preparación de la cama de siembra en la agricultura de temporal (FAO<sup>a</sup>, 2003).

La humedad del suelo es un factor que incide directamente en la fuerza de tracción y requerimiento de potencia en la preparación del suelo. Suelos secos presentan agregados con alta cohesión, siendo más alta en suelos arcillosos, requiriendo mayor fuerza de tracción para ser disturbados. La cohesión disminuye a medida que el contenido de agua aumenta en el suelo (Mouazen y Ramón, 2002), aumentando entonces la adhesión de las partículas del suelo sobre la superficie de la herramienta y afectando la fuerza de tracción. Arvidsson *et. al.*, (2004) encontraron que el contenido de agua adecuado para las labores de labranza es cercano al límite plástico del suelo; también concluyeron que la profundidad de trabajo aumenta a mayor contenido de humedad del suelo, disminuyendo la resistencia específica. Por otra parte, la labor en un suelo seco favorece la formación de terrones grandes (De Toro y Arvidsson, 2003) y suelos con contenido de agua superior al límite plástico son fácilmente deformados y compactados.

De acuerdo con Aluko y Seig (2000) la movilización del suelo es causada por cizallamiento, donde las partículas se someten a compresión por tensión, situación en que el suelo se agrieta, y por deformación plástica, situación indeseada ya que el suelo sólo se deforma en la superficie de contacto con la herramienta, lo cual puede conllevar a la compactación.

La labranza primaria adquiere importancia en la preparación del suelo debido a que la remoción es alta y que esta labor afecta en gran medida las propiedades físicas del suelo y directa e indirectamente las propiedades químicas y biológicas. Por otra parte, es la actividad agrícola que demanda la mayor cantidad de combustible fósil (IDAE, 2006). Es importante señalar que la

preparación de los suelos debe favorecer la producción de los cultivos y mantener la calidad de los mismos.

En la actualidad debido al uso excesivo e inadecuado de los implementos de labranza, se provoca la degradación de suelo y genera la baja rentabilidad de los cultivos; la búsqueda de soluciones a esta problemática ha conducido al estudio e implantación de sistemas de labranza de tipo conservacionista (no inversión del suelo), incluyendo a la labranza vertical, con el fin de disminuir el impacto sobre el medio ambiente y especialmente sobre el suelo. Por lo anterior es importante conocer diferentes parámetros operativos de los implementos de labranza y su incidencia en el suelo (Camacho y Rodríguez 2007).

Para disminuir tales impactos y para un ahorro adecuado de energía se implementa la labranza vertical, que es parte de la labranza de conservación y ésta se puede realizar con implementos tales como los arados de cinceles, la cultivadora de campo, el vibrocultivador y el multiarado. Utilizando un sistema de cinceles y subsoladores es importante considerar el ángulo de ataque para así obtener bajos valores de fuerza de tracción y en consecuencia bajos valores en consumo de energía (Aluko y Seig, 2000), así como la menor resistencia específica (Magalhaes y Souza, 1990; Chaudhuri, 2001). Por otra parte, McKyes (1985) describe que para el trabajo con cinceles existe una profundidad crítica, en la cual no existe remoción lateral de suelo, y que esta depende del ancho de trabajo del implemento y de su ángulo de ataque, así como de la densidad y contenido de humedad del suelo. Para trabajar a profundidades mayores a la profundidad crítica, es recomendable el uso de alas laterales acopladas a los cinceles en la punta de ellos, lo cual reduce también la resistencia específica y favorece el ancho de trabajo y la eficiencia de campo (McKyes, 1985).

Para los análisis anteriores, hasta el momento en nuestro país, no se cuenta con información acerca del desempeño, en términos de eficiencia de la demanda de fuerza de tiro de implementos agrícolas de labranza vertical. Por otra parte se desconoce la maquinaria e implementos más apropiados para los

diferentes sistemas de siembra y tipos de suelo y cómo estos pueden incrementar la producción agrícola, a su vez, reducir los costos de producción y energía, optimizando sistemas de labranza de conservación y/o convencionales (Campos, 2000).

Con relación a esta problemática, el propósito de este proyecto es la evaluación y determinación de los requerimientos de energía en la labranza vertical, a través de la aplicación del principio de profundidad crítica y del uso de un transductor integral como dispositivo de monitoreo, aplicado en un sistema de arreglos de cinceles (ancho de trabajo, profundidad y número de cinceles) con y sin alas expansoras. Con la finalidad de evaluar los parámetros profundidad de labor, porcentaje de patinaje y fuerza total demandada.

Las actividades de la propuesta descritas con anterioridad forman parte del proyecto “USO DE LABRANZA VERTICAL Y AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN LA OPTIMIZACIÓN DE ENERGÍA EN LAS LABORES PRIMARIAS”, el cual se encuentra actualmente en operación en el Departamento de Maquinaria Agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

## **Objetivos e hipótesis del trabajo.**

### Objetivo general

Determinar los requerimientos de energía en la labranza vertical con seis arreglos espaciales de cinceles.

### Objetivos específicos.

- Desarrollar dos transductores octagonales de anillos extendidos.
- Evaluar bajo condiciones de laboratorio y campo los transductores octagonales de anillos extendidos.
- Determinar la demanda de fuerza aplicada en seis arreglos de cinceles.

### **Hipótesis**

Mediante el empleo de sensores octagonales extendidos es posible determinar las magnitudes de fuerzas de reacción del suelo de diferentes arreglos espaciales en labranza vertical.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Manejo de suelos con implementos de labranza.

Actualmente la investigación brinda una mejor capacidad de explicar el efecto de labranza sobre suelos, aunque definitivamente no todos los procesos se entienden bien. La labranza es una actividad que modifica la estructura de la capa superficial del suelo, sin embargo existen efectos directos e indirectos que se logran con la labranza, entre los cuales se encuentran; facilitar la producción de los cultivos, el control de malezas, acondicionar la superficie del suelo para permitir una buena irrigación y una cosecha más fácil, además de facilitar la incorporación de materia orgánica, fertilizantes, pesticidas, entre otros (Hoogmoed, 1999).

El hombre incorpora la labranza cuando intenta controlar la vegetación natural, con el fin de poder desarrollar especies de su interés. Los principales objetivos de la labranza son el control de malezas, preparación de la cama de siembra y el acondicionamiento de las propiedades físicas del suelo (FAO<sup>a</sup>, 2003).

A pesar de los rápidos logros en los recientes años, la labranza está muy lejos de ser considerada una ciencia exacta. Aunque uno de los principales objetivos de la labranza es proporcionar un óptimo entorno en el crecimiento de las plantas, no está en consideraciones de especificar e identificar cuantitativamente las condiciones deseadas en el suelo (Soane y Pidgeon, 1975).

Los sistemas de labranza se clasifican según (Friedrich, 1997) en:

### 2.2. Labranza primaria

La labranza primaria es la labranza tradicional que se extiende a toda la capa arable o sea al horizonte A. Esta sirve para eliminar compactaciones superficiales, abrir el suelo y crear una estructura grumosa para acumular agua



y muchas veces también incorporar, a través de la arada, plagas, malezas y semillas de malezas.

La profundidad de la labranza primaria depende de la fuerza de tracción disponible. Con tracción animal es normalmente entre 10 y 20 cm; con el tractor, especialmente con el aumento de potencia de los tractores modernos, se llega en algunos países hasta 40 cm. Existe una amplia polémica sobre la profundidad de la labranza primaria. En general no se debería aumentar la profundidad de labranza sólo porque se dispone de la potencia necesaria. En suelos con una capa de suelo delgada esto puede literalmente destruir el suelo, lo que ocurre frecuentemente cuando se usan tractores. El incremento de cosecha que coincide a veces con una profundización de la capa arable, sólo en pocos casos es sostenible. Esto depende mucho de la fertilidad y la profundidad del suelo. Por otro lado: con una buena estructura del suelo las raíces de las plantas llegarán a las partes más profundas sin necesidad de una labranza profunda.

A largo plazo, la labranza profunda consume más combustible mientras que los beneficios no están asegurados.

### **2.3. Labranza vertical**

La labranza vertical del suelo es uno de los métodos más apropiados para trabajar el suelo sin que los horizontes cambien su posición relativa, no quedando una separación neta entre la parte removida y la que no lo está. El efecto de fracturación puede extenderse en profundidad o lateralmente cuando el suelo está seco y se utiliza la herramienta apropiada, todo ayudado por el efecto de vibración de los elementos mecánicos que actúan. La labranza vertical al trabajar verticalmente el suelo y mantener cobertura vegetal sobre la superficie contribuye a su conservación, puesto que favorece la infiltración, elimina costras, limita la evaporación evitando el movimiento superficial del suelo por el agua y el viento (Biblioteca digital de la universidad de Chile).

[http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias\\_agronomicas/villar04/parte10/01.html](http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_agronomicas/villar04/parte10/01.html)

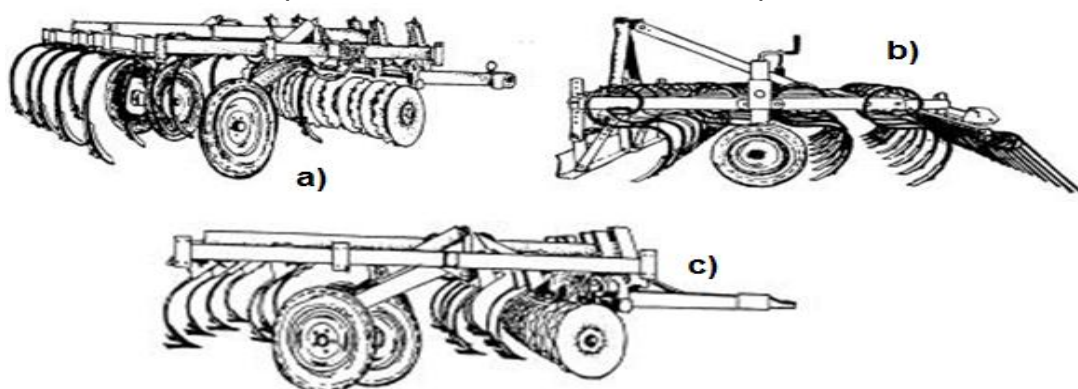
### 2.3.1. Conceptos y parámetros de la labranza vertical

Al evaluar algunas propiedades físicas del suelo luego de la introducción de la labranza vertical en un suelo bajo siembra directa, Elizondo *et al.* (2001) menciona que la introducción de éste tipo de labranza en un suelo, tratado con siembra directa, no produce deterioro de las condiciones físicas del suelo. También menciona que en la labranza vertical no existen altos valores de resistencia mecánica o resistencia a la penetración de implementos comparándola con altos valores en la siembra directa.

La siguiente sección ha sido tomada de la publicación "Labranza Vertical" escrito por Barber, Navarro y Orellana (1993).

La principal característica de la labranza vertical es que utiliza brazos o flejes equipados con puntas en lugar de discos para aflojar el suelo sin invertirlo, dejando en la superficie una cobertura protectora formada por los residuos del cultivo anterior y por las malezas arrancadas.

Los implementos principales en la labranza vertical son el arado cincel rastrojero, el vibrocultivador y el cultivador de campo rastrojero (Figura 2.1). Se debe notar que la terminología empleada para los implementos ilustrados sigue la usada por los fabricantes o aquella más comúnmente usada. Las ilustraciones sirven para clarificar las definiciones empleadas.



**Figura. 2.1.** a) Arado de cincel rastrojero, b) Vibrocultivador con placa niveladora y peine, c) Cultivador de campo rastrojero (Friedrich, 1997).

### 2.3.2. Ventajas de la labranza vertical

La labranza vertical sostiene mejor la productividad de los suelos debido a la presencia de los rastrojos en la superficie que protegen el suelo contra los procesos de erosión. Esta cobertura de rastrojos también impide la formación de costras superficiales (planchado) que pueden provocar una baja emergencia de los cultivos.

Los implementos de labranza vertical causan poca compactación, es decir no forman una capa dura en el subsuelo (piso de arado) que limita la profundización de las raíces. En cambio los discos de labranza convencional ocasionan capas duras.

Debido a que la labranza vertical no invierte el suelo, hay menos descomposición de la materia orgánica y menos pérdida de humedad, que es muy importante de la siembra. (Ver Cuadro 2.1 para un ejemplo de los efectos de la labranza vertical sobre el contenido de humedad en el suelo, la cobertura de rastrojo y el rendimiento de maíz en comparación con otros sistemas de labranza).

**Cuadro. 2.1.** Contenido de humedad, cobertura de rastrojos y rendimiento de maíz para cuatro sistemas de labranza en Oxford, North Carolina, EE.UU. 1985 (Fuente: Cook y Lewis, 1989).

Sistema de labranza	Humedad (%)	Cobertura de rastrojos (%)	Rendimiento de maíz (t/ha)
Labranza cero	13	90	5,77
Labranza vertical	12	33	5,58
Arado cincel disco	9	14	4,70
Labranza convencional	6	3	3,57

La labranza vertical es un sistema ventajoso en un amplio rango de tipos de suelo, inclusive en los que tienen problemas de drenaje y que son susceptibles a la compactación. La eficacia operativa del sistema de labranza vertical es más alta que la de labranza convencional, sobre todo debido a que el vibrocultivador trabaja con mayor velocidad y tiene mayor ancho de trabajo que la rastra de discos. Por consiguiente es posible preparar entre 50 hasta 80 %

más de superficie por día con labranza vertical, en comparación con la labranza convencional.

Además, se ha estimado que el costo de adquirir y de mantener los implementos de labranza vertical durante 10 años es por lo menos 25 % menor que el de los implementos de labranza convencional. Eso es sobre todo debido a un costo más elevado para el mantenimiento de los discos que de las puntas.

### **2.3.3. Las limitaciones de la labranza vertical**

La mayor limitación de la labranza vertical es la dificultad de controlar mecánicamente las malezas estoloníferas y rizomatosas en condiciones húmedas, especialmente las gramíneas, como por ejemplo el pasto Bermuda (*Cynodon dactylon*). En la labranza vertical los implementos arrancan las malezas y las dejan en la superficie. Si por algunos días no llueve y la superficie del suelo está húmeda rebrotan fácilmente; por eso, en el caso de una parcela muy enmalezada es mejor no usar la labranza vertical.

Este problema es mucho más grave en los cultivos de maíz y sorgo donde no existen herbicidas (o son antieconómicos) para el control de post-emergencia de malezas gramíneas. Otra limitación de la labranza vertical es que podría incidir en incrementos de plagas y enfermedades asociadas con los rastrojos que no se entierran completamente. Esto sucedería más probablemente, donde se practica el monocultivo.

### **2.3.4. Pre-requisitos para la implementación de la labranza vertical**

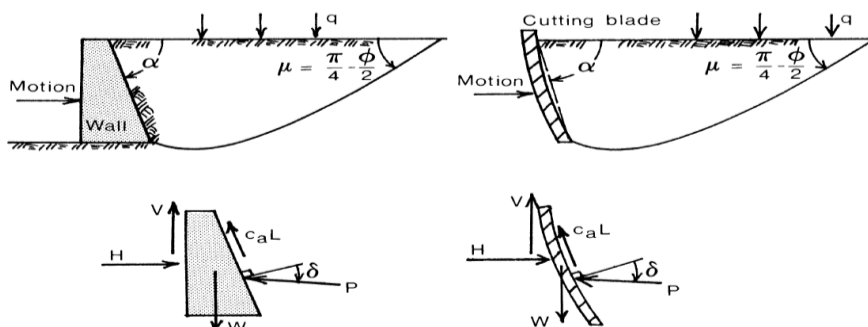
La labranza vertical, como cualquier sistema de labranza, da los mejores resultados en suelos fértiles, no compactados, bien drenados, emparejados y sin problemas de malezas. Antes de iniciar la labranza vertical, si el suelo está compactado se debe descompactar, emparejar las parcelas si fuera necesario, y rectificar cualquier deficiencia nutricional que se presente.

Para la implementación exitosa de la labranza vertical es importante que los rastrojos y las malezas sean bien triturados y uniformemente distribuidos en la parcela. Así se puede evitar el atascamiento en los implementos. Para ello, es recomendable que la cosechadora esté equipada con picadora y distribuidora de paja.

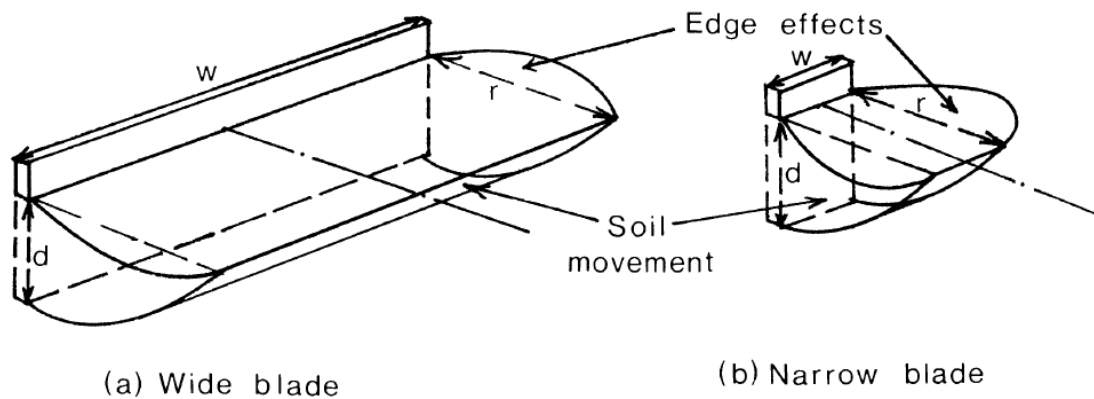
Además, para disminuir el tamaño de los tallos de maíz, sorgo, girasol o algodón que quedan después de la cosecha, es necesario pasar una desbrozadora. Tampoco se debe dejar crecer las malezas en el barbecho. Una vez que alcanzan a unos 15 cm de altura, se debería desbrozar para evitar problemas de competencia de las malezas y de atascamiento de la maquinaria.

## 2.4. Profundidad crítica

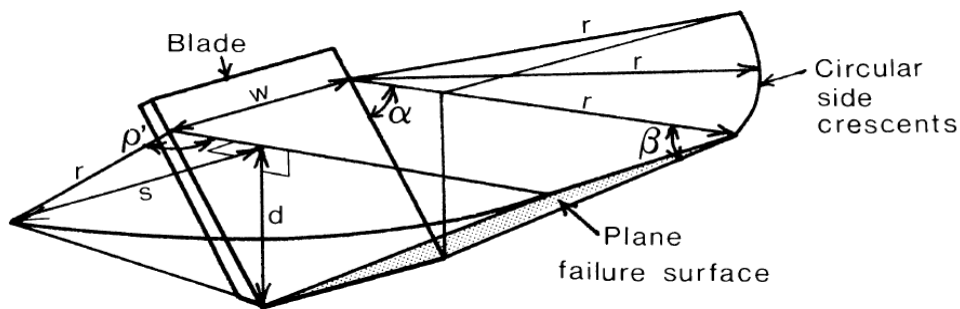
Los modelos de corte del suelo, ya sea en dos o tres dimensiones, han asumido que el suelo se mueve hacia arriba en todo el rango de profundidad de la herramienta de corte (por ejemplo, Fig. 2.2, 2.3 y 2.4). Se ha observado que este no siempre es el caso, especialmente en donde un implemento de corte angosto está operando a profundidades en un suelo plástico. Kostriksyn (1956) reportó observaciones de este fenómeno el cual ha sido llamado "la profundidad crítica", y sugiere a partir de su experiencia, que esta profundidad es generalmente de siete a ocho veces el ancho de la herramienta.



**Figura 2.2.** Una comparación entre un muro de contención y una falla de suelo con cuchilla de corte (McKyes, 1988).



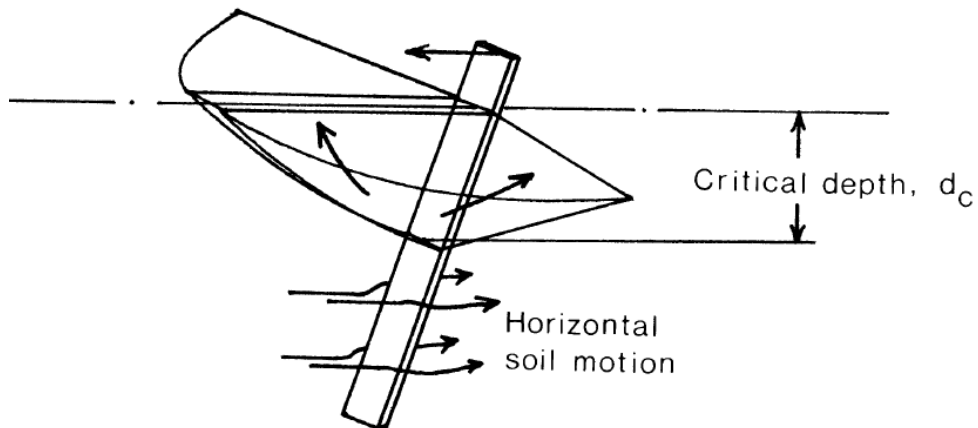
**Figura 2.3.** La diferencia en movimiento patrón de suelo entre una cuchilla ancha y una cuchilla de corte estrecha (McKyes, 1988).



**Fig. 2.4.** Modelo de falla del suelo tridimensional (McKyes and Ali, 1977).

$$r = r \sin \rho' = d \sqrt{\cot^2 \beta + 2 \cot \alpha \cot \beta} \dots\dots\dots (2.1)$$

La figura (2.5) ilustra esquemáticamente lo que ocurre en el suelo cuando una profundidad crítica está presente. La profundidad crítica *dc* (siglas en inglés) se puede definir aproximadamente como un punto debajo del cual el suelo es desplazado por una herramienta principalmente a lo largo de líneas horizontales. Por encima de la profundidad crítica, el suelo se mueve horizontalmente y hacia arriba como en los modelos anteriores. Informes del valor de la profundidad crítica han variado considerablemente dependiendo del tipo de suelo en cuestión.



**Fig. 2.5.** Ilustración de la profundidad crítica en el corte del suelo (O'Callaghan and Farrelly, 1964).

O'Callaghan y Farrelly (1964) observaron profundidades críticas del mismo orden de las magnitudes, así como, del ancho, cuando evaluaron cuchillas verticales de acero en suelos plásticos arenosos y arcillosos. Usando herramientas similares, sin embargo, Miller (1971) encontró profundidades críticas hasta 14 veces la dimensión del ancho de la cuchilla en arena dura, y Godwin (1974) observó la profundidad crítica en rangos de ancho de cuchilla con una variación de 10 a 16, dependiendo del ángulo de inclinación de la cuchilla en un suelo franco arenoso friable.

En 1974, Godwin también postuló un modelo con el cual el régimen de fuerzas en el suelo puede ser analizado cuando una profundidad crítica está presente. Como se representa en la figura (2.6) el suelo es movido a los lados de la herramienta en mayores profundidades que el crítico, a lo largo de trayectorias espirales logarítmicas, similar al modelo de fundación de falla profunda postulado por Meyerhof (1951). La efectividad final de las espirales a lo largo de la cual se mueve el suelo se localiza en ángulo ( $\theta$ ) por detrás de la cara de la cuchilla. En la parte posterior de la herramienta, una presión horizontal se supone que actúan sobre el suelo, y se calcula como "en reposo" presión de tierra (fórmula). La fórmula Meyerhof (1951) se utiliza entonces para calcular la

presión horizontal,  $q'$ , que actúa sobre la cara de la herramienta por debajo de la profundidad crítica.

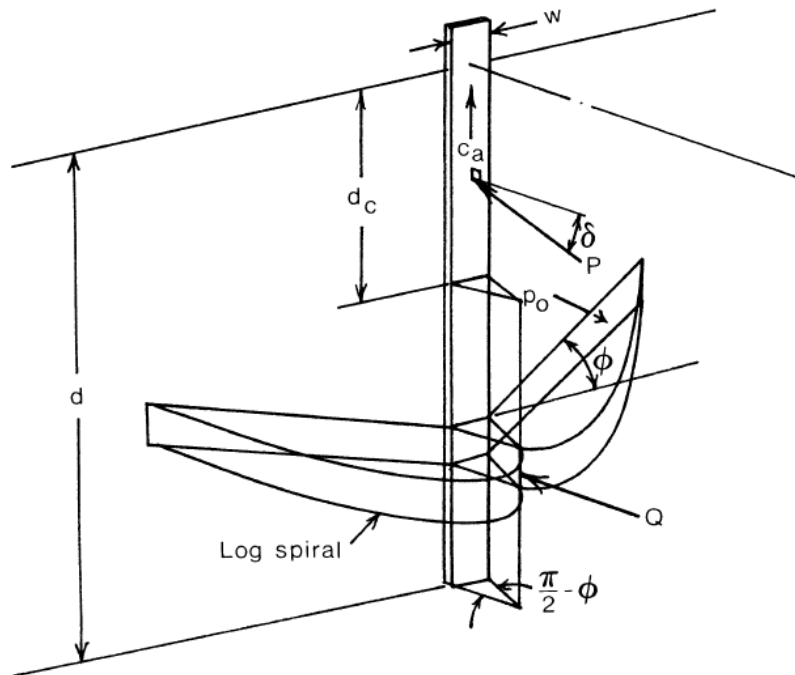
$$q' = cN'_c + p_0N'_q = cN'_c + \gamma zK_oN'_q \dots\dots\dots (2.2)$$

$$N'_q = \left[ \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} \right] e^{2(\pi/2+\phi)\tan\phi} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$N'_c = \cot\phi \left[ \left[ \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} \right] e^{2(\pi/2+\phi)\tan\phi} - 1 \right] \dots\dots\dots (2.4)$$

La integración de esta fuerza horizontal de la profundidad crítica hasta la parte inferior de la cuchilla se obtiene la fuerza total  $Q$  que actúa sobre esta parte de la herramienta.

$$Q = [cN'_c(d - d_c) + \frac{\gamma}{2}K_oN'_q(d^2 - d_c^2)]w \dots\dots\dots (2.5)$$



**Fig. 2.6.** El modelo de la fuerza para la falla de profundidad crítica de Godwin (1974).

Para la fuerza  $P$  en la parte de la cuchilla por encima de la profundidad crítica, se utiliza el modelo tridimensional (Ecuación 2.1). Esto es la fuerza total



horizontal requerida para mover el implemento, es la suma de  $Q$  por debajo de la profundidad crítica y  $H_1$  por encima de ella, como se muestra a continuación.

$$H = Q + H_1 = Q + P \sin(\alpha + \delta) + c_a d_c w \cot \alpha \dots\dots\dots (2.6)$$

Además, Godwin (1974) observó que la localización de la profundidad crítica podría ser predicha teóricamente usando el modelo anterior. Si los valores de prueba de la profundidad crítica se eligen, las fuerzas  $P$  y  $Q$  que actúan por encima y por debajo de esta profundidad pueden hallarse. Combinando en términos como en la ecuación (2.6) nos da la fuerza total, estimando la fuerza de tiro de la herramienta. Siguiendo el principio de falla de suelo en la trayectoria de menor resistencia, es lógico que la profundidad crítica sea la que resulta en el menor requerimiento de fuerza en la herramienta. Por lo tanto, el ensayo donde la profundidad crítica da la menor fuerza total,  $H$ , es igual.

## 2.5. Cinceles, su modo de acción, fuerzas y ajustes

(Friedrich, 1997) menciona que los cinceles, por su modo de acción, son la herramienta de labranza que más se parece al arado de madera. Al introducir el cincel en el suelo causa la compresión de este. El suelo finalmente escapa hacia arriba dejando una zona de rotura que parte de la punta del cincel aproximadamente en un ángulo de  $45^\circ$  en suelos secos. Por lo tanto, el cincel sirve para roturar el suelo. Los cinceles usados con tracción animal se limitan prácticamente a este tipo de acción. Aplicando velocidades mayores el suelo es también movido a los lados. Esta acción puede ser apoyada por ciertos tipos de punta del cincel. Por esta razón los arados de cinceles para tractores usados a velocidades alrededor de  $10 - 12 \text{ km h}^{-1}$  tienen una buena acción mezcladora.

El impacto del cincel sobre los grumos y los terrones lleva también a una pulverización del suelo. Sin embargo, este efecto no es muy pronunciado en suelos sueltos. Por lo tanto, la repetición de un pase de cincel en suelos sueltos no lleva a una mayor pulverización del suelo. Los cinceles dejan el suelo

ondulado tanto en la superficie como en el fondo por la zona de rotura partiendo de la punta en un ángulo de 45°. Por eso se recomienda, para el uso de cinceles en la labranza primaria hacer al menos dos pases cruzados para emparejar el perfil.

Las fuerzas que actúan sobre un cincel en el suelo dependen mucho de la forma y sobre todo del ángulo de ataque. Un ángulo de ataque agudo mejora la penetración y reduce la fuerza de tracción. Además mejora el efecto de la roturación y la mezcla del suelo porque lleva una parte del material del suelo de horizontes inferiores hacia arriba. Esta característica puede ser una desventaja en situaciones donde la punta del cincel toca material húmedo de horizontes inferiores y los transporta a la superficie en forma de pequeños cilindros o terrones que después son difíciles de desmenuzar.

Mientras el cincel simple no necesita mucha fuerza de tracción y se presta para la tracción animal, el uso de grupos de cinceles para la homogeneización del suelo y la mezcla a altas velocidades está limitada a tractores relativamente potentes. Esto resulta de la necesidad de cubrir con el implemento al menos el ancho del tractor y de usarlo a altas velocidades.

Los cinceles vibratorios montados sobre resortes sirven generalmente para mejorar la acción de pulverización y para arrancar malezas. Generalmente se usan para la labranza secundaria en profundidades hasta 15 cm, mientras que los cinceles rígidos se usan para la labranza primaria y el subsolado.

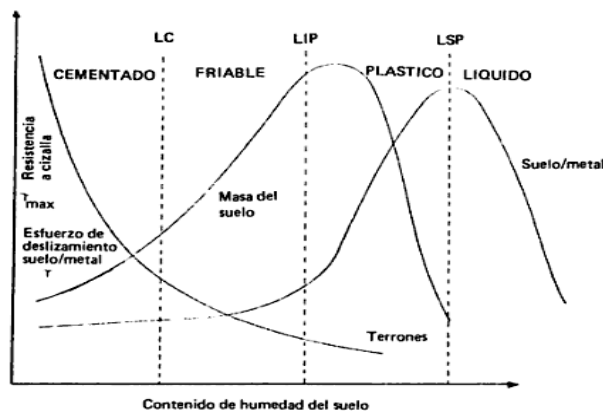
## **2.6. Factores que determinan la fuerza de arrastre en las herramientas de labranza**

Las fuerzas aplicadas a una herramienta de labranza para producir un efecto dado en el suelo pueden ser medidas con exactitud, pero no se puede predecir con confiabilidad los efectos de los cambios en el diseño de la herramienta. Consecuentemente, no debe ser una sorpresa saber que el diseño de los equipos de labranza es más un arte que una ciencia (Ashburner y Sims, 1984; Gill and Venden Berg, 1967; Triplett and Van Doren, 1977).

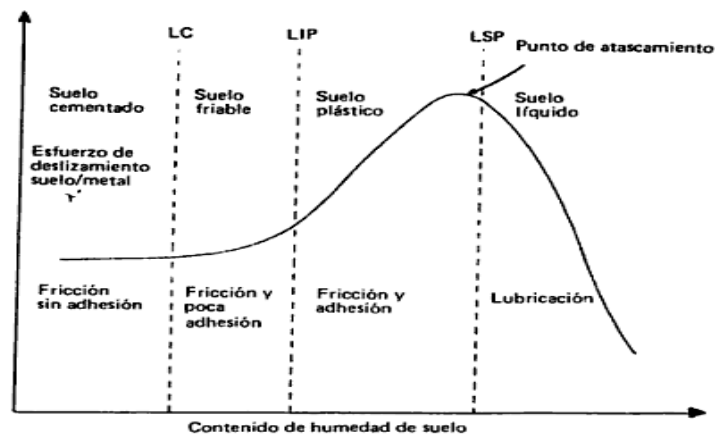
La fuerza de arrastre depende básicamente de cinco factores principales: los parámetros suelo/suelo; los parámetros suelo/interfase; la forma de la herramienta; velocidad de avance; y la vibración de la herramienta.

### 2.6.1. Los parámetros suelo/suelo y suelo/interfase

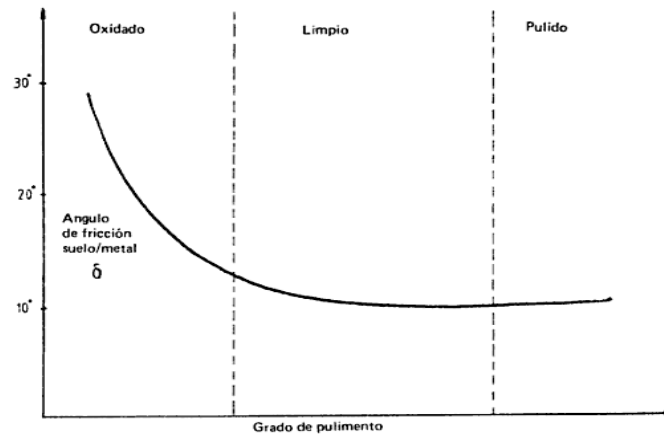
Se destaca la importancia de la humedad del suelo y su incidencia sobre la factibilidad y eficiencia de labranza, y sobre la resistencia de la masa del suelo y los agregados, como se muestra en la figura (2.7) y (2.8). Las posibilidades de manejar los parámetros suelo/interfase removiendo la oxidación y lubricando la cara del diente como se muestra en la figura (2.9).



**Figura. 2.7.** Relación del contenido de humedad del suelo con la resistencia de terrones, la masa del suelo y al deslizamiento al interfaz suelo/metal (Ashburner y Sims, 1984).



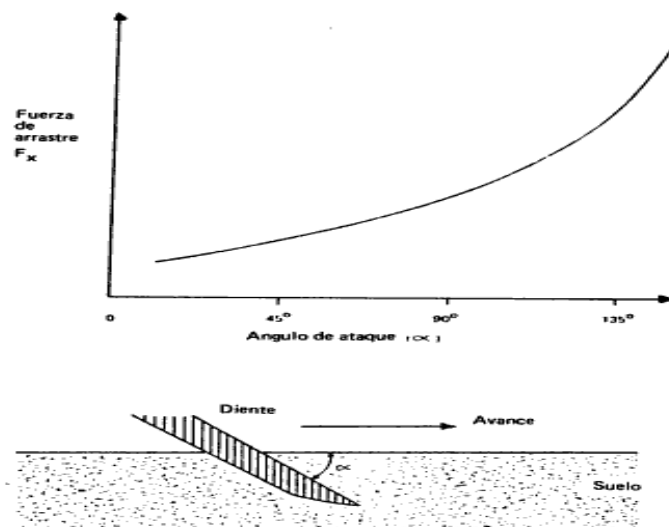
**Figura. 2.8.** Efectos del contenido de humedad sobre el esfuerzo de deslizamiento suelo/metal (Ashburner y Sims, 1984).



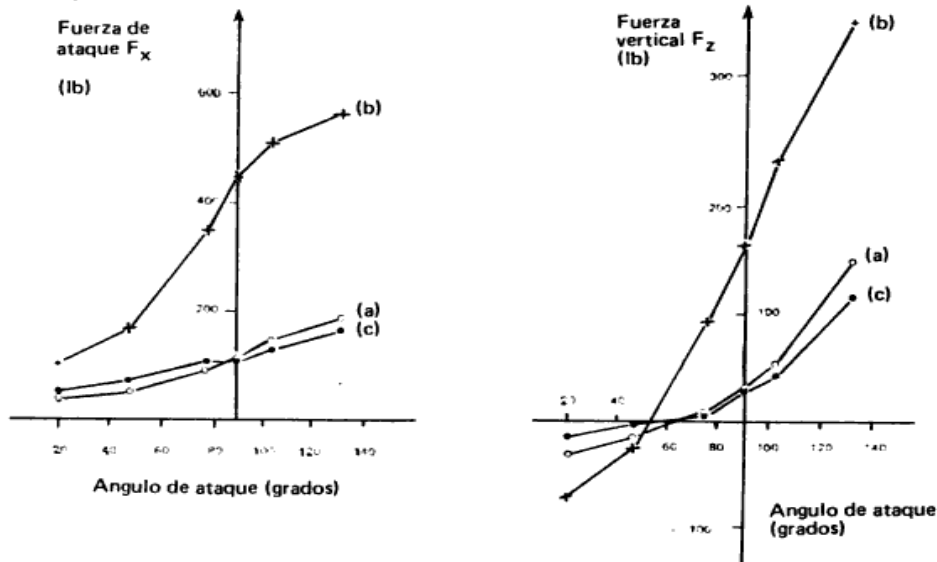
**Figura. 2.9.** Efecto del pulimento de la superficie de contacto sobre el ángulo de fricción suelo/metal (Ashburner y Sims, 1984).

### 2.6.2. La forma de la herramienta

El ángulo de ataque y el ancho del diente afectan la fuerza de arrastre, como se muestra en la figura (2.10) y (2.11). Generalmente la fuerza de arrastre aumenta suavemente para los ángulos de ataque de  $10^\circ$  hasta los  $50^\circ$ , pero ángulos mayores producen un fuerte crecimiento de la fuerza de arrastre; ello significa que debe seleccionarse un ángulo menor que  $50^\circ$ , siempre y cuando se efectúe la labranza deseada (McKyes, 1985).



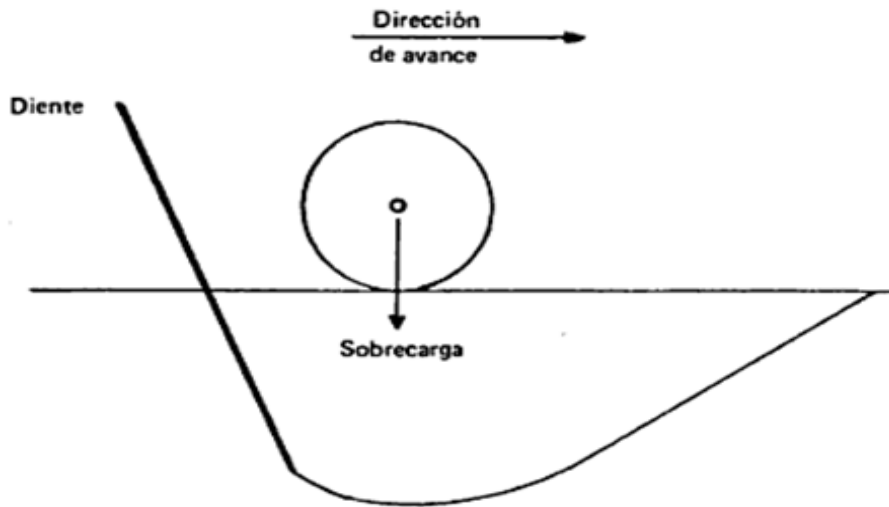
**Figura. 2.10.** Efecto del ángulo de ataque (a) sobre la fuerza de arrastre ( $F_x$ ) de un diente (McKyes, 1985).



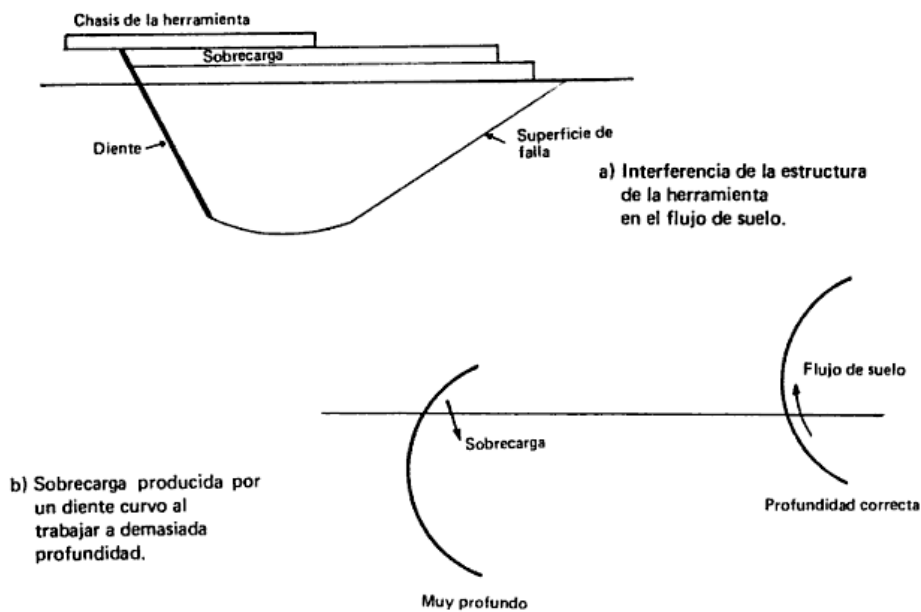
**Fig. 2.11.** Relación del ángulo de ataque de un diente angosto con la fuerza de arrastre  $F_x$  y la fuerza vertical  $F_z$ ; a) arena con 3.8 % de humedad; b) franco arenoso con 9.4 % de humedad; c) arcilla con 18.2 % de humedad (McKyes, 1985).

La resistencia del suelo aumenta con la sobrecarga de la superficie y la compactación. Por lo tanto para minimizar la fuerza de arrastre de la herramienta no debería seguir las huellas del tractor, aunque esto no siempre es deseable según los objetivos de la labranza. El diseño de la herramienta puede disminuir los efectos innecesarios de una sobrecarga por una selección cuidadosa del espaciamiento de los dientes, el diseño de la estructura y la ubicación de las ruedas de profundidad como se muestra en la figura (2.12) y (2.13), (Ashburner y Sims, 1984; McKyes, 1985).

También es importante proporcionar un adecuado restregamiento del suelo por el diente, esto significa que las curvas deben de ser ligeras, empezando a optimizar con un ángulo de ataque pequeño y luego aumentándose.



**Figura. 2.12.** Manera en que la mala ubicación de una rueda de soporte de la herramienta sobrecarga la zona de falla del suelo y aumenta la fuerza de arrastre (Ashburner y Sims, 1984).



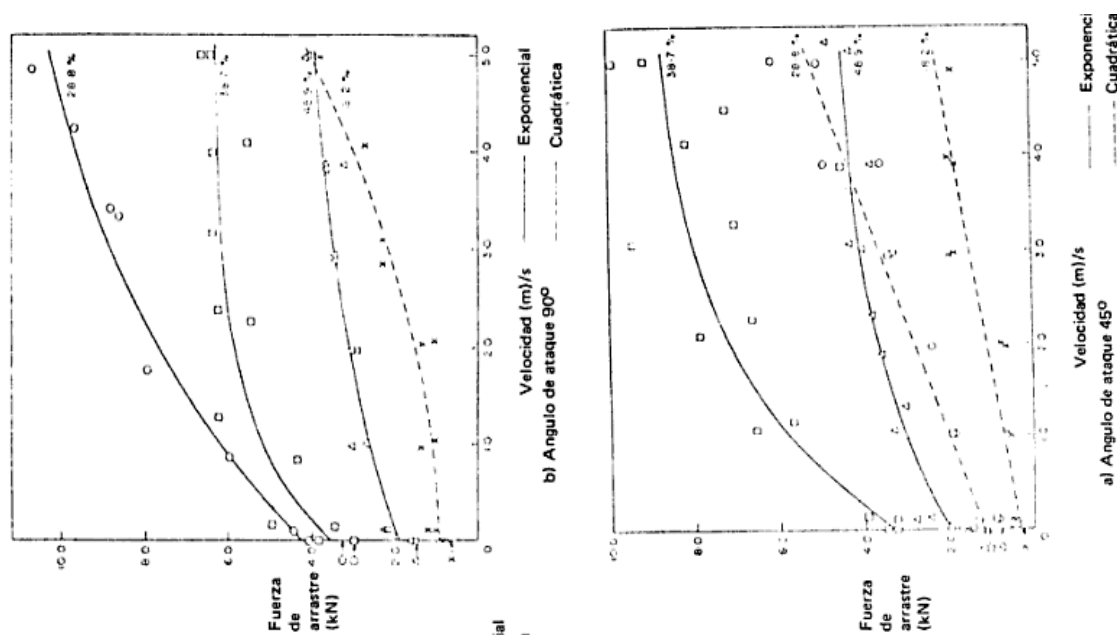
**Figura. 2.13.** El diseño o uso inapropiado de las herramientas puede producir una sobrecarga innecesaria que aumenta la fuerza de arrastre (Ashburner y Sims, 1984; McKyes, 1985).

### 2.6.3. Velocidad de avance

Una mayor velocidad de avance de la herramienta ocasiona un aumento en la aceleración de las partículas y agregados del suelo. Por esta razón la fuerza de arrastre tiende a ser proporcional a la velocidad al cuadrado (Gill and Vanden Berg 1967; Kepner, Bainer and Barger, 1978).

Summers *et al.* (1986), mostraron que la fuerza de arrastre es lineal con la velocidad en los arados de cincel y de discos, pero que es proporcional al cuadrado de la velocidad en el arado de vertederas.

Debe destacarse también la importancia de la humedad en la relación resistencia/velocidad. Parece ser un contenido de humedad algo menor que el límite inferior de plasticidad, LIP, la resistencia es aproximadamente proporcional a la velocidad al cuadrado como se muestra en la figura (2.14). En cambio con un mayor contenido de humedad la relación es exponencial, mostrando muy poco aumento en la fuerza de arrastre con velocidades mayores a unos 5m/s, probablemente debido al comportamiento del suelo como una clase especial del líquido viscoso (de Dios, 1972; Mc Kyes, 1985).



**Fig. 2.14.** La relación de la fuerza de arrastre de un diente con la velocidad depende del contenido de humedad, siendo una relación cuadrática con baja humedad y exponencial a alta humedad. Los resultados son para suelo arcilloso con LIP 39 %. Humedad: X 18.2 %, O 28.8 %, □ 38.7 %, Δ 48.9 % (de Dios, 1972; McKyes, 1985).

## 2.7. Consumo de energía en la labranza

Edmundo (1987), menciona que la determinación para la demanda energética de una operación de labranza exige conocer el valor de la fuerza por unidad de ancho necesaria para arrastrar el equipo en el campo. Este valor de la fuerza y la velocidad de trabajo permiten obtener la potencia necesaria para accionar, un equipo de un tamaño determinado. Estas relaciones se muestran en la ecuación (2.7).

$$Potencia = \frac{Fuerza * Velocidad}{FPT * 3.6} \dots\dots\dots (2.7)$$

El gasto energético por *ha* se establece asociando el valor de la potencia con la capacidad efectiva de trabajo (CET) del equipo, que tiene incluida una estimación de la eficiencia de campo.

La potencia de trabajo requerida para trabajar con diversas herramientas es variable y depende de varios factores. Entre ellos se encuentra la textura y contenido de humedad del suelo, la velocidad y profundidad de trabajo, la naturaleza del material de la herramienta deslizante, sea metálico, plástico o madera. A pesar de la posibilidad de poder predecir la fuerza de arrastre de ciertas herramientas bajo condiciones específicas, una predicción práctica y realista es difícil por la variabilidad de las condiciones en un campo agrícola. Normalmente se encuentran en zonas muy húmedas y mal drenadas, compactadas, con pendiente, piedras y otros obstáculos que obligan al operador a cambiar la velocidad de trabajo (Ashburner y Sims, 1984).



Sin embargo, es importante manejar algún procedimiento que permita estimar la potencia requerida para trabajar con diversas herramientas en condiciones normales y así permitir la selección de tractores y equipos en forma racional, lo cual también, permite ejecutar un análisis económico del sistema de mecanización seleccionado (de Dios, 1972; Hunt, 1977).

La humedad del suelo es un factor que incide directamente en la fuerza de tracción y requerimientos de potencia en la preparación del suelo. Suelos secos presentan agregados con alta cohesión, siendo más alta en suelos arcillosos, requiriendo mayor fuerza de tracción para ser disturbados. La cohesión disminuye a medida que el contenido de agua aumenta en el suelo (Mouazen y Ramón, 2002), aumentando entonces la adhesión que las partículas del suelo sobre la superficie de la herramienta y afectando la fuerza de tracción. Arvidsson *et al.*, (2004) encontraron que el contenido de agua adecuado para las labores de labranza es cercano al límite plástico de suelo; también incluyeron que la profundidad de trabajo aumenta a mayor contenido de humedad del suelo, disminuyendo la resistencia específica. Por otra parte, la labor en un suelo seco favorece la formación de terrones grandes (De Toro y Arvidsson, 2003) y suelos con contenido de agua superior al límite plástico son fácilmente deformados y compactados.

Camacho y Rodríguez (2007), midieron el área transversal del suelo disturbado, la profundidad de trabajo, el ancho de trabajo, la fuerza de tracción y la resistencia específica para diferentes implementos de labranza con tres contenidos de agua en el suelo y tres velocidades de operación, indicando que el contenido de agua afectó todos los implementos de labranza, destacando el arado de discos y el arado de cincel vibratorio, en la cual muestra que el arado de cincel rígido es energicamente más eficiente para preparar el suelo, con una resistencia específica baja y una mayor área transversal de suelo disturbado.

Martínez *et al.*, (2001) presentan una serie de ecuaciones que pueden servir como herramienta de soporte en la toma de decisiones para la selección y operación de implementos de labranza concluyendo que los modelos resultantes pueden utilizarse con fines de predicción.

Con base en resultados estadísticos se determinó que entre la intensidad de labranza y la energía utilizada ( $kW ha^{-1}$ ) para cada tratamiento, existe una relación significativa cuyo coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.935$ ). Este indica una alta dependencia entre estos dos parámetros, por lo que se propone la ecuación 1 para estimar el consumo energético requerido al preparar el suelo en función de la intensidad de labranza originada por un implemento determinado. Además las ecuaciones (2.8), (2.9), (2.10) y (2.11) para la estimación del requerimiento energético con los implementos para ellas especificados.

$$RE = -3.123 + (0.5512)(IL) \quad R^2 = (0.935) \dots\dots\dots (2.8)$$

La ecuación (2.8) para los arados subsolador y de cinceles, cuando el ancho de corte de cada timón es menor o igual que la distancia (o separación) entre los timones (cuando en la superficie no queda terreno sin alterar):

$$RE (kW ha^{-1}) = -3.123 + (183.733)(PPL) - [(91.876)(PPL)(Dt)]/Act.. (2.9)$$

Cuando la distancia entre los timones sea mayor que el ancho de corte de cada timón (en la superficie queda terreno sin alterar), la ecuación se reduce a:

$$RE(kW ha^{-1}) = -3.123 + [(27.56)(Act)]/Dt \dots\dots\dots (2.10)$$

La ecuación (2.11) para el arado de discos y la rastra de discos:

$$RE(kW ha^{-1}) = -4.9052 + (183.733)(PLL) - [(2.5722)(Dd)]/A\dots\dots\dots (2.11)$$

La ecuación (2.12) para el arado de vertedera:

$$RE(kW ha^{-1}) = -4.9052 + 183.73PPL - (2.5722)\left(\frac{Ar}{A}\right)\dots\dots\dots (2.12)$$

Las ecuaciones propuestas están referidas a su intensidad de labranza, la cual presenta un valor diferente para cada implemento y condición de laboreo, por lo que los resultados pueden usarse para comparar la eficiencia de trabajo de los

implementos que se utilizan para realizar la preparación del suelo, tanto en función del grado de preparación, como el consumo energético, o bien para estimar la energía requerida para preparar un predio determinado.

Por su parte, Stafford (1983), desarrolló modelos para la predicción la acción de fuerza en las herramientas de labranza, los cuales toman en cuenta diferentes tipos de disturbio o falla de suelo que pueden ser causados por dichas herramientas. Muestran también que en, falla frágil, los efectos de velocidad es debido a la fuerza de inercia y tipos de efecto de fricción del suelo-metal.

## **2.8. Tecnología de implementos**

Los arados de cinceles tienen la función de descompactar el suelo lo que permite una mejor infiltración del agua, dejando la mayor parte de los residuos sobre la superficie, lo que ayuda a reducir la evaporación y erosión, (Buckingham, 1984).

En el laboreo al introducir un cincel en el suelo causa la compresión de éste. El suelo finalmente escapa hacia arriba dejando una zona de rotura que parte de la punta del cincel aproximadamente en un ángulo de  $45^\circ$  en suelos secos. Por lo tanto el cincel sirve para roturar el suelo. Los cinceles usados para tractores a velocidades alrededor de  $10-12 \text{ km h}^{-1}$ , tienen una buena acción de mezclado de suelo. Las fuerzas que actúan sobre el cincel en el suelo dependen mucho de la forma y sobre todo del ángulo de ataque. Éste ángulo mejora la penetración y reduce la fuerza de tracción, mejora el efecto de roturación y la mezcla del suelo porque lleva una parte del material del suelo de horizontes inferiores hacia arriba. (FAO<sup>a</sup>, 2003).

Kepner *et al.*, (1978) describen que las reacciones de los suelos debido a las fuerzas aplicadas por implementos de labranza son afectadas por la resistencia del suelo a compresión, la resistencia al corte, adhesión (fuerzas atractivas

entre el suelo y algún otro material), y la resistencia a la fricción. Estas son todas las propiedades dinámicas que se hacen de manifiesto solamente a través del movimiento del suelo. Con el avance de la herramienta, el suelo en esta trayectoria está sujeto a esfuerzo de comprensión que, en un suelo friable, resulta ser una acción de corte. El cortado de los suelos es considerablemente diferente del cortado de muchos sólidos, esto es debido a que la reacción puede ser ejercida por una distancia considerable sobre cualquiera de los lados del plano de corte por la fricción interna y la acción cohesiva de las películas de humedad.

De acuerdo con Aluko y Seig (2000), la movilización del suelo es causada por cizallamiento, donde las partículas se someten a compresión por tensión, situación en que el suelo se agrieta, y por deformación plástica, situación indeseada ya que el suelo sólo se deforma en la superficie de contacto con la herramienta, lo cual puede conllevar a la compactación.

Para cinceles y subsoladores es importante considerar el ángulo de ataque, ya que para un valor cercano 0,436 radianes se presentan bajos valores de fuerza de tracción (Aluko y Seig, 2000), así como la menor resistencia específica (Magalhães y Souza, 1990; Chaudhuri, 2001). Por otra parte, McKyes (1985) describe que para cinceles existe una profundidad de trabajo crítica, en la cual no existe remoción lateral de suelo, y que ésta depende del ancho del implemento y de su ángulo de ataque, así como de la densidad y contenido de humedad del suelo. Para trabajar en profundidades mayores a la crítica, es recomendable el uso de aletas laterales en la punta del cincel, lo cual reduce también la resistencia específica y favorece el ancho de trabajo y la eficiencia de campo (McKyes, 1985).

Para los arados de disco, Godwin *et al.* (1987) encontraron que la fuerza de tracción es mínima donde el ángulo de inclinación vertical está entre 0,380 y 0,524 radianes, siendo la resistencia específica mínima para un ángulo de 0,436 radianes, coincidiendo con Gill *et al.* (1982), quienes también encontraron que la penetración de los discos es mayor si se aumenta el peso de éstos, y que la velocidad de operación no afecta la profundidad de trabajo en suelos con altos contenido de arena, pero en suelos arcillosos ésta

disminuye a medida que se aumenta la velocidad de operación. Por otra parte, Mello y Magalhães (1995) en un trabajo realizado sobre un suelo arcilloso, encontraron que la velocidad de operación no afectó la fuerza de tracción, y que dicha fuerza crece al aumentar el ángulo horizontal y el área de suelo removido, sin incidir significativamente en la resistencia específica.

La humedad del suelo es un factor que incide directamente en la fuerza de tracción y requerimiento de potencia en la preparación del suelo. Suelos secos presentan agregados con alta cohesión, siendo más alta en suelos arcillosos, requiriendo mayor fuerza de tracción para ser disturbados. La cohesión disminuye a medida que el contenido de agua aumenta en el suelo (Mouazen y Ramón, 2002), aumentando entonces la adhesión de las partículas del suelo sobre la superficie de la herramienta y afectando la fuerza de tracción. Arvidsson *et al.* (2004) encontraron que el contenido de agua adecuado para las labores de labranza es cercano al límite plástico del suelo; también concluyeron que la profundidad de trabajo aumenta a mayor contenido de humedad del suelo, disminuyendo la resistencia específica. Por otra parte, la labor en un suelo seco favorece la formación de terrones grandes (De Toro y Arvidsson, 2003) y suelos con contenido de agua superior al límite plástico son fácilmente deformados y compactados.

## **2.9. Factores de diseño para herramientas de labranza**

Normalmente entre los factores que deberían ser considerados para diseñar y evaluar un sistema de implementos de labranza enganchados en la parte posterior de un tractor son (Kepner, 1978):

Habilidad para obtener penetración del implemento bajo condiciones adversas, particularmente con implementos tales como rastras de discos y arado de discos.

Efecto del implemento sobre la habilidad tractiva del tractor (transferencia de peso).

Uniformidad de la profundidad de laboreo, que el implemento pase sobre partes irregulares de la superficie del suelo.

Estandarización del enganche que permita el fácil acoplamiento.

Rapidez con la cual las herramientas entran a la tierra.

Kepner *et al.* (1978) menciona que el objetivo de una herramienta de labranza es manipular un suelo (cambiar, mover o formar) que requiere cambiar una condición de éste. Tres factores resumidos de diseño son necesarios:

Condición inicial del suelo

Forma de la herramienta y la manera del movimiento de la herramienta y

Controlar o definir la manipulación del suelo

Implemento	Especificación	FH (kN)	Energía o Trabajo kW h/Ha
Arado	3 Discos	12.649	22.1 – 46.1
Arado	4 Discos	16.865	22.1 – 46.1
Rastra	20 Discos	5.928	4.0 – 7.4
Multiarado	2 Cuerpos	73	3.1 – 5.2
Sembradora	2 Hileras	3.6	2.4 - 12

**Cuadro 2.2.** Determinación de fuerza de tiro de diferentes implementos integrales, (Hunt, 1983).

Los resultados de estos tres factores independientes de entrada son evidenciados por dos factores de salida, a saber, la condición final del suelo y las fuerzas requeridas para manipular el suelo.

### 2.9.1. Fuerzas que actúan sobre una herramienta de labranza

Un implemento de labranza o herramienta moviéndose a una velocidad constante está sujeto a tres fuerzas principales o sistemas de fuerzas que deben estar en equilibrio, Kepner *et al.*, (1978), las cuales son:

- Las fuerzas de gravedad actuando sobre el implemento.
- Las fuerzas del suelo actuando sobre el implemento.
- Las fuerzas actuando entre el implemento y el primer movimiento.

Clyde (1936) citado por Bonifaz (2012) subdivide el total de las fuerzas de reacción del suelo dentro de las fuerzas útiles y parásitas. El define que las fuerzas del suelo útiles son aquellas en las cuales la herramienta debe vencer el corte, quebramiento y movimiento del suelo. Las fuerzas parásitas son aquellas (incluyendo la fricción o resistencia al rodamiento) que actúan sobre superficies estables. Cuando una herramienta no es simétrica sobre el plano vertical, longitudinal o a través de una línea centro, las fuerzas del suelo útiles frecuentemente introducen un efecto rotacional.

Los requerimiento de potencia, de tiro y de energía de varias máquinas de campo (Hunt, 1983) se enlistan en el cuadro (2.2).

Para un implemento particular y condición de suelo las fuerzas del suelo se incrementarán con la profundidad de trabajo. La resultante del peso del implemento y las fuerzas del suelo, por lo tanto, tendrán magnitud variable, dirección y posición dependiendo de la profundidad de trabajo. Dentro de las investigaciones realizadas por Garner *et al.* (1988) y citado por Bonifaz (2012), con pruebas realizadas con un dinamómetro integrado al tractor tirando de un arado de cinceles, determinaron magnitudes de las fuerzas y momentos a 0.30 y 0.43 m. de profundidad mostradas en el cuadro (2.3).

Parámetros	Profundidad 0.30	Profundidad 0.43 m
<b>Fuerza de tiro kN</b>	14.300	27.675
<b>Fuerza vertical kN</b>	-3.175	-9.125
<b>Momento kN.m</b>	7.805	16.000
<b>Fuerza en el enganche superior kN</b>	15.125	23.370

**Cuadro 2.3.** Media de las fuerzas y momento en un subsolador, (Garner, 1988).

La norma ASAE D230 (1997) reporta la fuerza de tiro funcional para los diferentes implementos de labranza. En el cuadro (2.4) se muestran los valores extremos para la determinación de la fuerza de tiro en diferentes implementos:

Implemento	Rango de la fuerza de tiro	Variables
<b>Arado de vertederas</b>	$7+0.049s^2$ a $2+0.013s^2$ (N/cm <sup>2</sup> )	S = Velocidad (Km/h)
<b>Arado de discos</b>	$5.2+0.039s^2$ a $2.4+0.045s^2$ (N/cm <sup>2</sup> )	S = Velocidad (Km/h)
<b>Rastra de discos</b>	14.7M a 7.8M (N)	M = Masa (peso Kg)
<b>Subsuelo</b>	120 – 190d a 175 – 280d (N)	d = Profundidad
<b>Sembradora</b>	1100 a 800/fila N/fila	--

**Cuadro 2.4.** Rango de fuerzas de implementos, (ASAE D230, 1997).

Marín (2003) e Hinojosa (2003) en una serie de evaluaciones con diferentes implementos de labranza, midieron las fuerzas de tiro en la barra de compresión, producidas por la interacción suelo-implemento (Cuadro 2.5).

Implementos	Fuerza en la barra de compresión			Fuerza en el tiro		Radio entre Fc/FT
	Profundidad (m)	Fuerza media (kN)	Fuerza pico (kN)	Fuerza media (kN)	Fuerza pico (kN)	
Arado	0.30	23.21	33.71	15.48	30.66	1.50
Multiarado (1 timón)	0.34	30.83	34.07	22.06	32.05	1.40
Multiarado (2 timones)	0.21	38.52	43.64	23.77	3.05	1.62
Rastra		17.05	16.24	5.39	21.92	3.16
Cultivadora		4.84	9.16	4.76	20.72	1.02
Vibrocultivador		16.46	6.73	9.84	37.78	1.67

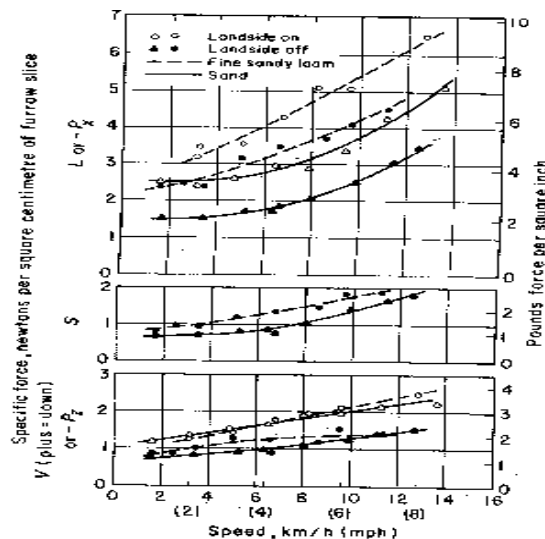


**Cuadro 2.5.** Análisis de datos para la fuerza requerida en cada implemento, (Fc: Fuerza en la barra de comprensión y FT: fuerza en el tiro. Marín, 2003).

### 2.9.2. Relación de la fuerza vertical y horizontal

En un arado de vertederas generalmente tiene una componente vertical actuando hacia debajo de la fuerza útil del suelo (succión). La magnitud de la fuerza específica (V) en relación a la velocidad de avance del tractor (L) varía extensamente, empezando por la influencia del tipo de suelo, condición del suelo, profundidad de corte, partes de la forma del corte o afilados y otros factores.

El valor de la fuerza vertical V se incrementa con la velocidad como se muestra en la figura (2.15), pero con una tendencia en algunos suelos para una reducción ligera de la relación V/L. La relación V/L de las pruebas realizadas en un ataque de suelos esquematizadas se obtiene rangos de relación de 0.5 a 0.6 para las arenas y de 0.35 a 0.45 para limos arenosos finos. Resultados reportados por pruebas de campo de varios tipos y condiciones de suelos, presumiblemente con partes en condiciones buenas dan rangos de relaciones V/L de 0.1 a 0.3.



**Figura 2.15.** El valor de la fuerza vertical  $V$  se incrementa con la velocidad, Randolph (1988).

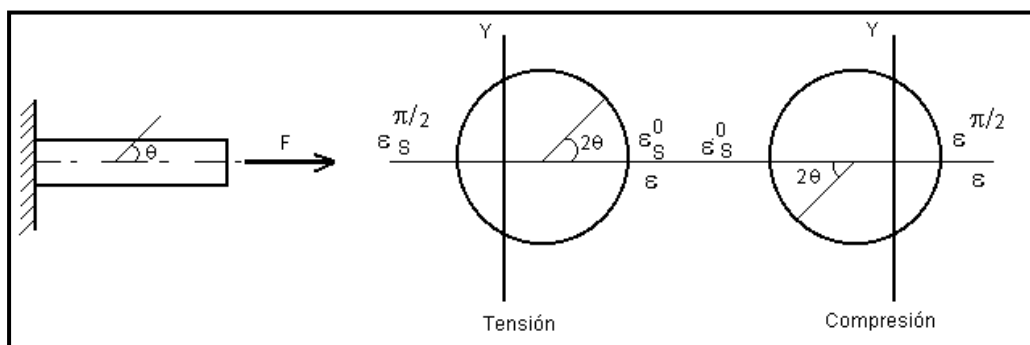
### 2.10. Análisis de fuerzas

Una medida de fuerza con alto grado de exactitud, es de gran importancia en el análisis mecánico en un problema de ingeniería. En particular, la resistencia medida del suelo para varios funcionamientos de maquinaria, tal como arado, que es indispensable en la maquinaria agrícola para nuestro campo (Sakurai, 1996).

Una medida general de la fuerza, en uno de los tres estados dimensionales, es aplicada que permite medir no solo una magnitud y una dirección de fuerza, sino también una posición en la línea de acción.

Cuando la línea de acción de la fuerza es conocida: en este caso, tres tipos de medición para la magnitud de la fuerza son considerados, los cuales primeramente son: Tensión o compresión.

El simple estado de tensión y compresión ocurre en el eje cuando la línea de acción coincide con el eje para la medición, se muestra en la figura (2.16).



**Figura 2.16.** Estado de deformación en tensión o compresión.

Las deformaciones máximas principales están dada por:

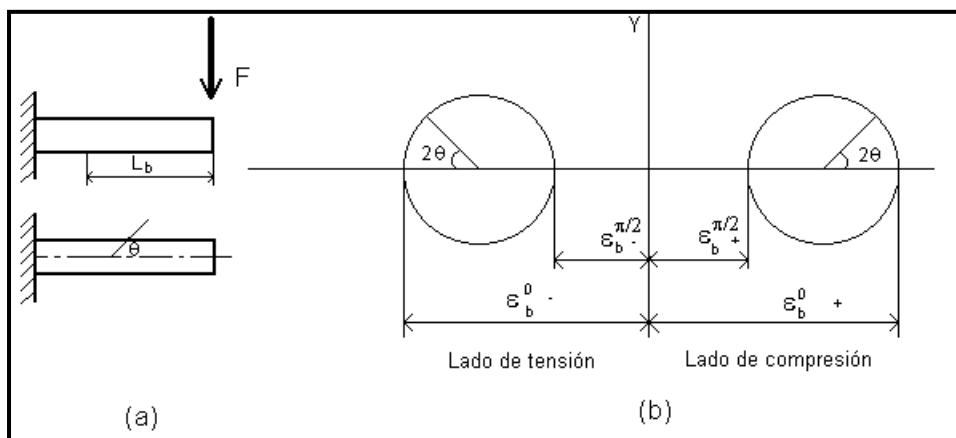
$$\varepsilon_S^0 = \frac{\sigma_S^0}{E} = \frac{F}{EA} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$\varepsilon_S^{\frac{n}{2}} = -\mu \varepsilon_S^0 \dots\dots\dots (2.14)$$

El exponente y el subíndice son agregados a los esfuerzos y deformaciones para indicar las direcciones de ellos y condiciones de fuerza actuando respectivamente.

### Flexión

Un estado de flexión ocurre en el eje cuando la línea de acción es perpendicular al eje y es interceptada en el centro como se muestra en figura (2.17).



**Figura. 2.17.** Estado de deformación-flexión.

El máximo y mínimo de deformaciones en posición aparte de la línea de acción con la distancia  $L_b$  son dados por:

$$\varepsilon_b^{0\pm} = \pm \frac{\sigma_0}{E} = \pm \frac{M}{EZ_b} = \pm \frac{FL_b}{EZ_b} \dots\dots\dots (2.15)$$

$$\varepsilon_b^{\frac{\pi}{2}\pm} = \mu\varepsilon_b^{0\pm} = \pm\mu \frac{M}{EZ_b} = \pm\mu \frac{FL_b}{EZ_b} \dots\dots\dots (2.16)$$

Por lo tanto,  $M = FL_b$  es un momento aplicado y  $Z_b$  es un módulo de la sección dado por:

$$Z_b = \frac{2I}{d} \dots\dots\dots (2.17)$$

**Torsión**

Un estado de torsión ocurre en el eje, cuando la línea de acción no intercepta al eje y el producto escalar de vectores va en dirección de la línea del eje cero, es lo ilustrado en la figura (2.12a).

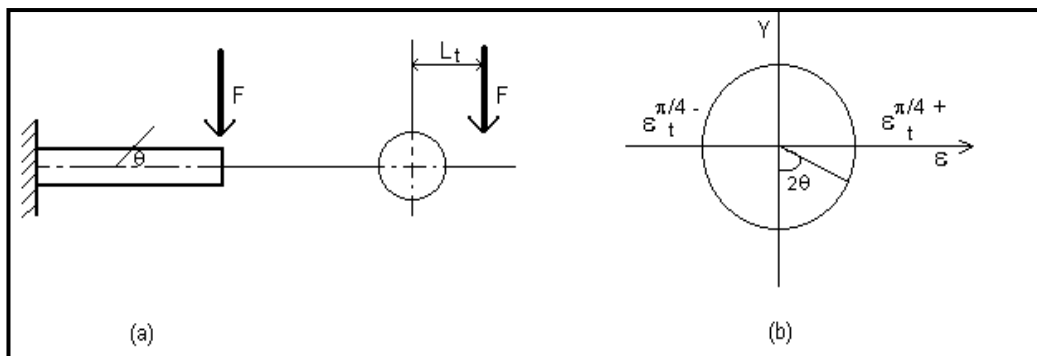
Las deformaciones principales máximas y mínimas están dadas por:

$$\varepsilon_t^{\frac{\pi}{4}}, \sigma_t^{\frac{\pi}{4}} = \frac{\tau_t}{G} = \frac{T_t}{GZ_p} = \frac{FL_t}{GZ_p} \dots\dots\dots (2.18)$$

$$\varepsilon_t^{\frac{\pi}{4}} = -\sigma_t^{\frac{\pi}{4}} = \frac{\tau_t}{G} = \frac{T_t}{GZ_p} = \frac{FL_t}{GZ_p} \dots\dots\dots (2.19)$$

Más allá referenciado a la figura (2.18b), una deformación para un ángulo  $\theta$  arbitrario se representa por:

$$\varepsilon_t = \frac{FL_t}{GZ_p} \sin 2\theta \dots\dots\dots (2.20)$$

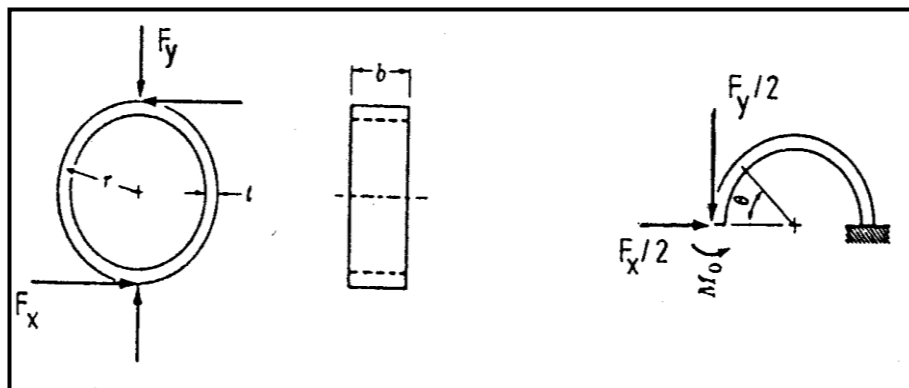


**Figura. 2.18.** Estado de deformación en torsión.

## 2.11. Análisis Teórico del Diseño del Anillo

Un análisis teórico de la aplicación del anillo extendido del transductor octagonal fue desarrollado por Cook (*et. al.* 1963) citado por Varela, (2000) esto es basado en el análisis de la energía elástica de un anillo usado como una celda de carga. En la figura (2.19) se muestra las fuerzas actuando en un elemento del anillo; donde el momento flexionante ( $M\theta$ ) a cualquier punto en el anillo es calculado y es dado por la ecuación (2.21).

$$M\theta = \frac{1}{2} F_x r (\sin \theta - \frac{2}{\pi}) - \frac{1}{2} F_y r \cos \theta \dots\dots\dots (2.21)$$



**Figura 2.19** fuerzas actuando en un elemento del anillo.

La colocación del nodo para cada fuerza individual involucrada en el elemento del anillo se encuentra cuando el momento producido por  $\frac{1}{2} F_x$  se vuelve cero y esto es verdadero cuando  $\sin \theta = \frac{2}{\pi}$ , ( $\theta = 39.6^\circ$ ). El momento debido a  $\frac{1}{2} F_y$  es cero cuando  $\cos \theta = 0$ , ( $\theta = 90^\circ$ ).

Como resultado de este análisis, las dos colocaciones de nodo de deformación son: ( $\theta = 39.6^\circ$ ) para la fuerza ( $F_x$ ) y ( $\theta = 90^\circ$ ) para la fuerza ( $F_y$ ). La deformación esperada ( $\epsilon$ ), producida por el momento en el anillo de carga se obtuvo y esta dado por las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_{39.6^\circ} = \frac{2.31Fyr}{Ebt^2} \dots\dots\dots (2.22)$$

$$\varepsilon_{90^\circ} = \frac{1.09Fxr}{Ebt^2} \dots\dots\dots (2.23)$$

Para propósitos prácticos, principalmente para evitar la rotación del anillo debido a la fuerza vertical (Fy), una versión extendida del anillo fue sugerida por Cook *et al.* (1963) citado por Varela (2000) fue encontrado que con esta modificación práctica, el anillo de carga, la colocación del nodo de deformación para la fuerza horizontal cambiaba a ( $\theta = 50^\circ$ ) pero permanecía a ( $\theta = 90^\circ$ ) cambiaba así para generar las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon_{50^\circ} = \frac{1.4Fyr}{Ebt^2} \dots\dots\dots (2.24)$$

$$\varepsilon_{90^\circ} = \frac{0.7Fxr}{Ebt^2} \dots\dots\dots (2.25)$$

Como resultado del análisis de esfuerzo-deformación de los anillos extendidos, (Cook *et al.* 1963) derivó la ecuación (2.26) que envuelve la relación sensibilidad del momento flexionante-rigidez. Esta ecuación es básica para el diseño de cualquier tamaño de Anillo Octagonal Extendido.

$$K = 6.626 - 19.63Ms + 21.142Ms^2 - 8.699Ms \dots\dots\dots (2.26)$$

Esta ecuación da la relación básica para el diseño del anillo extendido donde los términos ( $Ms = \varepsilon EBt^2/M$ ) y ( $K = L/r$ ) son la sensibilidad del momento sensitivo ( $Ms$ ) y la rigidez respectivamente ( $K$ ).

Una contribución importante al diseño de los Anillo Extendidos fue dado por Godwin (1975), el determinó que para emplear estos transductores en la evaluación de implementos de labranza era necesario insertar dos platos separadores, uno entre el montaje y el transductor y otro entre el transductor y

el implemento. Esto fue necesario para eliminar el cruzamiento de sensibilidades cuando las galgas extensiométricas fueron localizadas a:  $\theta = 50^\circ$  para  $F_y$  y  $\theta = 90^\circ$  para  $F_x$ , determinando su nueva localización y sensibilidades en forma experimental ( $\theta = 34^\circ$  para  $F_x$  y  $\theta = 90^\circ$  para  $F_x$ ).

Las sensibilidades experimentales determinadas por Godwin (1975) son dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\epsilon_{90^\circ} = \frac{1.5F_y r}{Ebt^2} \dots\dots\dots (2.27)$$

$$\epsilon_{34^\circ} = \frac{1.66F_x r}{Ebt^2} \dots\dots\dots (2.28)$$

Consideraciones adicionales para el diseño del anillo extendido fueron dadas por Hoag (1977) Citado por Campos (1993). Estos tienen el objetivo de mejorar la sensibilidad del anillo por medio de aumentar al máximo la relación  $[\epsilon/S \{x,y\}]$ . Esta relación representa la cantidad de deformación por unidad de desplazamiento relativo del anillo del fondo medio. La relación  $\{\epsilon/S\}$  puede ser expresada como una función de las dimensiones principales del anillo  $\{t, r \text{ y } b\}$  y están dadas por la ecuación (2.29).

$$\epsilon/S_x = 0.60 \ t/r^2 \dots\dots\dots (2.29)$$

Para obtener máxima ejecución del anillo en la tensión-proporción del desplazamiento, sugirió Hoag, (1977) citado por Varela (2000) que la relación  $(t / r^2)$  debe aumentarse al máximo. Para los requerimientos específicos esperados de cualquier fuerza máxima o momento, la deformación máxima en el anillo puede ser seleccionando el material del anillo apropiado junto con un máximo conveniente a la deformación aceptable, esto puede verse en la ecuación (2.30).

$$\left\{ \frac{t}{r^2} \right\} = \frac{M}{\sigma \max \ tr^2 b} \dots\dots\dots (2.30)$$

La ecuación anterior puede verse que para mejorar la relación de  $(\epsilon/S_x)$ , estos deben ser valores relativamente pequeños de  $\{t, r, b\}$ .

Godwin *et al.* (1993) Diseñaron un dinamómetro para medir las fuerzas y momentos que actúan sobre implementos de labranza. El diseño fue basado en dos anillos octagonales extendidos montados “espalda con espalda” o “espaldas no discretas” arreglados con sus ejes longitudinales en ángulos correctos, estos anillos se encontraban montados en un plato cada uno con la finalidad de ser colocado ante el tándem del implemento y así poder ser transportados, también se encontraban montados sobre un tubo con el propósito de medir las fuerzas que ocasiona un par o una fuerza lateral a un implemento. Mediante su investigación encontraron la posición óptima para el montaje de las galgas extensiométricas y fue de 22.5° considerando que es una modificación apropiada para la teoría de un anillo delgado. Las sensibilidades experimentales determinadas por Godwin son dadas por las ecuaciones siguientes:

$$\epsilon_{2.25^\circ} = \frac{2.66Fxr}{Ebt^2} \dots\dots\dots (2.31)$$

$$\epsilon_{90^\circ} = \frac{1.13Fyr}{Ebt^2} \dots\dots\dots (2.32)$$

Campos *et al.*, (1992) desarrollaron una metodología sencilla para el diseño de Anillos Octagonales teniendo en mente su aplicación en la evaluación de implementos de labranza bajo condiciones de campo. Demostró que existe un efecto de la longitud del plato sobre la localización de los nudos de deformación, cosa que cabe señalar que Godwin *et al.*, (1993) no menciona el efecto de la longitud de los platos (en función del largo total del anillo extendido) sobre la sensibilidad del transductor y su efecto sobre la localización de los nudos de deformación.

Esto se derivó en realizar una determinación experimental de las dimensiones apropiadas del plato, así como su efecto en la nueva localización de los nudos



de deformación para la fuerza horizontal ( $F_x$ ), corrigiendo así la localización del nudo de deformación producido por la componente horizontal localizándose a  $\theta = 391/4^\circ$  y se encontró que las sensibilidades para cada nudo de deformación fueron:

$$\varepsilon_{90^\circ} = \frac{2.12F_x r}{Ebt^2} \dots\dots\dots (2.33)$$

$$\varepsilon_{39.25^\circ} = \frac{2.24F_y r}{Ebt^2} \dots\dots\dots (2.34)$$

En el cuadro (2.6) se muestra una de las diferentes situaciones de nudo en deformación del anillo extendido en los transductores, como resultado de fuerzas horizontales y verticales aplicadas, y como sus respectivas sensibilidades derivadas por diferentes investigadores.

SITUACIÓN DE NUDO DE CONCENTRACION DE ESFUERZOS ( $\theta$ )			SUGERIDO POR DIFERENTES AUTORES	
Nudo			Sensitividad ( $\varepsilon$ )	
	$\theta F_y$	$\theta F_x$	$F_x$	$F_y$
Anillo de carga (Cook, 1963)	90°	39.6°	$\frac{1.09 F_x r}{Ebt^2}$	$\frac{2.31 F_y r}{Ebt^2}$
Anillo exterior (Cook, 1963)	90°	50°	$\frac{0.7 F_x r}{Ebt^2}$	$\frac{1.4 F_y r}{Ebt^2}$
Godwin (1975)		90°	$\frac{1.5 F_x r}{Ebt^2}$	$\frac{1.4 F_y r}{Ebt^2}$
(Anillos espaldas no discretas) (Godwin, 1993)	90°	22.5°	$\frac{2.66 F_x r}{Ebt^2}$	$\frac{1.13 F_y r}{Ebt^2}$
Campos (1992)	90°	39 ¼°	$\frac{2.12 F_x r}{Ebt^2}$	$\frac{2.24 F_y r}{Ebt^2}$

**Cuadro 2.6.** Localización de los nudos de concentración de esfuerzos derivados por diferentes investigadores (Cook, 1963; Godwin, 1975 y 1993; Campos, 1992).

## 2.12. Transductores de fuerza

La idea de emplear anillos octagonales extendidos (EOR siglas en inglés) en un sistema de medición fue introducido por primera vez por Lowen *et al.* (1951). Hoag and Yoerger (1975) derivaron ecuaciones analíticas de distribución de fuerzas para transductores simples y octagonales de anillos extendidos para diferentes cargas y condiciones límites utilizando el método de tensión de energía.

Se determinaron dos ecuaciones para el momento de flexión en la sección del anillo prolongado, mismas que se utilizan para el cálculo del momento en la sección utilizando el (EOR). McLaughlin (1996) detectó algunos errores en las ecuaciones de los Hoag y Yoerger y las corrigió.

Godwin (1975) diseñó un transductor octagonal de anillo extendido para medir las fuerzas de reacción del suelo utilizando herramientas en dos direcciones, así como el momento en el plano de estas fuerzas. El reportó una buena linealidad, bajas sensibilidad cruzada y la histéresis para el transductor. También encontró que las sensibilidades prácticas de las galgas extensiométricas fueron mucho mayores que los valores obtenidos a partir de ecuaciones analíticas.

O'Dogherty (1975) diseñó un transductor para determinar las fuerzas de corte y verticales usando una cuchilla en remolacha azucarera utilizando el anillo octogonal extendida. Informó de una buena linealidad, histéresis baja en ciclos de carga y descarga, y sensibilidades cruzadas entre 4,1 y 6,5 % para las fuerzas de corte y vertical, respectivamente en el proceso de calibración del transductor.

Godwin et al. (1987) diseñó tres transductores de (EOR) usando tres diferentes materiales con diferentes relaciones de radio y diferentes espesores del anillo ( $r / t$ ). Ellos encontraron que los sistemas desarrollados de instrumentación tenían suficiente resolución para medir el comportamiento dinámico vertical de suelo a acoplado a un enganche de pivote único.

Godwin et al. (1993) diseñó un dinamómetro utilizando dos (EOR) para medir las fuerzas y momentos ejercidos en herramientas de labranza. Utilizaron dos (EOR) en configuración espalda con espalda, donde los ejes longitudinales formaban ángulos de  $90^\circ$ . Ellos reportaron una excelente linealidad entre las fuerzas y momentos aplicados, y la salida de voltaje en el puente, una pequeña cantidad de efecto de histéresis entre carga y descarga de las curvas de calibración, así como, una sensibilidad cruzada menor del 4 %.

O'Dogherty (1996) derivó una fórmula para determinar el espesor del anillo del transductor (EOR) mientras utilizaba datos de los transductores diseñados previamente por los investigadores. El introdujo un procedimiento gráfico para el diseño (EOR) basado en parámetros geométricos del anillo.

McLaughlin *et al.* (1998) diseñó y fabricó un octagonal de doble anillo extendido (DEOR por sus siglas en inglés) acoplado a una barra de tiro. Ellos calibraron el transductor utilizando métodos de carga uniaxiales y triaxiales. Los autores derivaron la regresión de un modelo para predecir las fuerzas de tiro, verticales, y las cargas laterales, e informó de la sensibilidad cruzada del sensor de 1,9 y 7,0 % para el las fuerzas de tiro y verticales respectivamente.

Kheiralla *et al.* (2003) desarrollaron un dinamómetro de tres puntos de enganche automático utilizando un transductor (EOR). Ellos reportaron una sensibilidad primaria horizontal y vertical de 25,19 kN  $\mu$ strain<sup>-1</sup> y 25.60 kN  $\mu$ strain<sup>-1</sup> para el sensor (77.75 % y 89.77 % de las sensibilidades teóricas calculadas).

Korkut (2003) desarrolló un dinamómetro para medir las componentes de fuerza durante el corte de un metal en tres direcciones y se encontró que el dinamómetro puede utilizarse de manera fiable para la medición de fuerzas de corte.

Khan et al., (2007) diseñó un sistema de transductor biaxial (EOR) para medir las fuerzas tractor-implemento, mostraron que la sensibilidad cruzada del sensor fue menor a 1,5 % para la mayoría de los casos.

Se puede decir que la mayoría de los sistemas de medición se pueden dividir en tres partes (Campos *et al.*, 2000).

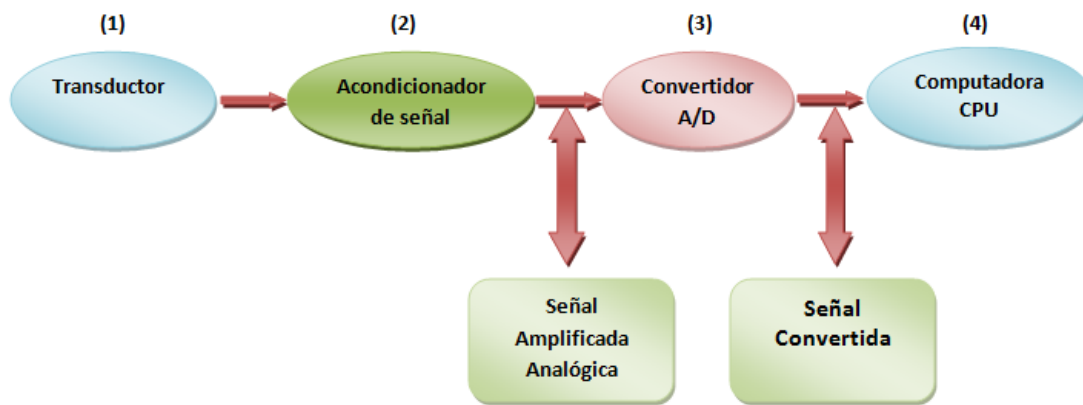
Etapa detectora-transductora, detecta la variable física y efectúa una transformación, ya sea mecánica o eléctrica para convertir la señal de una forma más manejable. Generalizando el concepto, un transductor es un dispositivo que transforma el efecto físico en otro, en gran mayoría de los casos, la variable física se transforma en una señal eléctrica, ya que ésta es la forma de señal más fácilmente medible.

Etapa Intermedia, modifica la señal que proviene del transductor, ya sea por amplificación, filtrado u otros medios para tener una salida deseable.

Etapa final o terminal, indica, graba o controla la variable que se desea medir.

Mojica (2000) describe que un transductor es un dispositivo que ha sido diseñado para reaccionar ante un estímulo físico y proporcionar una salida que puede ser un desplazamiento o por lo regular un voltaje, que posteriormente puede ser comparado o analizado dependiendo de los requerimientos del sistema donde se utiliza.

Moo (1999) señala que los transductores (sensores) son elementos de transformación de una variable física correspondiente a un fenómeno, a una señal eléctrica que describe ese comportamiento y su desempeño se debe a los elementos de captura, estos solo trabajan con señales eléctricas. Generalmente los transductores son empleados en la medición de magnitudes físicas, como por ejemplo, temperatura, presión, longitud, etc.



**Figura. 2.20.** Diagrama de adquisición y procesamiento de datos.

En la figura (2.20) se muestra un diagrama de bloques de un sistema típico de medición empleado en la correlación de datos.

### 2.12.1. Factores involucrados en la selección para el diseño de un transductor.

La necesidad de conocer con precisión la magnitud y dirección de las fuerzas de reacción del suelo, que actúan sobre un implemento en particular para su diseño óptimo, requiere el uso de transductores para medir dichos parámetros, los cuales se han diseñado para medir las fuerzas de tiro, fuerza vertical para herramientas de geometría simétrica ya que de acuerdo a la teoría de la falla de suelo son los componentes de interés. También existe una tercera fuerza de interés para elementos de geometría no simétrica como es la fuerza lateral.

Uno de los transductores más apropiados para determinar las fuerzas de reacción del suelo en los implementos de labranza es el transductor octagonal extendido, que tienen las ventajas sobre otros comúnmente empleados en la evaluación de equipos de labranza (Campos, 1993).

- Sensitividad alta y predecible sin desviaciones grandes.
- La sensitividad cruzada insignificante.
- No detecta fuerzas parásitas originadas por la fricción.
- Tamaño relativamente pequeño.

- Respuesta lineal.
- Precisa determinación de la magnitud de las fuerzas no importando la localización de las mismas.
- Detecta las fuerzas en un plano, además del momento resultante con un solo transductor.
- Detecta los cambios de dirección de las fuerzas.

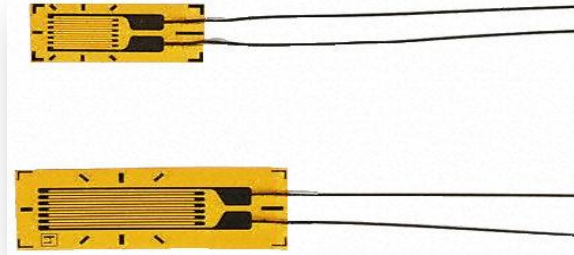
Cuando un elemento de maquinaria se somete a una fuerza, este sufre una deformación proporcional a la fuerza aplicada. La deformación puede ser causada por una carga axial, por una torsión o por un momento. Esta deformación puede ser medida para conocer la fuerza que está actuando sobre el elemento, esta fuerza es sensada mediante galgas extensiométricas. Las galgas extensiométricas pueden ser utilizadas para transformar esta deformación en valores de voltaje, estas son adheridas al material en el cual se desea conocer la fuerza aplicada, al deformarse el material, la galga aumentaría o disminuiría su longitud junto con el material, variando así su resistencia (Mojica, 2000).

Por lo tanto, para los transductores de fuerza, se necesitan elemento elástico que transmita la fuerza en deformación. El material para construir los transductores de fuerza debe tener las siguientes características: rigidez elevada, carga de ruptura elevada, límite elástico y módulo de elasticidad bajo. Y para la elección de las galgas de deformación se consideran los siguientes factores: longitud de carga, factor y salida de galga, temperatura característica, deslizamiento característico, endurecimiento y bajo costo (Moo, 1999).

### **2.12.2. Galgas extensiométricas**

Las galgas extensiométricas son un ejemplo de transductor pasivo que convierte un desplazamiento mecánico en un cambio de resistencia. Es un dispositivo delgado, con una oblea, que se puede unir (soldar) a una variedad de materiales con el fin de medir los esfuerzos aplicados. Las galgas extensiométricas metálicas se fabrican con alambres resistentes de diámetros muy pequeños o grabado en laminillas metálicas delgadas (Figura 2.21). La

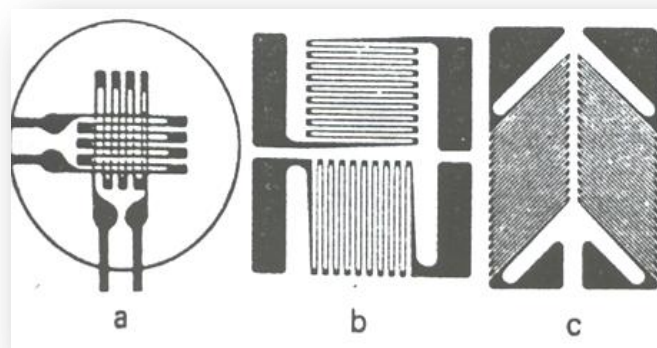
resistencia del alambre o de la lámina delgada cambia de longitud a medida que el material al cual esta soldada sufre tensiones o compresiones. Este cambio de resistencia es proporcional a la tensión aplicada y se mide con un puente de Wheatstone adaptado especialmente (Cooper, 1991; citado por Bonifaz, 2012).



**Figura. 2.21.** Galgas extensiométricas.

Se pueden lograr mediciones simultáneas de esfuerzos en más de una dirección colocando galgas de un solo elemento en la dirección correcta. Sin embargo, para simplificar esta tarea y tener mayor exactitud, se dispone de galgas múltiples elementos o rosetas.

Las siguientes rosetas pueden utilizarse en transductores de fuerza. Las galgas se conectan en un circuito puente de Wheatstone para proporcionar una máxima salida. La figura (2.22) muestra diferentes rosetas de dos elementos:



**Figura 2.22.** a) Láminas apiladas a 90°; b) Lámina plana a 90° y c) Láminas planas a 45°.

La sensibilidad de galgas a la deformación es moderada en términos de “factor de las galgas”. La fórmula para el factor de la galga se explica como sigue: la ley de Hook para los materiales como metales generalmente se expresa como:

$$\varepsilon = \frac{dL}{L} = \sigma/E \dots\dots\dots (2.34)$$

Según la ecuación (2.34) puede decirse que la tensión es obtenida por la determinación de deformación, en región elástica. Aunque hay varios métodos para determinar la deformación, se usan ampliamente las galgas para medir la deformación, porque la tecnología de usar métodos de la galga extensiométrica es la simplicidad de manejo y de alta precisión.

Cuando la deformación ocurre, la resistencia eléctrica de una galga cambia y esto se ilustra en la ecuación siguiente:

$$\frac{dR}{L} = K\varepsilon \dots\dots\dots (2.35)$$

Subsecuentemente, la relación entre resistencia  $R$  y la sección de material se expresan como sigue:

$$R = \rho * \frac{L}{A} \dots\dots\dots (2.36)$$

En éste punto, Vaugham (1975) citado por Ozuna (2011) menciona que una viga bajo una carga de tensión simple, ésta incrementa en su longitud y al mismo tiempo es correspondiente a un decremento en la sección transversal. Este es conocido como el efecto Poisson, de manera que la deformación es medida en cualquiera de los planos perpendiculares correspondientes a la carga aplicada, una deformación negativa con valores muy pequeños será detectada. La magnitud de esta deformación es pequeña dependiendo de la relación de Poisson ( $\mu$ ), y esta constante varia de material a material. Este

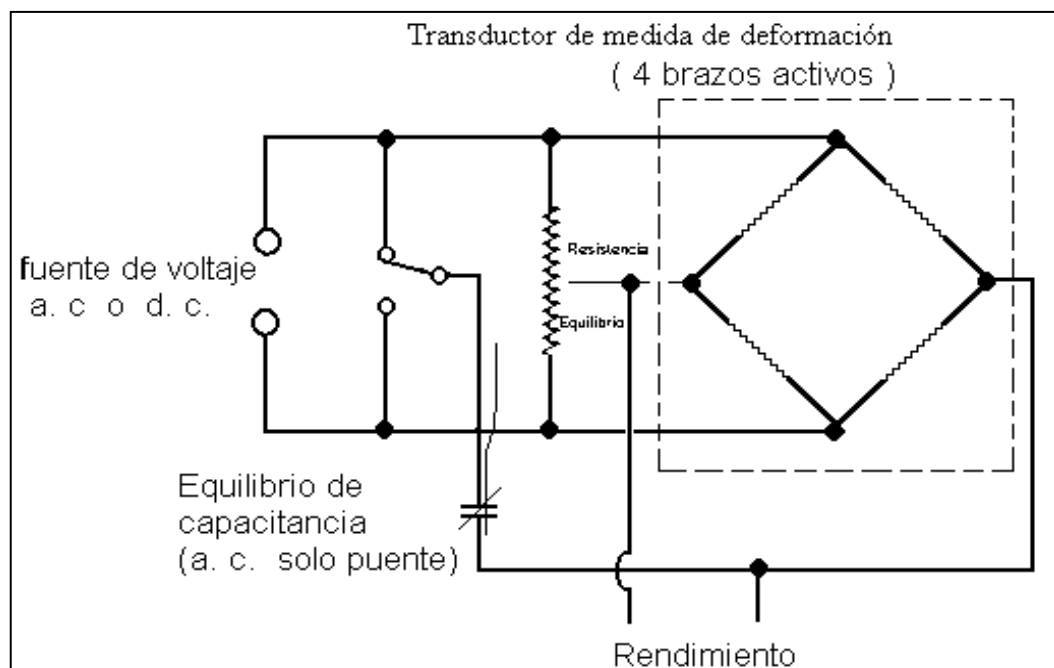


usualmente es sobre 0.3, así que la deformación medida perpendicular a la carga será aproximadamente 0.3 veces la deformación paralela a la carga.

### 2.12.3. Puente de Wheatstone

El dispositivo eléctrico que es normalmente usado para medir  $\epsilon K = dR/R$  y para convertir esta medición de cambio de resistencia en deformación, se utiliza el potenciómetro y el puente de Wheatstone como se muestra en la figura (2.23). El puente de Wheatstone puede determinar lecturas de galgas de tensión dinámica y estáticas.

El voltaje de la excitación puede ser CA o DC, aquí solo DC es considerada.



**Figura. 2.23** Puente de Wheatstone (Godwin, 1993).

De la figura anterior se puede desprender la ecuación (2.37).

$$V = \frac{(U)(FG)(n)(\epsilon)}{4} * Gain \dots\dots\dots (2.37)$$

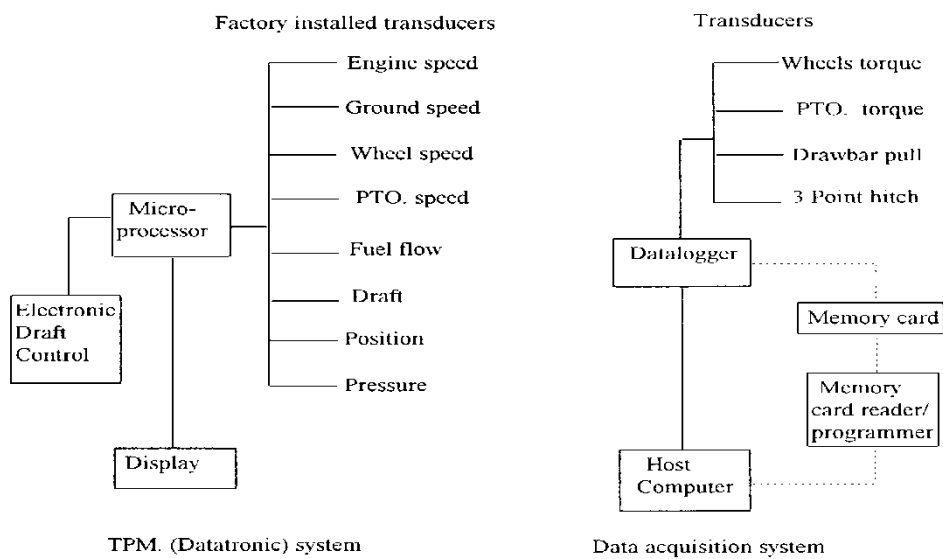
### 2.13. Sistema de adquisición de datos

Rogers y Johnston (1953) citado por Ozuna (2011) 68 indican la necesidad del procedimiento de datos de las fuerzas que actúan sobre los implementos. Usaron un cilindro de simple efecto para los brazos de enganche de tres puntos del tractor. Las líneas de presión de estos cilindros fueron ruta para las galgas montadas sobre un equipo. Durante la operación de este sistema el equipo fue fotografiado con una cámara de video de 16 cuadros. Aparentemente el procesamiento de datos para las fuerzas fue obtenido de un análisis de foto por foto de la filmación. Ellos fueron capaces de grabar las fuerzas en intervalos de distancias de 0.05 m. en el campo. Neuholff (1959) describe la técnica de cómo se puede usar un analizador de deformación y registrarla para medir la suma de dos fuerzas simultáneamente.

Campos *et al.*, (2000), describen la necesidad de un sistema de alta velocidad de muestreo para la reproducción de las fuerzas de reacción del suelo que incluye transductores de magnitudes de fuerzas y su localización; en cuanto al hardware en varias investigaciones se puede identificar en todas y cada una de ellas, un sistema de acondicionamiento de señales provenientes de los sensores de fuerzas, un sistema convertidor analógico a digital y software para su funcionamiento (Moo, 1999). El anterior sistema permite reproducir en términos de energía lo que está sucediendo en interacción suelo herramienta. Moo (1999) desarrolló un sistema de adquisición de datos de laboratorio y campo que permite evaluar el desempeño de los implementos de labranza, además muestra el diseño de medidores de velocidad y desplazamiento. Campos (1993) menciona que dentro de la adquisición de datos de laboratorio comprende de un tanque de suelos el cual el sistema y los transductores se adaptan a éste. Y para el análisis de información proveniente de los procesos de muestreo (conversión analógica a digital) utilizando la metodología del algoritmo de la transformada rápida de Fourier para la obtención de potencia espectral.

Kheiralla and Azmi, (2002) desarrollaron un sistema completo de adquisición de datos de instrumentación y fue desarrollado e instalado en un tractor Massey

Ferguson 3060, tractor agrícola para poder mapear la energía y la demanda energética en la operación en campos de agrícolas en Malasia. El sistema de instrumentación es capaz de medir y visualizar información sobre la velocidad del motor, la velocidad de toma de fuerza, velocidad de avance, deslizamiento de las ruedas de accionamiento, acres trabajado, el consumo de combustible por hora, el consumo de combustible por hectárea, acres por hora, factor de costo, combustible consumido, el combustible restante, y la distancia. Los ensayos de campo muestran que el sistema es capaz de funcionar con éxito sin dar mucho problema. Todos los sensores son capaces de escanear y grabar el registro de datos en los entornos hostiles de campo. En la figura (2.24) se muestra el diagrama de bloques en donde se ven los componentes del sistema de adquisición de datos.



**Figura. 2.24.** Diagrama de bloques del sistema de instrumentación completo del tractor (Kheiralla and Azmi, 2002).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

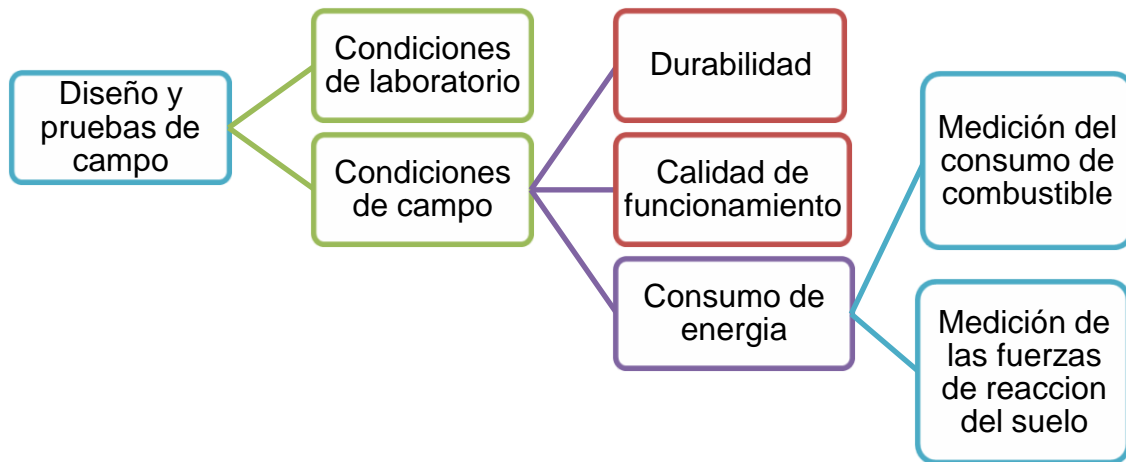
#### ➤ **Localización del lugar donde se realizó la evaluación.**

La investigación, diseño y calibración del octagonal se realizó en el taller de maquinaria Agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, figura (3.1), la cual se encuentra ubicada en la ex Hacienda de Buenavista, localizada a 7 Km al sur de la ciudad de Saltillo, en las coordenadas  $100^{\circ} 59' 57''$  longitud oeste y  $25^{\circ} 23' 42''$  latitud norte, a una altitud de 1743 msnm.

#### **3.1. Construcción y calibración del transductor octagonal extendido.**

La evaluación y diseño de implementos agrícolas integrados al tractor comienza con el análisis de las fuerzas de reacción del suelo sobre los implementos.

El proceso del análisis se muestra a continuación, (Hinojosa 2003), citado por Pacheco *et al.*, (2012).



Para la determinación de las magnitudes de las fuerzas de reacción del suelo en los arreglos de cinceles frontales y traseros se construyeron dos transductores octagonales de anillo extendido; el primero deberá determinar las fuerzas en la dirección FX y Momento y el segundo podrá determinar las fuerzas en dirección FX, FY y Momento respectivamente. La determinación de parámetros y la construcción de los transductores octagonales se realizó de acuerdo a Cook and Robinowicz (1963).

Los elementos que integran la propuesta son:

- Dos transductores octagonales con capacidad de 40 *KN* de fuerza.
- Uno con medición de variables en dos direcciones y otro en dos direcciones y un momento.
- Un cajón modificado para el acoplamiento del octagonal directamente al cincel.

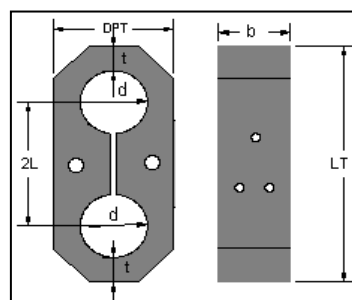
### 3.1.1. Determinación de selección y requerimiento de materiales para el acoplamiento de sensores.

El material utilizado para la elaboración de los transductores de fuerza (octagonales) fue un acero 1018, con un último esfuerzo de 420 MPa, el cual es caracterizado como un acero de bajo-medio carbono, tiene buena soldabilidad, ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con menores grados de carbono, mismo que se presenta en condición de *calibrado* (acabado en frío). Los transductores de fuerza utilizados son adecuados para componentes de maquinaria debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica (<http://www.sumiteccr.com>).

Para obtener las dimensiones de los sensores octagonales se utilizó:

Una computadora de escritorio (Dell con un procesador Genuine Intel, memoria RAM de 512 MB, capacidad en Disco Duro de 34.1 GB).

Software, Turbo Basic, que tiene por nombre "*Diseño de Transductores*", que incluye dimensiones de anillo: radio, ancho y espesor; esfuerzo de cedencia del material ( $N/m^2$ ), módulo de elasticidad, factores de seguridad y factor de galga, sensibilidad y voltaje de salida esperado; en el cual se involucra todos los factores de diseño y se realiza variando el espesor ( $t$ ) y el radio ( $r$ ), de manera que se obtengan las dimensiones específicas de aceros comerciales, ancho ( $b$ ) y profundidad del anillo (DPT) como se ilustra en la figura (3.2).



**Figura 3.2.** Dimensiones del sensor octagonal.

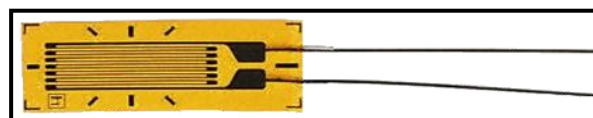
### 3.2. Fabricación de los sensores transductores (octagonales)

El maquinado de los sensores, se elaboraron en la empresa BISON, TECNOMECA AGRICOLA S.A. de C.V., ubicada en el municipio Jesús María, Aguascalientes, México.

### 3.3. Acondicionamiento del cuerpo del octagonal extendido y galgas extensiométricas.

A los dos octagonales se les colocaron galgas extensiométrica de acuerdo a los puentes de Wheatstone que le corresponda, procediendo al cableado de cada una de ellas; el tipo de galgas extensiométricas utilizadas para determinar las fuerzas en ( $F_X$ ), ( $F_Y$ ) y para la determinación del momento ( $M$ ) fueron del tipo KFG-5-350-C1-11 con un factor de galga de 2.11, conectadas en un circuito de puente de Wheatstone. Las galgas usadas se muestran en las Figura (3.4). Sakurai (1996), indica que la sensibilidad de una galga extensiométrica es medida en términos de “factor galga”, utilizando la fórmula de la ley de Hook para materiales en general:

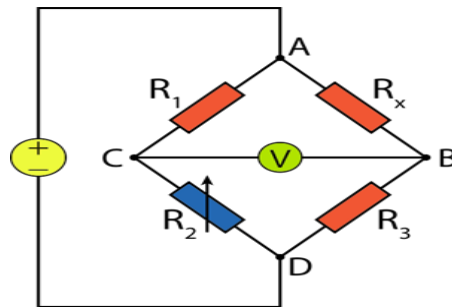
$$\varepsilon = \frac{dL}{L} = \frac{\sigma}{E} \dots\dots\dots (3.1)$$



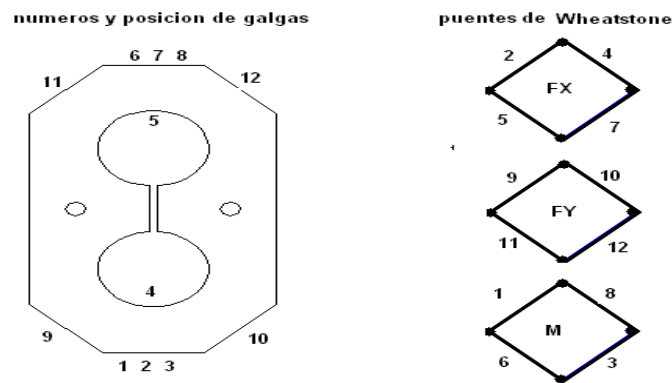
**Figura 3.3.** Modelo de galga extensiométrica.

La localización de las galgas extensiométricas en cada uno de los octagonales extendidos se muestra en la figura (3.5), donde se puede apreciar una serie de números, donde cada numero indica una galga, por ejemplo, las galgas 2, 4, 5 y 7 caracterizan un puente de Wheatstone y miden las  $F_X$  aplicadas al sensor y así sucesivamente con las demás galgas. Esta misma metodología para el acomodo de galgas fue utilizado por Afzalnia and Roberge (2009), en la

construcción y calibración de un transductor octagonal extendido para la medición de fuerzas en diferentes direcciones.



**Figura 3.4.** Puente de Wheatstone utilizado en los circuitos de cableado para las galgas extensiométricas.



**Figura 3.5** Localización de galgas en el octagonal y construcción de puentes de Wheatstone.

### 3.4. Calibración de los octagonales extendidos (Amarillo-Rojo y Verde-Azul)

Para la adquisición de datos tanto en laboratorio como en campo se empleó el equipo y la metodología descrita por Pacheco (2012) y está integrada por los siguientes elementos:

Un amplificador-acondicionador (DBK-43A) que consta con un módulo de 8 canales, con ganancias de 10x a 1250x ( $\epsilon$ ) fabricado por *lotech, Inc.* Usado para amplificar la señal del transductor y proporcionar una salida estandarizada de voltaje para así poder enviarla a un convertidor analógico-digital y este



además provee el voltaje de excitación al transductor (puente de Weatstone) en un rango de 1-10 V y 100 mA.

Un convertidor analógico-digital (DakBook 2000). Este módulo se conecta al puerto paralelo de la computadora (DELL) y convierte los valores de voltaje en valores digitales para que en paralelo con la PC puedan ser procesados. Dicho sistema se compone de dos partes: la primera parte procesa la información y la segunda consta de un banco de baterías que sirve de alimentación a la parte de procesamiento de datos. El módulo está integrado por seis submódulos más de voltaje diferencial, con una ganancia de 0.01-10V y con una velocidad de muestreo de 25-625E muestras por segundo. Consta además de 16 canales analógicos y ocho canales digitales con rangos de ganancia en micro deformaciones de 100 a 10 K. Este sistema permite almacenar en forma instantánea los datos en el disco duro del ordenador y permite ver la respuesta de los canales en pantalla durante el proceso.

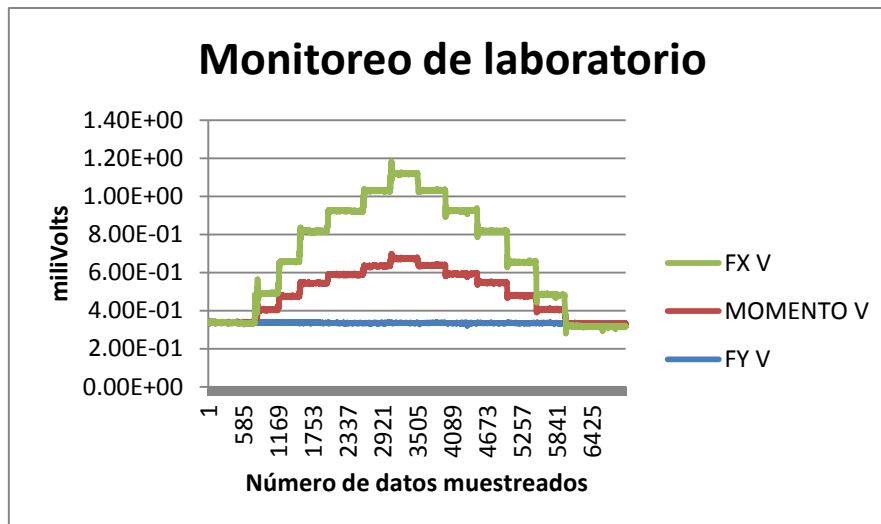
### 3.5. Evaluaciones bajo condiciones de laboratorio.

Para poder empezar a aplicar carga a los sensores sujetos en el tripie se requiere acondicionar el software **DaqView**, el cual consta de tres fases:

La primera consiste en el destino de la información, como nombre de archivo y carpeta a la cual se desea enviarla. El nombre de archivo y carpeta destino son nombrados según se necesite.

La segunda fase solicita la frecuencia de adquisición de datos. Para trabajos en laboratorio se insertan 20 muestreos por segundo con una corrida total de 7000 datos, dependiendo del número de pesos acumulados, el cual da el tiempo por cada prueba. Los primeros 500 datos no se aplica peso, el primer peso se aplica a partir de esos 500 datos, a los siguientes 500 se aplica el siguiente peso y así sucesivamente hasta llegar a los 235 kg en subida, repitiendo el mismo procedimiento al momento de ir bajando los mismo pesos. Al término del registro se guarda automáticamente un archivo txt.

La tercera fase permite ver en la pantalla de la computadora, con la ayuda de Excel, la respuesta en una gráfica (Figura 3.6) en mV de los sensores conectados a sus respectivos canales.



**Fig. 3.6.** Frecuencia de monitoreo y comportamiento de sensores con respecto a los pesos aplicados.

#### ❖ **Calibración de la fuerza en la dirección FX**

El proceso de calibración empleado se realizó utilizando un tripie y una canastilla con seis diferentes pesos (45, 45, 45, 35, 35, 30 kg.) a la carga y descarga en forma horizontal con respecto al octagonal, para obtener los registros de datos y la regresión lineal o dependencia entre los pesos y los miliVolts, y obtener la constante de calibración para cada uno de los octagonales en la dirección FX.

#### ❖ **Calibración de la fuerza en la dirección FY**

El proceso de calibración empleado se realizó utilizando la misma canastilla y los mismos pesos que para la calibración de la FX, pero utilizando el bastidor del prototipo articulado en forma vertical con respecto al octagonal. Para obtener los registros de datos y la regresión lineal o dependencia entre los pesos y los miliVolts, y obtener la constante de calibración para cada uno de los octagonales en la dirección FY. Es importante mencionar que para el

octagonal (Verde-Azul) únicamente cuenta con los registros de las fuerzas en la dirección FX y Momento.

#### ❖ **Calibración del Momento.**

El proceso de calibración se realizó utilizando la misma canastilla y los mismos pesos usados para FX y FY, para esta calibración se empleó el bastidor del prototipo articulado en una fosa mecánica en posición horizontal con respecto al octagonal, en este caso se usó un cincel recto en dos distancias (65 y 45 cm), estas distancias fueron tomadas, del centro del octagonal al la punta del cincel donde fue colocada la canastilla, con lo que se obtuvieron los registros de datos y la regresión lineal o dependencia entre los pesos y los miliVolts, y posteriormente obtener la constante de calibración del Momento para cada uno de los octagonales .

### **3.6. Procesamiento y análisis de la información**

#### **3.6.1. Análisis de información para determinar las constantes de calibración de lo octagonales.**

Los datos obtenidos del Daq book 2000 se descargan directamente en el archivo nombrado con anticipación y en la carpeta destino. Se ejecutan con Excel, se grafican los datos, como se muestra en la figura (3.6) y (3.7).

Para datos de calibración se toma una lectura promedio por cada escalón de la gráfica, cada lectura por escalón en  $mV$  corresponde a la suma de pesos aplicados cada 500 lecturas programadas. Los  $mV$  son proporcionales al peso. El peso multiplicado por la fuerza de gravedad obtenemos Newtons. Se procede a llevar los datos al programa de Minitab y se realiza una regresión lineal entre  $mV$  obtenidos contra Newtons aplicados por escalón en ascenso y descenso y así obtenemos una ecuación lineal con una constante de calibración por cada sensor. La constante permite transformar directamente a

unidades de fuerza ( $N$ ), los datos obtenidos en laboratorio o en campo en  $mV$  (Bonifaz, 2012).

### **3.6.2. Análisis de información de datos obtenidos en campo**

Para datos de campo se abren los archivos en Excel (2007) y se grafican. Estos valores son absolutos en  $mV$ . Los valores iniciales de la gráfica se llevan a valor cero, esto se hace, restando el primer valor de la columna a todos los valores de la misma columna y así tener una mayor percepción del comportamiento del transductor octagonal en su estado dinámico. Posteriormente se multiplican todos estos valores llevados a cero por la constante de calibración correspondiente.

Se empleó el programa por Mojica (2007) ver en anexo número 6.5 en el ambiente MATLAB R2011b, que permite procesar toda la información a través de un análisis espectral en donde se puede conocer las fuerzas que se presentan durante la operación del implemento. Para poder procesar la información en este ambiente de MATLAB R2011b se guardan todos los archivos generados en cada una de las pruebas (cinco archivos por prueba) con la extensión .DAT, entre comillas y delimitado por tabulaciones, por ejemplo: "1CTACH.dat" y de esta manera poder "llamar" el archivo en nuestro programa y procesarlo.

Mojica (2007) menciona que la información que se obtiene del sistema de adquisición de datos es de tipo dinámico porque varía en el espacio tiempo y aleatorio porque no tiene un comportamiento definido originado por la heterogeneidad del suelo, ya que depende de las fuerzas en la interacción del suelo-implemento que son registrados durante la operación de la herramienta.

Para determinar la fuerza máxima que requiere cada herramienta o arreglo y dimensionar los dos transductores de fuerza, es necesario conocer las magnitudes de las fuerzas de reacción del suelo y su frecuencia correspondiente, para lo cual, como se mencionó, se realiza un análisis

espectral de datos obtenidos. Un valor espectral es típicamente presentado por una gráfica de la magnitud o valor relativo de un parámetro contra la frecuencia. Para conocer esta información se selecciona el algoritmo de la transformada rápida de Fourier incluido en el programa de MATLAB R2011b (2004) antes mencionado, este algoritmo calcula el valor espectral de frecuencia de los datos obtenidos, y a partir de aquí se pueden localizar la mayor magnitud ocurrida y su correspondiente frecuencia (Mojica, 2000).

Al término de las evaluaciones de calibración de las fuerzas en dirección FX, FY y Momento bajo condiciones de laboratorio, se realizó un análisis estadístico de los datos utilizando un diseño de seis tratamientos de acuerdo al cuadro (3.4) con una distribución de bloques al azar con cinco repeticiones para cada variable detectada por el octagonal, FX, FY y Momento.

Arreglo	Descripción del arreglo
2F201T20SA	1 cincel trasero a 0.20m de profundidad sin alas
2F201T20AM	1 cincel trasero a 0.20m de profundidad con alas medianas
2F201T20AG	1 cincel trasero a 0.20 m de profundidad con alas grandes
2F201T30SA	1 cincel trasero a 0.30m de profundidad sin alas
2F201T30AM	1 cincel trasero a 0.30m de profundidad con alas medianas
2F201T30AG	1 cincel trasero a 0.30m d profundidad con alas grandes

**Cuadro 3.2.** Arreglos espaciales de cinces con octagonal extendido.

### 3.7. Variables a medir

- **Fuerza FX (N)**
- **Fuerza FY (N)**
- **Momento(N\*m)**

- **Profundidad de laboreo (cm)**
- **Porcentaje de patinaje**
- **Tiempo de recorrido (min)**

Para las evaluaciones realizadas bajo condiciones de campo de las fuerzas de reacción del suelo en las direcciones FX, FY y Momento se utilizó únicamente el transductor octagonal de anillo extendido Amarillo-Rojo

Los trabajos de evaluación bajo condiciones de campo se realizaron en el Rancho Navidad, propiedad de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicado en el municipio de Galeana, Nuevo León, México, con coordenadas 25°01'50.88"N y 100°37'35.65"O, con una altura de 1884 MSNM, utilizando aproximadamente cinco hectáreas para la realización de las pruebas. Es un suelo de textura franco arenoso y contenidos medios de 47.5 % arena, 45 % limo y 6.8 % de arcilla.

### 3.8. Guía rápida para la evaluación de herramientas de labranza vertical



## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Construcción y calibración de dos octagonales de anillo extendido.

Se construyeron y calibraron dos octagonales de anillo extendido con capacidad de 40 kN cada uno, para medir las fuerzas de reacción del suelo en los ejes X-Y, así como el par respectivo. Los detalles de calibración y sus constantes se encuentran descritos a continuación.

#### 4.1.1. Pruebas de laboratorio para la calibración de octagonal extendido Amarillo-Rojo en el eje horizontal FX.

En la figura 4.1. Se muestra el proceso de calibración empleando los seis pesos respectivos con capacidad de 2305 N y en la figura 4.2, se muestra el registro de estos pesos empleando el sistema de adquisición de datos Daq-book 2000.

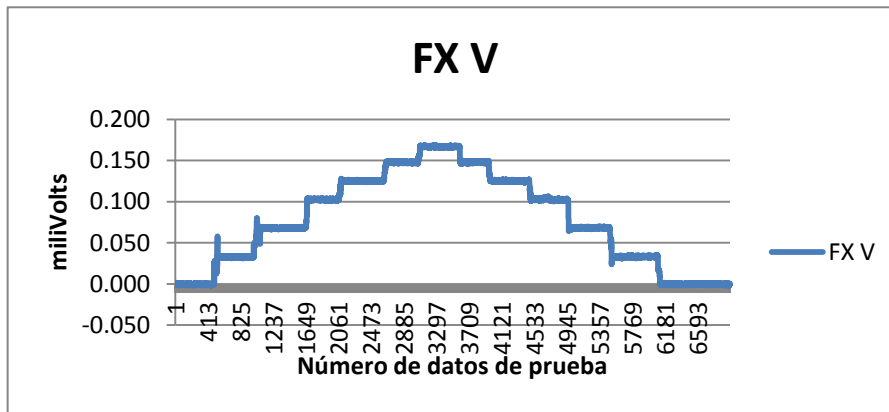


**Figura 4.1.** Calibración del sensor octagonal extendido Rojo-Amarillo.



**Figura 4.2.** Registro de los pesos del octagonal extendido Rojo-Amarillo.

**Figura 4.3.** Calibración de la fuerza horizontal (FX) utilizando seis diferentes pesos (45, 45, 45, 35,35 y 25 kilogramos) realizada bajo condiciones de laboratorio, empleando Daq-book-2000, a una frecuencia de 20 Hz y 7000 datos de prueba.



**Figura 4.3** Gráfica escalonada de calibración de la fuerza horizontal FX utilizando seis pesos diferentes.

En el cuadro (4.1), se muestran las medias de los seis pesos en Newtons y su respectiva deformación en mili Volts en cinco repeticiones, para la obtención de la constante de calibración en el eje horizontal FX.

Pesos (N)	R1 (mV)	R2 (mV)	R3 (mV)	R4 (mV)	R5 (mV)
0.00	0	0	0	0	0
441.45	32	33	34	33	33
882.90	68	68	68	68	69
1324.35	105	103	102	102	103
1667.70	125	125	124	126	125
2011.05	148	148	149	148	148
2305.35	167	168	162	167	167
2011.05	149	149	148	151	148
1667.70	126	126	126	125	126
1324.35	103	103	104	102	103
882.90	68	69	68	68	70
441.45	33	33	35	33	33
0.00	0	0	0	0	0

**Cuadro 4.1.** Medias de los seis pesos y su deformación en mili Volts.

En el cuadro (4.2), se muestra el análisis de varianza de la regresión lineal para la variable (FX), empleando el paquete estadístico Minitab V15.



### Análisis de regresión: N vs. Mv

La ecuación de regresión es  
 $N = - 22.21 + 13.58 Mv$   
 $S = 35.4368$  R-cuad. = 99.8 % R-cuad.(ajustado) = 99.8 %

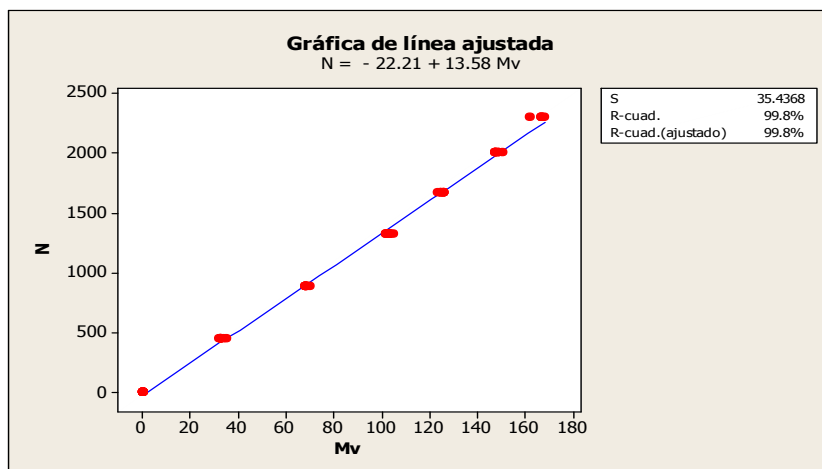
#### Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	MC	Fc	F <sub>01</sub>	F <sub>05</sub>
Regresión	1	35909569	35909569	28595.77	2.66	2.00
Error	63	79113	1256			
Total	64	35988682				

**Cuadro 4.2.** Análisis de varianza de la regresión lineal para la variable FX.

En el análisis de varianza se observa que el valor de F (<sub>01,05</sub>) de la tabla es menor a la Fc, por lo tanto existe diferencia estadística significativa en la regresión, debida a la diferencia entre los pesos y a la frecuencia acumulada de los mismos en la dirección FX.

En la figura 4.4. Se muestra la línea de calibración obtenida, empleando el programa Minitab. La ecuación de calibración obtenida para el octagonal Rojo-Amarillo fue de  $13.58N mV^{-1}$  con un coeficiente de correlación de 99.8 %.



**Figura 4.4.** Constante de calibración para la (FX) del octagonal extendido Amarillo-Rojo.

#### 4.1.2. Pruebas de laboratorio para la calibración de octagonal extendido en el eje vertical FY.

En la figura 4.5. Se muestra el proceso de calibración empleando los seis pesos respectivos con capacidad de 2305 N y en la figura 4.6, se muestra el registro de datos.

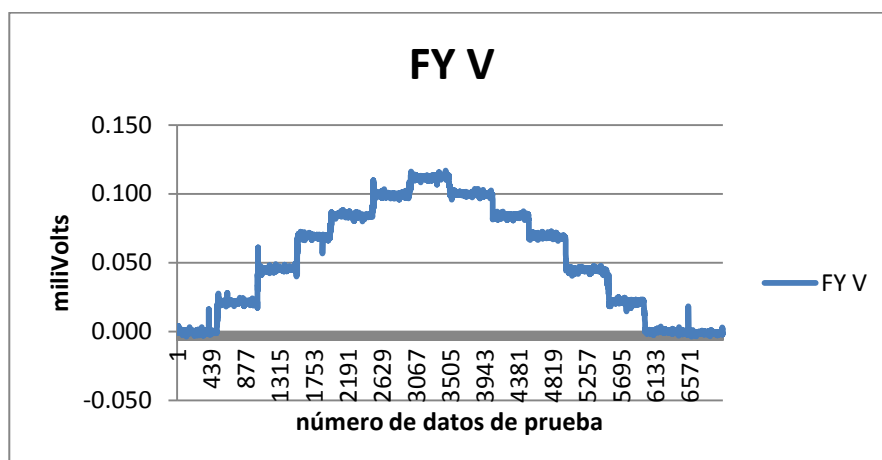


Figura 4.5. Calibración del sensor vertical (FY) aplicada al octagonal extendido.



Figura 4.6. Registro de datos.

Figura 4.7 Calibración de la fuerza vertical (FY), utilizando seis diferentes pesos (45, 45, 45, 35,35 y 25 kilogramos) realizada bajo condiciones de laboratorio, empleando Daq-book-2000, a una frecuencia de 20 Hertz y 7000 datos de prueba.



**Figura 4.7.** Gráfica escalonada de calibración de la fuerza vertical (FY).

En el cuadro (4.3), se muestran las medias de los seis pesos en Newton y su respectiva deformación en mili Volts en cinco repeticiones para la obtención de la constante de calibración en el eje vertical FY.

Pesos N	R1 mV	R2 mV	R3 mV	R4 mV	R5 mV
0.00	0	0	0	0	0
441.45	20	22	22	22	22
882.90	41	46	46	46	46
1324.3	64	68	70	68	69
1667.7	79	82	85	84	86
2011.0	94	95	99	98	99
2305.3	11	105	112	111	113
2011.0	97	94	100	98	98
1667.7	82	76	86	83	85
1324.3	66	60	74	69	69
882.90	43	38	50	48	47
441.45	33	13	27	22	23
0.00	0	0	0	0	0

**Cuadro 4.3.** Medias de los pesos (N) y su deformación en mili Volts.

**Cuadro (4.4),** Análisis de varianza de la línea de regresión lineal para la variable (FY), empleando el paquete estadístico Minitab V15.

**Análisis de regresión: N vs. mV**

---

La ecuación de regresión es

$N = - 29.41 + 20.33 Mv$

$S = 45.0368$  R-cuad. = 99.6 % R-cuad.(ajustado) = 99.6 %

---

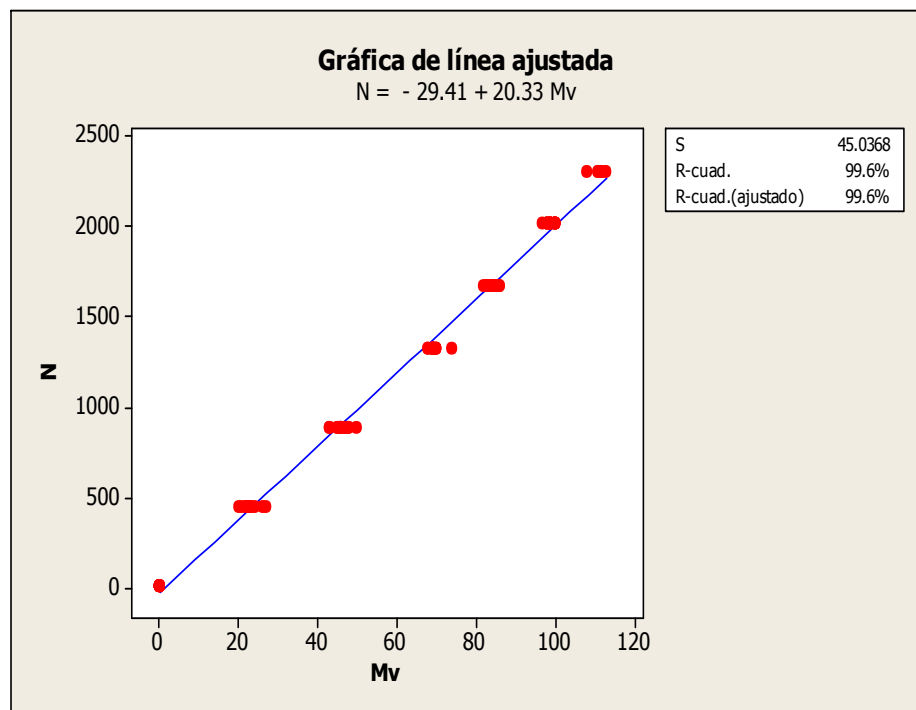
Análisis de varianza						
Fuente	GL	SC	MC	Fc	F <sub>01</sub>	F <sub>05</sub>
Regresión	1	57375003	57375003	28287.01	2.62	1.98
Error	102	206888	2028			
Total	103	57581891				

---

**Cuadro 4.4.** Análisis de varianza de la regresión lineal para la variable FY.

En el análisis de varianza se observa que el valor de  $F_{(01,05)}$  de la tabla es menor a la  $F_c$ , por lo tanto existe diferencia estadística significativa en la regresión, debida a la diferencia entre los pesos y a la frecuencia acumulada de los mismos en la dirección FY.

En la figura 4.8. Se muestra la línea de calibración obtenida, empleando el programa Minitab. La ecuación de calibración obtenida para el octagonal Rojo-Amarillo fue de  $20.33 \text{ N mV}^{-1}$  con un coeficiente de correlación de 99.6 %.



**Figura 4.8.** Línea ajustada, ecuación de respuesta y constante de calibración para la (FY) del octagonal extendido.

### 4.1.3. Pruebas de laboratorio para la calibración de octagonal extendido en momento.

En la figuras 4.9. Se muestra el proceso de calibración empleando los seis pesos respectivos con capacidad de 2305 N y en la figura 4.10 se muestra el registro de datos y calibración.

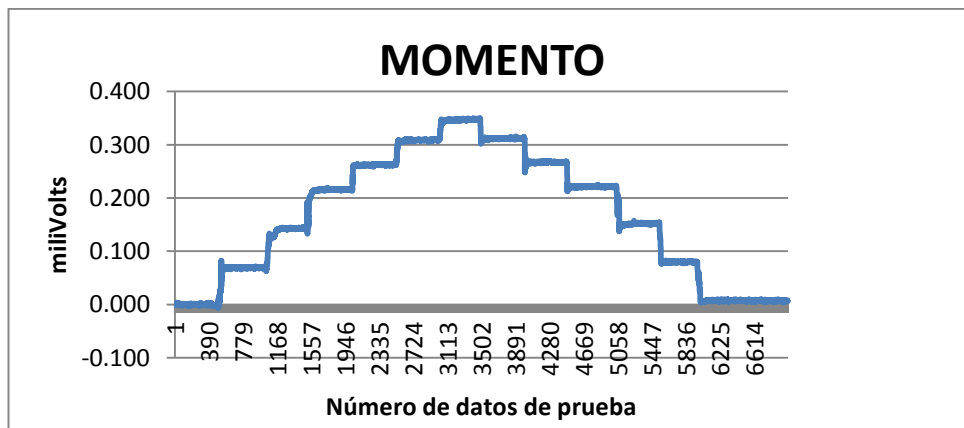


**Figura 4.9.** Proceso de Calibración del octagonal extendido Amarillo-Rojo.



**Figura 4.10.** Registro del Momento (M) y calibración.

Figura 4.11. Calibración del momento utilizando seis diferentes pesos (45, 45, 45, 35,35 y 25 kilogramos) realizada bajo condiciones de laboratorio, empleando Daq-book-2000, a una frecuencia de 20 Hz y 7000 datos de prueba.



**Figura 4.11.** Gráfica escalonada de calibración del Momento.

En el cuadro (4.5 y 4.6), se muestran las medias de los seis pesos en Newton y su respectiva deformación en miliVolts en cinco repeticiones para la obtención de la constante de calibración para la obtención del momento a dos distancias (67 y 47 cm).

Pesos N*m	R1 Mv	R2 Mv	R3 Mv	R4 Mv	R5 Mv
0.000	0	0	0	0	0
295.772	70	64	70	70	66
591.543	143	39	142	142	139
887.315	215	209	213	213	213
1117.359	262	254	259	258	257
1347.404	309	301	305	304	302
1544.585	346	338	342	342	338
1347.404	311	302	308	307	297
1117.359	267	258	262	258	255
887.315	221	212	217	213	214
591.543	149	144	149	146	140
295.772	80	72	75	73	68
0.000	0	0	0	0	0

**Cuadro 4.5.** Medias en Newton Vs mili Volts durante el proceso de calibración del Momento a 67 cm.

Pesos N*m	R1 Mv	R2 Mv	R3 Mv	R4 Mv	R5 Mv
0.000	0	0	0	0	0
207.482	51	51	50	50	49
414.963	103	103	103	101	104
622.445	158	154	152	152	154
783.819	193	185	186	187	186
945.194	227	219	219	217	221
1083.515	252	245	246	245	247
945.194	227	218	219	219	222
783.819	199	186	188	185	190
622.445	165	153	154	153	156
414.963	115	104	103	103	108
207.482	63	51	49	50	56
0.000	0	0	0	0	0

**Cuadro 4.6.** Medias obtenidas en Newton Vs mili Volts durante el proceso de calibración del Momento a 47 cm.

**Cuadro (4.7), Análisis de varianza de la línea de regresión lineal para la variable del Momento empleando el paquete estadístico Minitab V15.**

**Análisis de regresión: N\*m vs. mV**

---

$N*m = - 15.92 + 4.374 \text{ mV}$   
 $S = 48.7401$   $R\text{-cuad.} = 98.8 \%$   $R\text{-cuad.}(\text{ajustado}) = 98.8 \%$

---

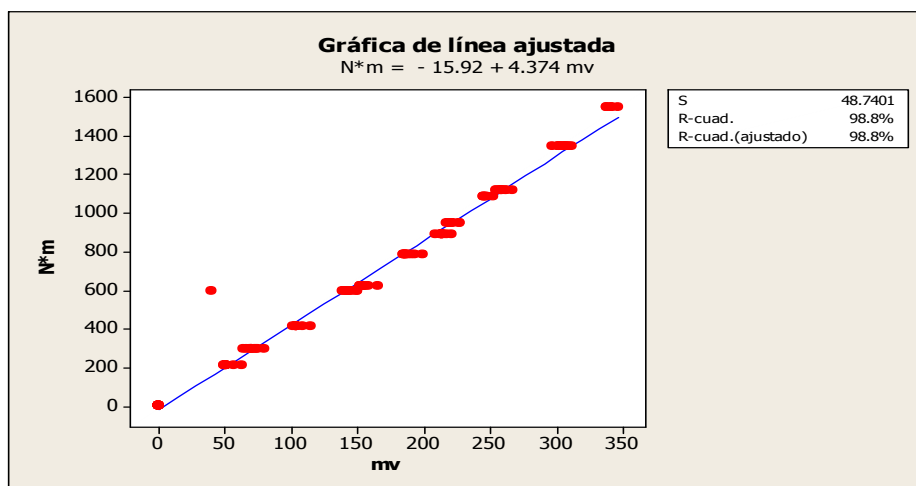
Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	MC	F	F <sub>01</sub>	F <sub>05</sub>
Regresión	1	25551206	25551206	10755.68	2.61	1.98
Error	128	304077	2376			
Total	129	25855283				

---

En el análisis de varianza se observa que el valor de F (01,05) de la tabla es menor a la Fc, por lo tanto existe diferencia estadística significativa en la regresión, debida a la diferencia entre los pesos y a la frecuencia acumulada de los mismos en el Momento.

**En la figura 4.12. Se muestra la línea de calibración obtenida, empleando el programa Minitab. La ecuación de calibración obtenida para el octagonal Rojo-Amarillo fue de 4.374 N mV<sup>-1</sup> con un coeficiente de correlación de 98.8 %.**



**Figura 4.12.** Línea ajustada, ecuación de respuesta y constante de calibración para el Momento del octagonal extendido.

#### 4.1.4. Pruebas de laboratorio para la calibración del octagonal extendido Verde-Azul en el eje horizontal FX.

Figura 4.13. Calibración de la fuerza horizontal (FX) utilizando seis diferentes pesos (45, 45, 45, 35,35 y 25 kilogramos) realizada bajo condiciones de laboratorio, empleando Daq-book-2000, a una frecuencia de 20 Hz y 7000 datos de prueba.

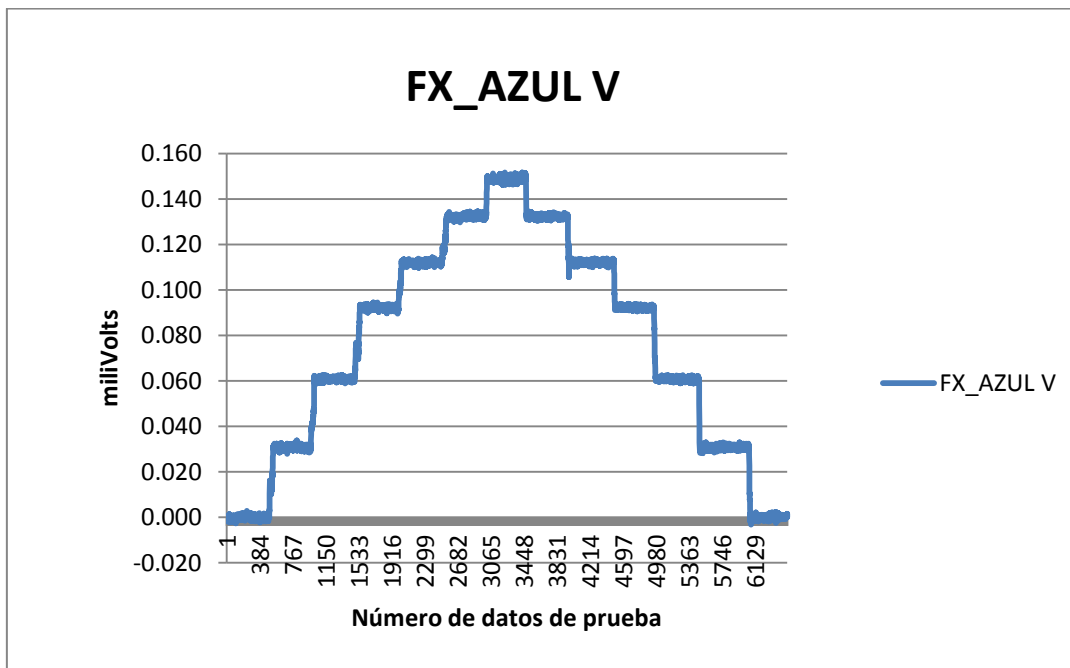


Figura 4.13. Gráfica escalonada de calibración de la horizontal FX del octagonal Verde-Azul.

En el cuadro (4.8), se muestran las medias de los seis pesos en Newton y su respectiva deformación en mili volts en cinco repeticiones para la obtención de la constante de calibración para la fuerza horizontal FX.



Pesos N	R1 Mv	R2 Mv	R3 Mv	R4 Mv	R5 Mv
0	0	0	0	0	0
441.45	30	31	30	30	31
882.9	61	61	61	61	61
1324.35	92	92	92	91	92
1667.7	112	111	112	112	111
2011.05	132	132	132	132	131
2305.35	151	148	148	150	150
2011.05	134	132	132	131	131
1667.7	111	113	112	111	112
1324.35	93	93	93	92	92
882.9	61	62	61	61	61
441.45	30	32	32	31	31
0	0	0	0	0	0

**Cuadro 4.8.** Medias de pesos (N) y su deformación en mV.

**Cuadro (4.9).** Análisis de varianza de la línea de regresión lineal para la variable (FX), empleando el paquete estadístico Minitab V15.

**Análisis de regresión: N vs. Mv**

---

La ecuación de regresión es  
 $N = - 30.76 + 15.29 Mv$   
 $S = 33.5078$  R-cuad. = 99.8 % R-cuad.(ajustado) = 99.8 %

---

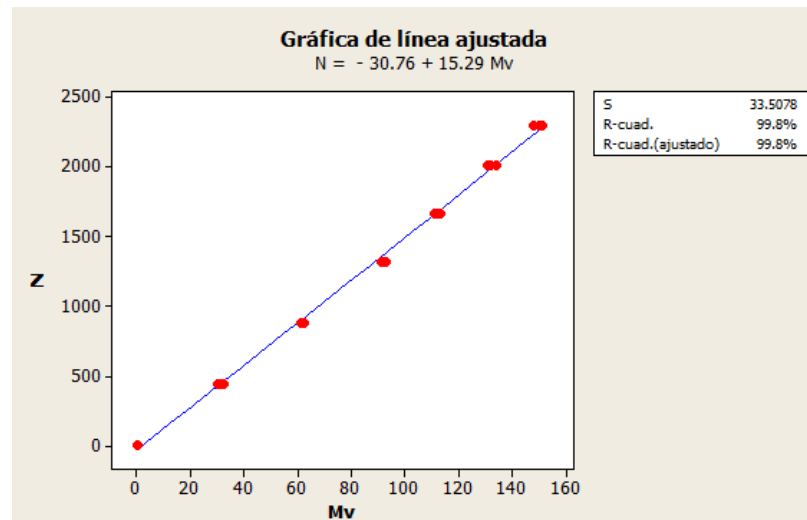
Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	MC	Fc	F <sub>01</sub>	F <sub>05</sub>
Regresión	1	35960431	35960431	32028.27	2.66	2.00
Error	63	70735	1123			
Total	64	36031166				

---

En el análisis de varianza se observa que el valor de F (01,05) de la tabla es menor a la Fc, por lo tanto existe diferencia estadística significativa en la regresión, debida a la diferencia entre los pesos y a la frecuencia acumulada de los mismos en la dirección FX.

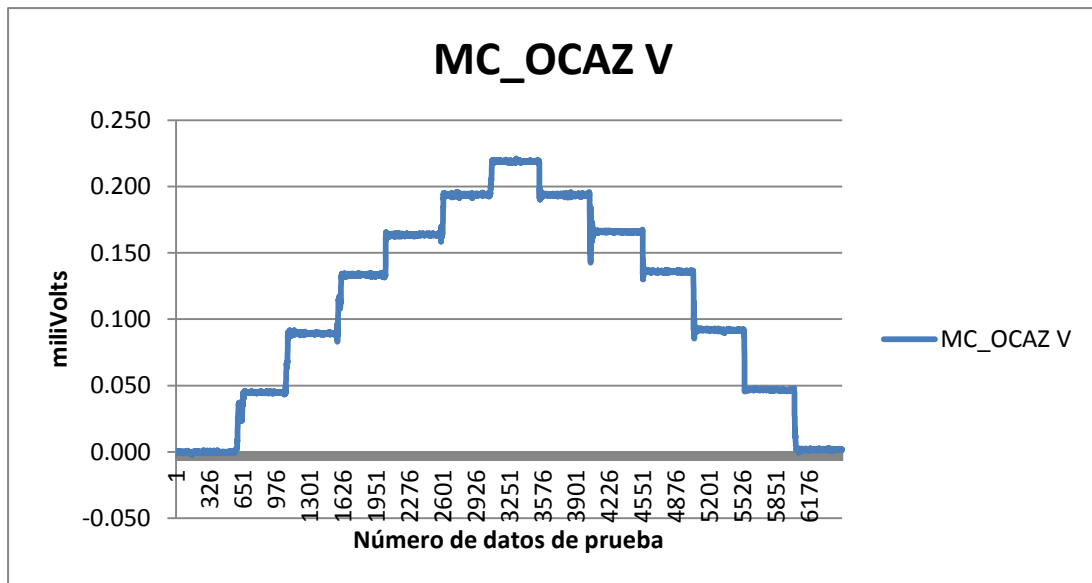
En la figura 4.14. Se muestra la línea de calibración obtenida, empleando el programa Minitab. La ecuación de calibración obtenida para el octagonal Verde-Azul fue de  $15.29 \text{ N mV}^{-1}$  con un coeficiente de correlación de 99.8 %.



**Figura 4.14.** Línea ajustada, ecuación de respuesta y constante de calibración en (FX) del octagonal extendido verde-azul.

#### 4.1.5. Pruebas de calibración para la medición del momento del octagonal extendido Verde-Azul.

**Figura 4.15** Calibración del momento utilizando seis diferentes pesos (45, 45, 45, 35,35 y 25 kilogramos) realizada bajo condiciones de laboratorio, empleando Daq-book-2000, a una frecuencia de 20 Hz y 7000 datos de prueba.



**Figura 4.15.** Gráfica escalonada de calibración del Momento del octagonal Verde-Azul.

En el cuadro (4.10 y 4.11), se muestran las medias de los seis pesos en Newtons y su respectiva deformación en mili Volts en cinco repeticiones para la obtención de la constante de calibración del Momento.

Pesos N*m	R1 Mv	R2 Mv	R3 Mv	R4 Mv	R5 Mv
0	0	0	0	0	0
242.8	40	36	37	37	37
485.6	75	71	71	72	73
728.39	109	106	106	107	107
917.24	133	130	130	132	131
1106.08	157	154	154	155	155
1267.94	176	174	174	175	176
1106.08	156	155	154	155	156
917.24	132	130	130	132	131
728.39	108	106	106	107	107
485.6	74	70	71	72	73
242.8	38	36	36	36	37
0	0	0	0	0	0

**Cuadro 4.10.** Datos obtenidos en Newton Vs miliVolts durante el proceso de calibración del Momento.

Pesos	R1	R2	R3	R4	R5
N*m	Mv	Mv	Mv	Mv	Mv
0	0	0	0	0	0
286.943	46	45	45	46	44
573.885	90	90	89	90	89
860.828	135	133	133	134	133
1084.005	164	165	164	164	163
1307.183	194	193	194	194	193
1498.478	219	218	219	219	219
1307.183	195	194	194	195	194
1084.005	165	164	166	164	164
860.828	134	134	135	134	133
573.885	89	90	92	90	89
286.943	46	45	47	45	44
0	0	0	0	0	0

**Cuadro 4.11.** Datos obtenidos en Newton Vs mili Volts durante el proceso de calibración del Momento.

**Cuadro (4.12).** Análisis de varianza de la línea de regresión lineal para la variable (Momento), empleando el paquete estadístico Minitab V15.

#### Análisis de regresión: Nm vs. Mv

---

La ecuación de regresión es

$$Nm = - 11.61 + 6.881 Mv$$

$$S = 30.5010 \quad R\text{-cuad.} = 99.6 \% \quad R\text{-cuad.}(\text{ajustado}) = 99.5 \%$$


---

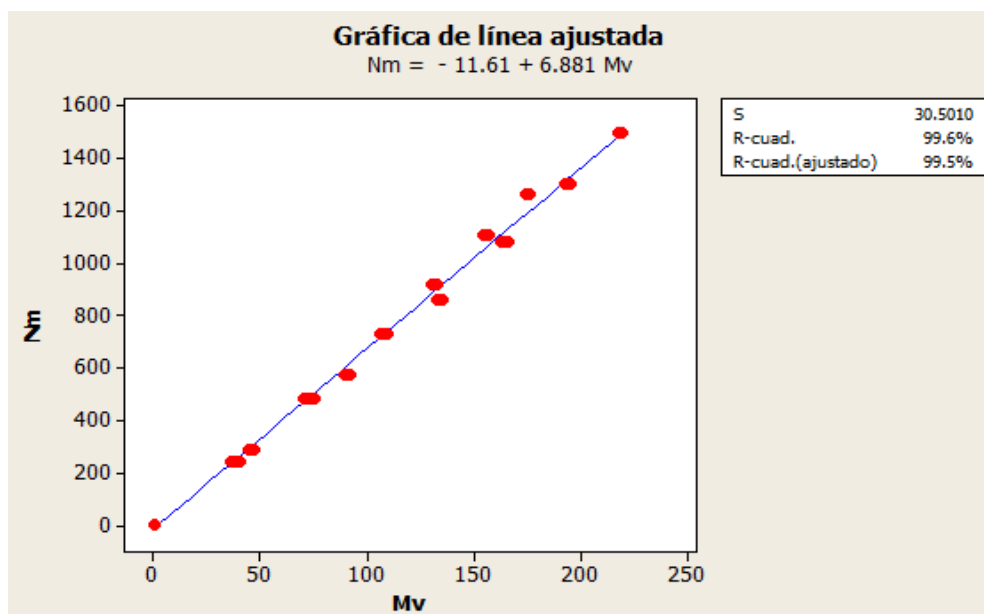
#### Análisis de varianza

Fuente	GL	SC	MC	Fc	F <sub>01</sub>	F <sub>05</sub>
Regresión	1	26433910	26433910	28414.07	2.61	1.98
Error	128	119080	930			
Total	129	26552990				

---

En el análisis de varianza se observa que el valor de F<sub>(01,05)</sub> de la tabla es menor a la Fc, por lo tanto existe diferencia estadística significativa en la regresión, debida a la diferencia entre los pesos y a la frecuencia acumulada de los mismos en el Momento.

En la figura (4.16), Se muestra la línea de calibración obtenida, empleando el programa Minitab. La ecuación de calibración obtenida para el octagonal Verde-Azul fue de  $6.88 \text{ N mV}^{-1}$  con un coeficiente de correlación de 99.6 %.



**Figura 4.16.** Línea ajustada, ecuación de respuesta y constante de calibración del Momento del octagonal extendido verde-azul.

En el cuadro (4.13) Se muestran las constantes de calibración obtenidas de los octagonales

Sensor (dinamómetro)	Input Gain	Scaling Gain	Excitación Volts	Constante N/mV
<b>Octagonal Amarillo-rojo (Fx)</b>	4.49	4.49	9.54	13.58
<b>Octagonal Amarillo-rojo (Fy)</b>	4.44	4.46	9.53	20.33
<b>Octagonal Amarillo-rojo (M)</b>	4.45	4.45	9.56	4.37
<b>Octagonal verde-azul (Fx)</b>	4.46	4.47	9.52	15.29
<b>Octagonal verde-azul (M)</b>	4.44	4.44	9.53	6.88

**Cuadro 4.13.** Constantes de calibración de los octagonales extendidos.

## 4.2. Evaluaciones bajo condiciones de campo.

Para las evaluaciones realizadas bajo condiciones de campo de las fuerzas de reacción del suelo en las direcciones FX, FY y Momento se utilizó únicamente el transductor octagonal de anillo extendido Amarillo-Rojo.

### 4.2.1. Medición de profundidad

En la Figura 4.17. Se muestra un ejemplo del proceso de medición de las profundidades de los arreglos.



Figura 4.17. Medición de profundidades de los arreglos.

En el cuadro (4.14). Se muestran las medias de las profundidades y desviación estándar de 24 muestras de cada uno de los arreglos realizados en campo con dos cinceles delanteros y un trasero ambos arreglos a una profundidad de 20 cm.

Repeticiones	Cinzel trasero sin alas Profundidad promedio	Cinzel trasero con alas medianas Profundidad promedio	Cinzel trasero con alas grandes Profundidad promedio
R1	20.40	20.92	19.92
R2	19.90	20.33	20.08
R3	20.90	20.83	19.50
R4	20.50	20.75	20.17
Medias	20.43	20.71	19.92
Desv. estándar	1.33	1.15	1.10

**Cuadro 4.14.** Medias y desviación estándar de profundidad de cinceles frontales a 20 cm y cincel trasero a 20 cm.

**En el cuadro (4.15) se muestra las medias de profundidades de 24 muestras de cada uno de los arreglos realizados en campo con dos cinceles delanteros a 20 cm y un cincel trasero a 30 cm de profundidad.**

Arreglos	Cincel trasero sin alas Profundidad promedio	Cincel trasero con alas medianas Profundidad promedio	Cincel trasero con alas grandes Profundidad promedio
R1	30.3	29.25	26.58
R2	29.5	29.17	29.25
R3	29.2	29.33	28.58
R4	29.9	29.83	28.13
Media	29.73	29.40	28.135
Desv. estándar	1.16	1.20	1.50

**Cuadro 4.15.** Medias y desviación estándar de profundidad de cinceles frontales a 20 cm y cincel trasero a 30 cm.

#### 4.2.2. Porcentaje de patinaje

**En el cuadro (4.16), se muestra la distancia y tiempo de recorrido por el tractor en 20 vueltas de la rueda trasera con el implemento levantado. La finalidad de esto, es tomarlo como referencia para determinar el porcentaje de patinaje por cada uno de los arreglos.**

Repeticiones	No. vueltas	Distancia (m)	Tiempo (min)
1	20	100.15	2.01
2	20	100.75	2.03
3	20	100.80	2.06
4	20	100.80	2.06
5	20	100.08	2.04
6	20	101.14	2.08
7	20	100.51	2.05
8	20	100.61	2.06
9	20	100.82	2.05
10	20	101.71	2.09
Media	20	100.74	2.05
Desv. estd.	0	0.46	0.02

**Cuadro 4.16.** Distancia y tiempo de recorrido por el tractor en veinte vueltas.

En el cuadro (4.17), se muestra la distancia recorrida del tractor y tiempo en 20 vueltas, con el implemento enterrado en el suelo, con los diferentes arreglos de cinceles frontales a 20 cm cuando el cincel trasero es dispuesto a 20 cm de profundidad.

Repeticiones	Cincel trasero sin alas		Cincel trasero con alas medianas		Cincel trasero con alas grandes	
	Dist. (m)	T (min)	Dist (m)	T (min)	Dist (m)	T (min)
R1	99.00	2.0153	97.48	2.1034	99.00	2.0684
R2	98.60	2.0616	98.50	2.1049	97.90	2.0741
R3	99.75	2.0706	97.44	2.0829	97.00	2.1050
R4	97.50	2.0603	97.19	2.0762	98.44	2.0851
Media	98.712	2.0520	97.653	2.0919	98.085	2.0831
Desv. estd.	0.938	0.0249	0.579	0.0145	0.851	0.0161

**Cuadro 4.17.** Distancias recorridas y tiempos para cinceles frontales y trasero a 20 cm de profundidad.

En el cuadro (4.18), se muestra la distancia recorrida del tractor y el tiempo en 20 vueltas con el implemento enterrado en el suelo, con los diferentes arreglos de cinceles frontales a 20 cm y con el cincel trasero a 30 cm de profundidad.

Repeticiones	Cincel trasero sin alas		Cincel trasero con alas medianas		Cincel trasero con alas grandes	
	Dist. (m)	T (min)	Dist (m)	T (min)	Dist (m)	T (min)
R1	98.08	2.0762	91.14	2.0525	99.36	2.0638
R2	98.44	2.0732	95.46	2.0832	98.35	2.0734
R3	98.70	2.0616	96.37	2.0757	98.28	2.0709
R4	97.65	2.1016	95.35	2.0745	97.31	2.0922
Media	98.218	2.0781	94.58	2.0715	98.325	2.0751
Desv. estd.	0.456	0.0169	2.34	0.0132	0.837	0.0121

**Cuadro 4.18.** Distancias recorridas y tiempos para cinceles frontales a 20cm y cincel trasero a 30 cm.



El cuadro (4.19), Se muestran los Porcentajes de Patinaje en cada repetición, con los arreglos de dos cinceles frontales a 20 cm en dos combinaciones de cincel trasero: 20 y 30 cm de profundidad (sin alas, con alas medianas y con alas grandes respectivamente).

Porcentaje de Patinaje			
20 cm de profundidad		30 cm de profundidad	
Arreglos	%	Arreglos	%
	1.72		2.64
2F201T20SA	2.12	2F201T30SA	2.28
	0.98		2.03
	3.21		3.22
Media	2.03		2.54
Desv. estándar	0.93		0.51
	3.23		9.53
2F201T20AM	2.22	2F201T30AM	5.24
	3.27		4.34
	3.52		5.35
Media	3.06		6.12
Desv. estándar	0.57		2.32
	1.72		1.37
2F201T20AG	2.81	2F201T30AG	2.37
	3.71		2.44
	2.28		3.40
Media	2.63		2.39
Desv. estándar	0.84		0.82

**Cuadro 4.19.** Porcentaje de Patinaje en seis diferentes arreglos y a dos profundidades de trabajo.

En el cuadro (4.20), Se muestra el análisis de varianza del porcentaje de patinaje del tractor con los seis diferentes arreglos a 20 y 30 cm de profundidad.

ANÁLISIS DE VARIANZA					
FU	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	5	45.172501	9.034500	6.0394	0.003
BLOQUES	3	2.326599	0.775533	0.5184	0.679
ERROR	15	22.438751	1.495917		
TOTAL	23	69.937851			
C.U. = 39.11%					

**Cuadro 4.20.** Análisis de varianza del porcentaje de patinaje.

En el análisis de varianza se observa que el valor de  $F_{01=2.94}$  y  $F_{05=2.13}$  de la tabla es menor a la  $F_c$ , por lo tanto existe diferencia estadística significativa en al menos uno de los seis diferentes arreglos de cinceles.

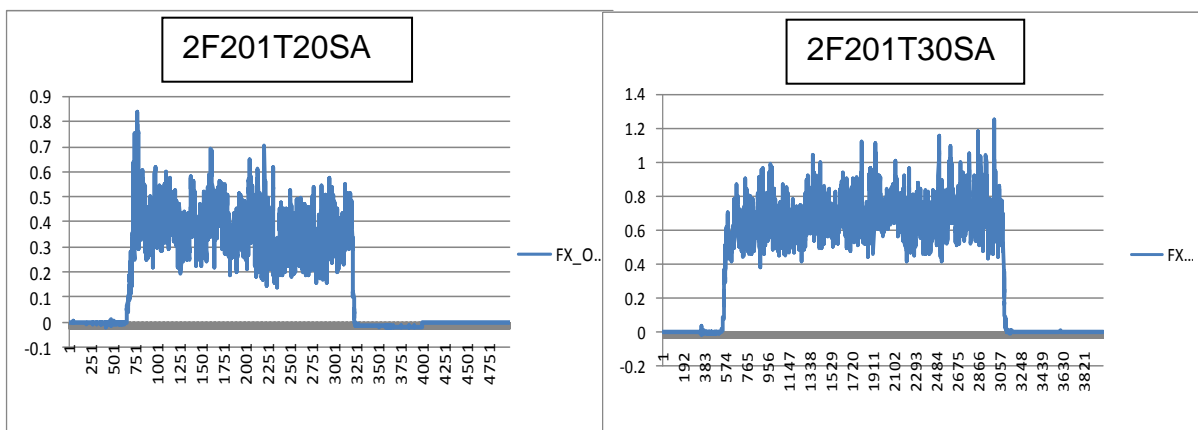
En el cuadro (4.21). Se observa que el arreglo 2F201T30AM es el que produce mayor porcentaje de patinaje con un valor de 6.11 % con respecto a los demás arreglos.

T A B L A D E M E D I A S	
TRATAMIENTO	MEDIA
5	6.1150 A
2	3.0650 B
3	2.6355 B
4	2.5425 B
6	2.3950 B
1	2.0125 B

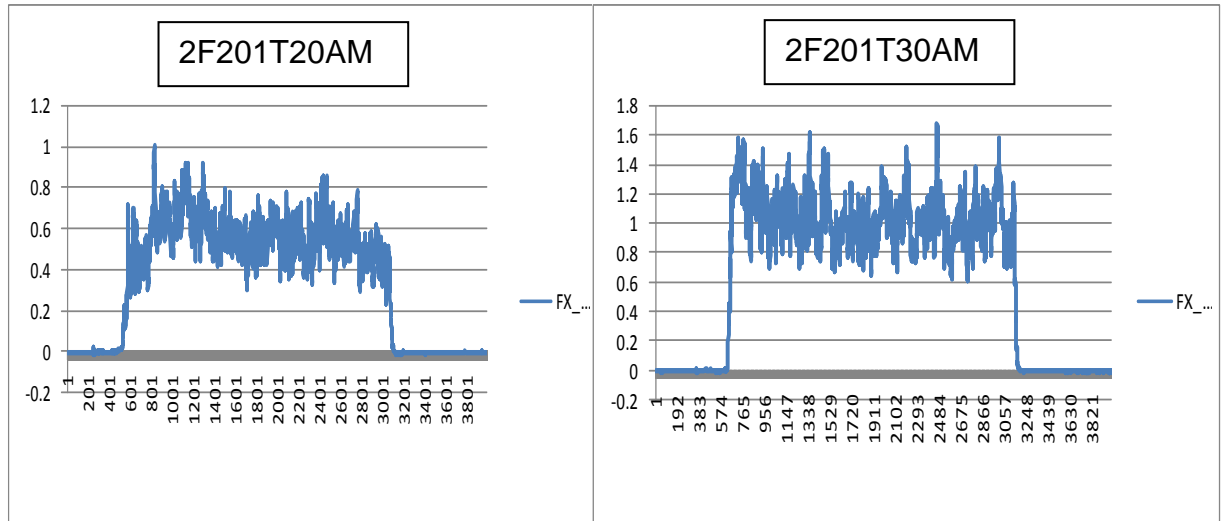
**Cuadro 4.21.** Comparación de medias de patinaje de los seis arreglos evaluados empleando la prueba de Tukey al 0.05 de significancia.

#### 4.2.3. Análisis de datos obtenidos en campo

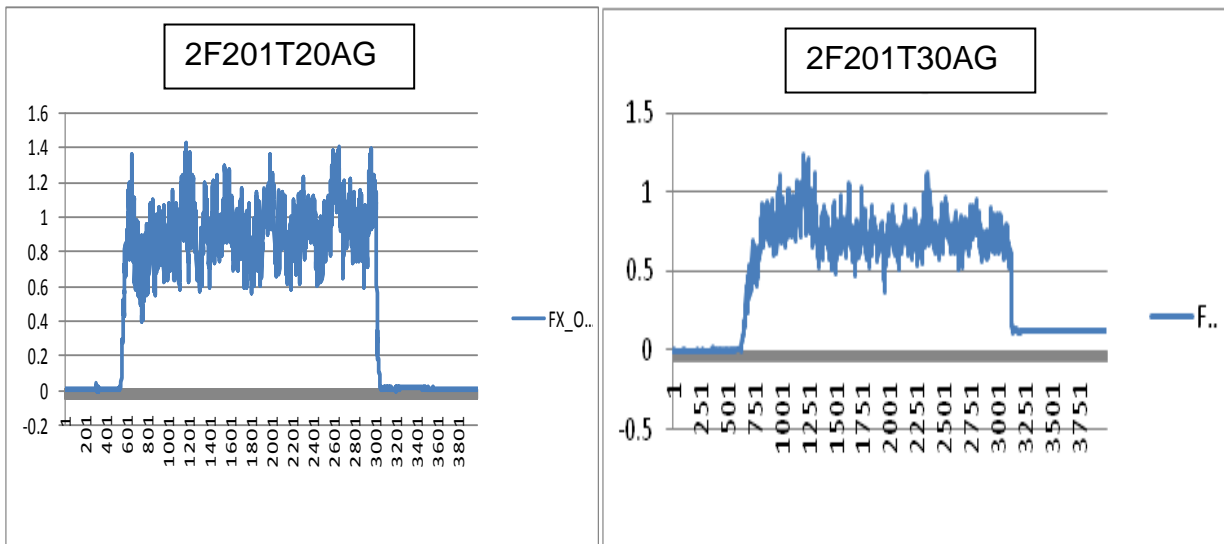
En la figura 4.18. (a) Se muestra el monitoreo de fuerzas FX para el arreglo sin alas a las profundidades de 20 y 30 cm, en la figura (b), para el arreglo con alas medianas a las profundidades de 20 y 30 cm, en la figura (c) para los arreglos de alas grandes a las profundidades de 20 y 30 cm.



**Figura 4.18 (a)** Arreglo de dos cinceles frontales a 20 cm y un cincel trasero a 20 y 30 cm de profundidad sin alas para el monitoreo de FX.



**Figura 4.18. (b)** Arreglo de dos cinceles frontales a 20 cm y un cincel trasero a 20 y 30 cm de profundidad con alas medianas para el monitoreo de FX.



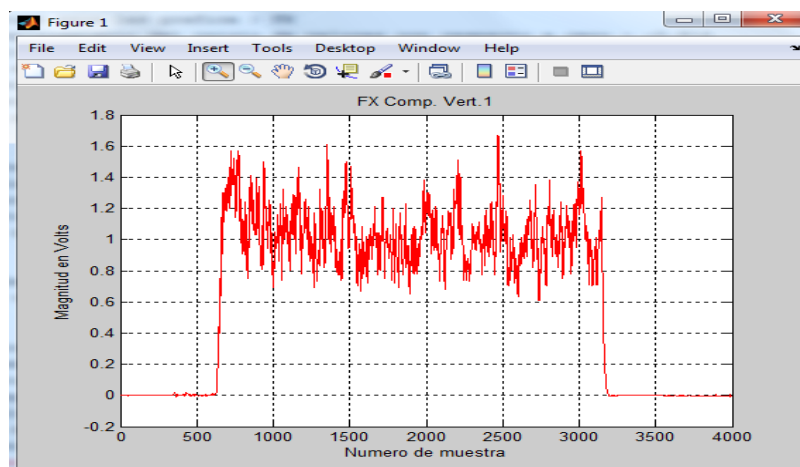
**Figura 4.18. (c)** Arreglo de dos cinceles frontales a 20 cm y un cincel trasero a 20 y 30 cm de profundidad con alas grandes para el monitoreo de FX.

En el cuadro (4.22). Se muestran los valores de medias sumadas con el espectral y multiplicadas por la constante correspondiente para la fuerza horizontal (FX).

Rep.	2 cinceles delanteros a 20 cm y un cincel trasero a 20cm de profundidad			2 cinceles delanteros a 20 cm y un cincel trasero a 30cm de profundidad		
	2F20 1T20SA	2F20 1T20AM	2F20 1T20AG	2F20 1T30SA	2F20 1T30AM	2F20 1T20AG
R1	3.34	8.82	13.53	10.82	15.42	18.40
R2	2.61	8.88	12.15	9.82	16.61	16.50
R3	4.08	8.59	15.39	10.47	14.88	18.01
R4	5.03	9.00	12.61	13.96	17.79	20.70
Media	3.76	8.82	13.42	11.27	16.18	18.40
Desv. estd.	1.03	0.17	1.43	1.84	1.29	1.74

**Cuadro 4.22.** Valores promedio de las medias sumadas con el espectro y multiplicados por la constante de calibración para FX de cada tratamiento y sus repeticiones dados en kN.

En la figura 4.19. Se muestra un ejemplo del registro en tiempo real de los datos recopilados en campo para la FX con el arreglo 2F201T20SA para posteriormente obtener los valores de las medias y los espectrales correspondientes.



**Figura 4.19.** Registro en tiempo real de datos recopilados en campo.

En el cuadro (4.23). Se muestra el análisis de varianza de datos recopilados en campo para las variables de fuerza horizontal (FX), en seis diferentes arreglos evaluados.

ANÁLISIS DE VARIANZA					
FU	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	5	556.344482	111.268898	83.0684	0.000
BLOQUES	3	13.827881	4.609293	3.4411	0.043
ERROR	15	20.092285	1.339486		
TOTAL	23	590.264648			

C.U. = 9.66%

**Cuadro 4.23.** Análisis de varianza de los datos recopilados en campo.

En el análisis de varianza se observa que el valor de  $F_{01=2.94}$  y  $F_{05=2.13}$  de la tabla es menor a la  $F_c$ , por lo tanto existe diferencia estadística significativa en al menos uno de los seis diferentes arreglos de cinceles para las fuerzas en la dirección FX.

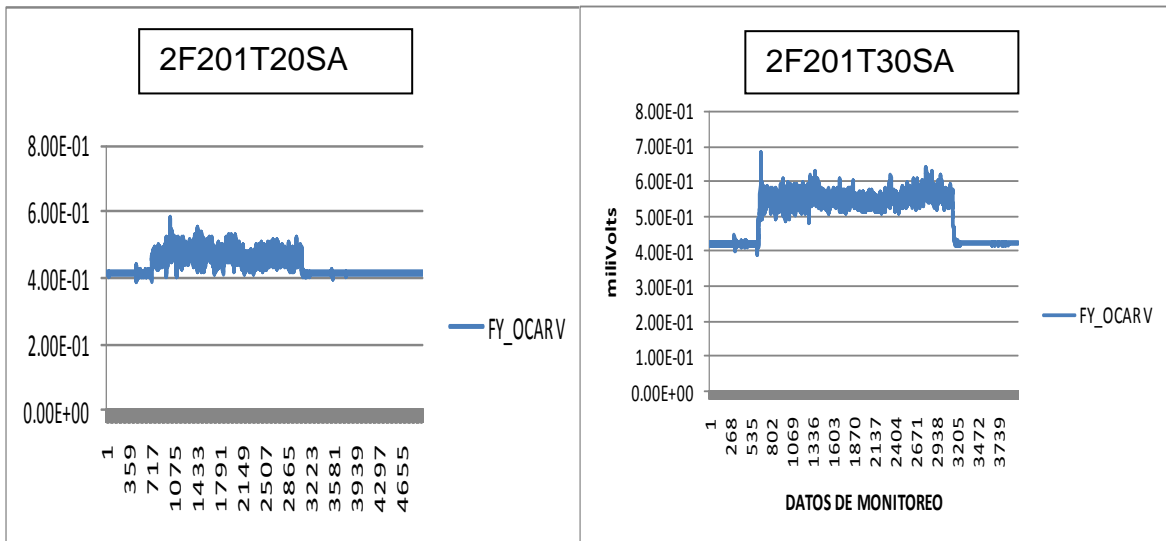
En el cuadro (4.24) Se muestran las medias de los tratamientos, donde la menor demanda de fuerza está dada por el arreglo número uno (2F201T20SA), la mayor demanda de fuerza se obtuvo en los arreglos cinco (2F201T30AM) y seis (2F201T30AG), que estadísticamente son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey con nivel de significancia de 0.05.

TRATAMIENTO	MEDIA
6	18.4000 A
5	16.1750 A
3	13.4250 B
4	11.2750 BC
2	8.8250 C
1	3.7500 D

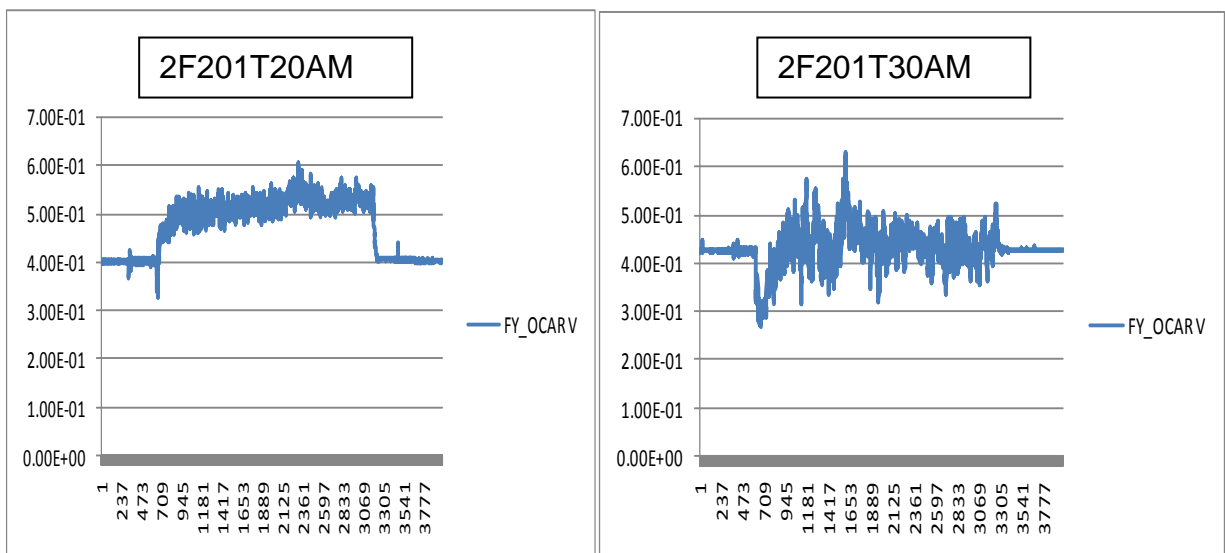
NIVEL DE SIGNIFICANCIA = 0.05  
 TUKEY = 2.6619  
 VALORES DE TABLAS (0.05), (0.01) = 4.60, 5.80

**Cuadro 4.24.** Comparación de medias para la dirección FX.

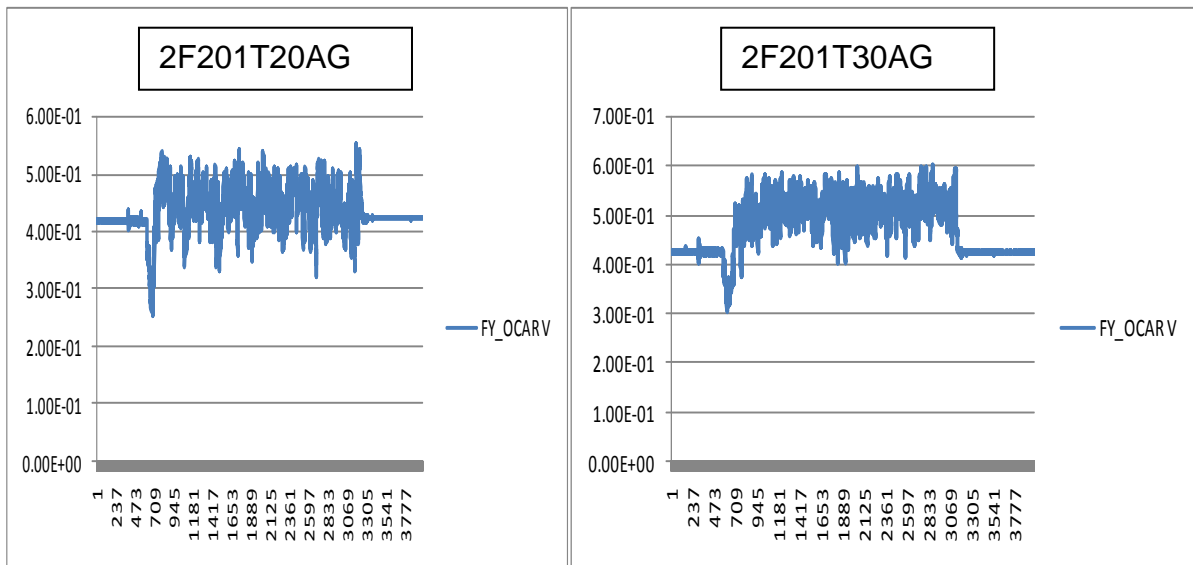
En la figura 4.20. Se muestran los seis arreglos; el par de arreglos sin alas Figura (a) no existe una fuerza de resistencia a la penetración del suelo por el implemento a diferencia de los arreglos con alas (b), (c) en la que existe una fase significativa de resistencia a la penetración la cual es contrarrestada con el peso del implemento.



**Figura 4.20.** (a) Arreglos sin alas no existe fuerza de resistencia a la penetración del suelo por el implemento.



**Figura 4.20** (b) Arreglos con alas medianas, existe una fase significativa de resistencia a la penetración contrarrestada por el peso del implemento.



**Figura 4.20.** (c) Arreglos con alas grandes, en los que existe la mayor fase significativa de resistencia a la penetración el suelo que es contrarrestada por el peso del implemento.

En el cuadro (4.25) Se muestran los valores de medias sumadas con el valor del espectral y multiplicadas por la constante correspondiente para la fuerza vertical (FY).

Rep.	2 cinceles delanteros a 20 cm y un cincel trasero a 20cm de profundidad			2 cinceles delanteros a 20 cm y un cincel trasero a 30cm de profundidad		
	2F20 1T20SA	2F20 1T20AM	2F20 1T20AG	2F20 1T30SA	2F20 1T30AM	2F20 1T30AG
R1	1.47	2.33	0.56	2.75	1.00	1.31
R2	1.10	2.06	1.00	2.54	1.70	1.25
R3	1.36	2.39	1.02	2.32	1.46	1.83
R4	1.72	2.73	1.31	3.97	2.12	2.02
Medias	1.41	2.38	0.97	2.90	1.57	1.60
Des. Est.	0.06	0.07	0.09	0.54	0.21	0.14

**Cuadro 4.25.** Valores promedio de las medias sumadas con el espectro y multiplicados por la constante de calibración para FY de cada tratamiento y sus repeticiones dados en kN.

En la figura 4.21. Se muestra un ejemplo del registro en tiempo real de los datos recopilados en campo para la fuerza vertical FX con el arreglo 2F201T20SA para su posterior análisis espectral.

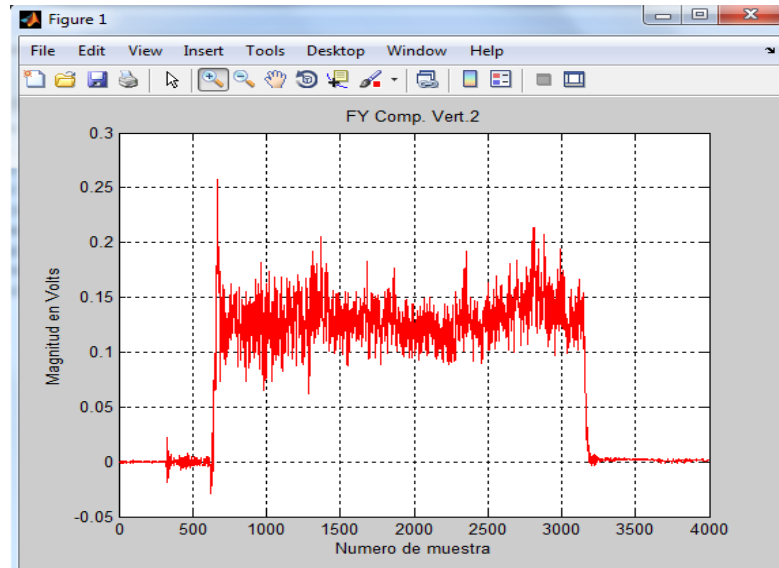


Figura 4.21. Registro en tiempo real de datos recopilados en campo.

En el cuadro (4.26), se muestra el análisis de varianza de datos recopilados en campo para las variables de fuerzas en vertical (FY), en seis diferentes arreglos evaluados.

ANÁLISIS DE VARIANZA					
FU	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	5	9.880035	1.976007	22.7793	0.000
BLOQUES	3	2.132088	0.710696	8.1929	0.002
ERROR	15	1.301186	0.086746		
TOTAL	23	13.313309			
C.U. = 16.28%					

Cuadro 4.26. Análisis de varianza de datos recopilados en campo.

En el análisis de varianza se observa que el valor de  $F_{01=2.94}$  y  $F_{05=2.13}$  de la tabla es menor a la  $F_c$ , por lo tanto existe diferencia estadística significativa en



.al menos uno de los seis diferentes arreglos de cinceles para las fuerzas en la dirección FY.

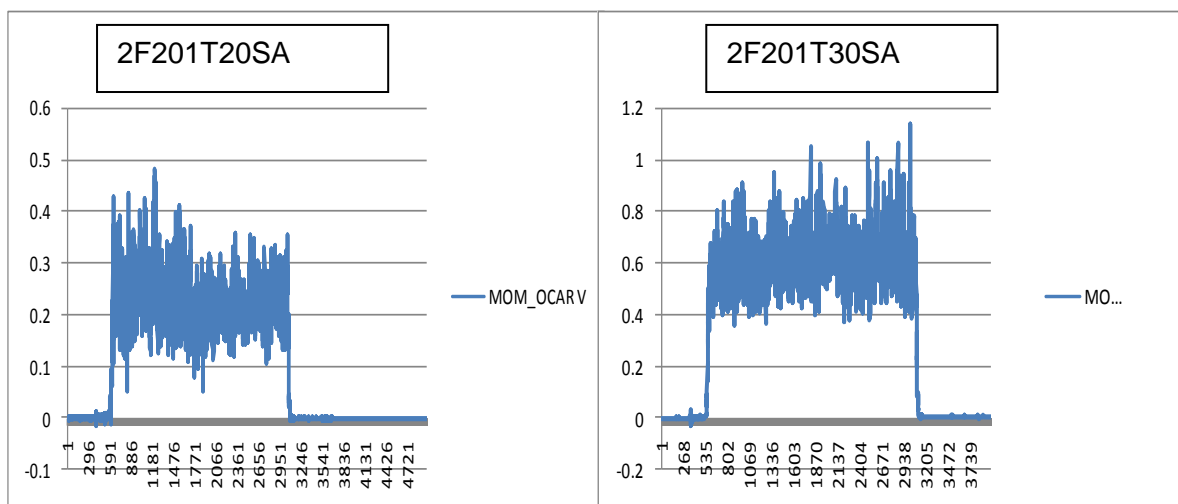
En el cuadro (4.27) se muestran las medias de los tratamientos de la fuerza de succión FY. Este cuadro nos indica que existe una reducción de la fuerza de succión para el arreglo con alas a la profundidad de 30 cm, similar a los arreglos sin alas y con alas medianas a una profundidad de 20 cm.

T A B L A D E M E D I A S		
TRATAMIENTO	MEDIA	
4	2.9025	A
2	2.3825	A
6	1.6075	B
5	1.5725	B
1	1.4175	B
3	0.9750	B

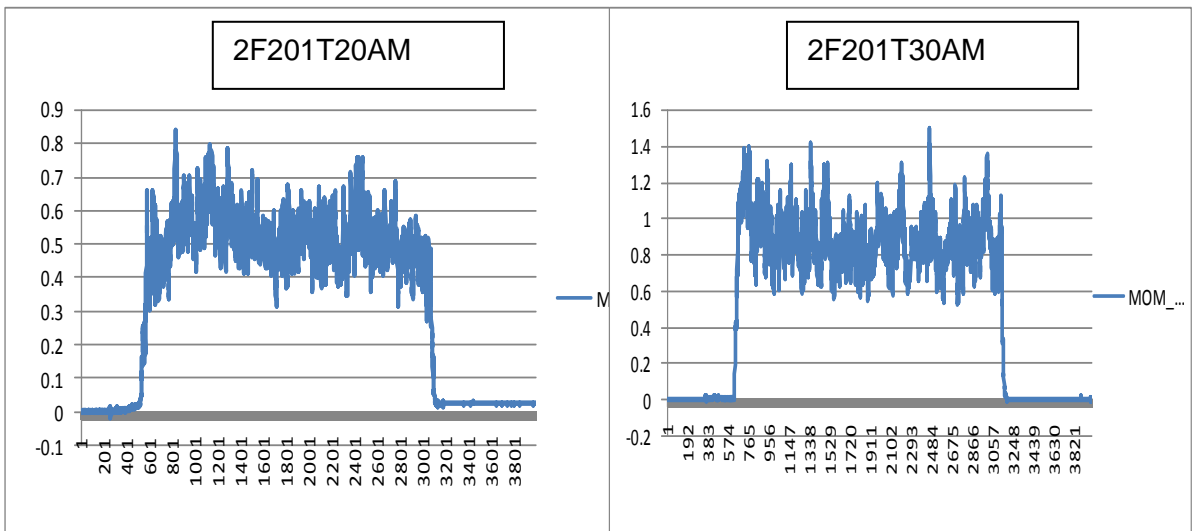
NIVEL DE SIGNIFICANCIA = 0.05  
 TUKEY = 0.6774  
 VALORES DE TABLAS <0.05>, <0.01> = 4.60, 5.80

**Cuadro 4.27.** Comparación de medias de los seis diferentes arreglos en FY.

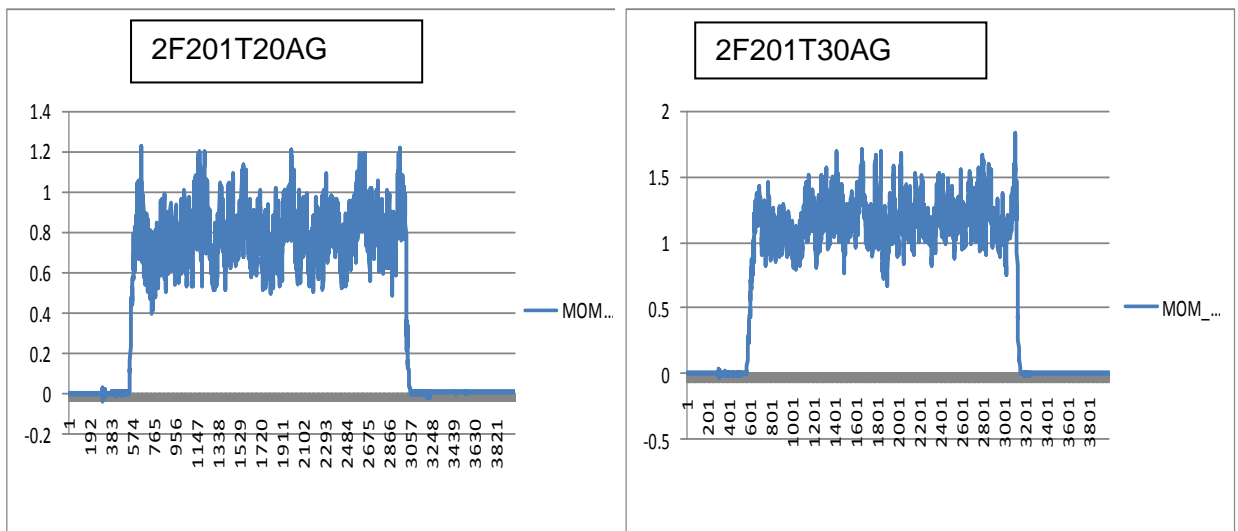
En la figura 4.22 (a). Se muestra el monitoreo de fuerzas para el arreglo sin alas a las profundidades de 20 y 30 cm, en la figura (b) para el arreglo con alas medianas a las profundidades de 20 y 30 cm, en la figura (c) para los arreglos de alas grandes a las profundidades de 20 y 30 cm.



**Figura 4.22. (a)** Arreglos sin alas para monitoreo del Momento.



**Figura 4.22. (b)** Arreglos con alas medianas para monitoreo del Momento.



**Figura 4.22. (c)** Arreglos con alas grandes para monitoreo del Momento.

**Cuadro (4.28). Valores de las medias en mV del Momento sumadas con el espectral y multiplicadas por su constante correspondiente.**

Rep.	2 cinceles delanteros a 20 cm y un cincel trasero a 20cm de profundidad			2 cinceles delanteros a 20 cm y un cincel trasero a 30cm de profundidad		
	2F20 1T20SA	2F20 1T20AM	2F20 1T20AG	2F20 1T30SA	2F20 1T30AM	2F20 1T30AG
R1	1.16	4.08	3.69	3.03	4.08	4.91
R2	0.98	4.58	3.35	2.80	4.58	4.51
R3	1.36	4.05	3.56	2.70	4.05	4.73
R4	1.69	4.87	3.74	3.95	5.24	5.48
Media	1.30	4.39	3.58	3.12	4.49	4.91
Desv.	0.30	0.40	0.17	0.56	0.55	0.41
Estd.						

**Cuadro 4.28.** Valores promedio de las medias sumadas con el espectro y multiplicados por la constante de calibración para Momento de cada tratamiento y sus repeticiones dados en kN.

En la figura 4.23. Se muestra un ejemplo del monitoreo del Momento en tiempo real para el arreglo 2F201T20SA para su posterior análisis espectral.

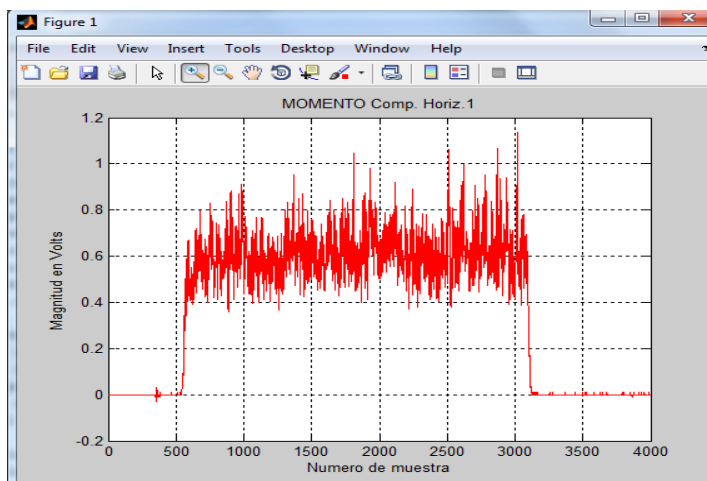


Figura 4.23. Ejemplo de monitoreo en tiempo real del Momento para el arreglo 2F201T20SA.

En el cuadro (4.29), se muestra el análisis de varianza de datos recopilados en campo para las variables de Momento, en los seis diferentes arreglos evaluados.

ANÁLISIS DE VARIANZA					
FU	GL	SC	CM	F	P>F
TRATAMIENTOS	5	34.552979	6.910596	103.2054	0.000
BLOQUES	3	2.276947	0.758982	11.3349	0.001
ERROR	15	1.004395	0.066960		
TOTAL	23	37.834320			

C.U. = 7.12%

**Cuadro 4.29.** Análisis de varianza de datos recopilados en campo para el Momento.

En el análisis de varianza se observa que el valor de  $F_{01=2.94}$  y  $F_{05=2.13}$  de la tabla es menor a la  $F_c$ , por lo tanto existe diferencia estadística significativa en al menos uno de los seis diferentes arreglos de cinceles para las fuerzas del Momento.

En el cuadro (4.30). Se muestra la comparación de medias de los tratamientos; la menor demanda de fuerza está dada por el arreglo número uno (2F201T20SA) y la mayor demanda de fuerza se obtuvo por los arreglos dos (2F201T2OAM), cinco (2F201T30AM) y seis (2F201T30AG) que estadísticamente demandaron la misma fuerza de acuerdo a la prueba de Tukey con nivel de significancia del 0.05.

TABLA DE MEDIAS	
TRATAMIENTO	MEDIA
6	4.9125 A
5	4.4900 A
2	4.3975 A
3	3.5875 B
4	3.1225 B
1	1.3050 C

NIVEL DE SIGNIFICANCIA = 0.05  
 TUKEY = 0.5952  
 VALORES DE TABLAS <0.05>, <0.01> = 4.60, 5.80

**Cuadro 4.30.** Comparación de medias del Momento en los seis diferentes arreglos.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La calibración de los transductores octagonales de anillo extendido (Amarillo-Rojo y Verde-Azul), tuvieron una constante de calibración de ( $FX=13.58$ ,  $FY=20.33$ ,  $Momento=4.37$ ) y ( $FX=15.29$ ,  $Momento=6.88$ ) respectivamente y ambos con un coeficiente de correlación superior al 99 %, lo que determina una alta confiabilidad en el monitoreo de fuerzas de reacción del suelo en las direcciones  $FX$ ,  $FY$  y Momento.

En el monitoreo de la fuerza en la dirección  $FX$ , la menor demanda de fuerza fue de 3.75 kN y se obtuvo con el arreglo 2F201T20SA, la mayor demanda de fuerza fue de 16.17 y 18.40 kN y se obtuvieron en los arreglos 2F201T30AM y 2F201T30AG respectivamente, los cuales se comportaron estadísticamente iguales.

Durante el monitoreo en campo para el eje vertical ( $FY$ ), en las corridas realizadas de los arreglos sin alas a la profundidad de 20 y 30 cm se observa que no existe una fuerza de resistencia a la penetración del suelo por el implemento, a diferencia de los arreglos con alas medianas y grandes a las mismas profundidades.

En el monitoreo de Momento, se muestra un registro similar al de la fuerza en la dirección  $FX$ , registrando la menor magnitud para el arreglo 2F201T20SA y la mayor magnitud para los arreglos 2F201T20AM, 2F201T30AM y 2F201T30AG

El mayor porcentaje de patinaje registrado durante el monitoreo fue de 6.11 % con el arreglo 2F201T30AM y el menor fue para los otros cinco arreglos con un porcentaje de patinaje promedio de 2.54 %, lo cual significa que hay alta eficiencia tractiva.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- AFZALINIA, S. and M. ROBERGE.** 2009. An extended octagonal ring transducer for the compression chamber of a large square baler. *J. Agr. Sci. Tech* 11:377-389.
- ALIMARDANI, R., FAZEL, Z., AKRAM, A., MAHMOUDI, A. and VARNAMKHASTI, M.G.** (2008). Design and development of a three-point hitch dynamometer. *Journal of Agricultural Technology*. 4(1): 37-52.
- AL-JANOBI, A.A. and S.A., AI-SUHAIBANI.** 1995. Setup of a calibration rig in a mobile instrumentation package. *J. Agric. Res.* 40(2): 1-15.
- ALUKO, O.B. and D.A. SEIG.** 2000. An experimental investigation of the characteristics of and conditions for brittle fracture in two-dimensional soil cutting. *Soil Tillage Res.* 57:143-157.
- ALUKO, O.B. and D.A. SEIG.** 2000. An experimental investigation of the characteristics on and condition for brittle fracture in two-dimensional soil cutting. *Soil Tillage Res.* 57: 143-157.
- ARCOS, E.S. y LAUREL, H.O.** 1997. Diseño de un dinamómetro para la medición de fuerzas en el enganche de tres puntos del tractor. *Memorias VII, Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola.* Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- ARVIDSSON, J., T. KELLER, and K. GUSTAFSSON.** 2004. Specific draught for mouldboard plough, chisel plough and disc harrow at different water contents. *Soil Tillage Res.* 79:221-231.
- ASHBURNER, J. y SIMS, B.** 1984. Elementos de diseño del tractor y herramienta de labranza. IICA, San José, Costa Rica. 474 p. (Serie de Libros y Materiales Educativos No. 56).
- BARBER, R.G., NAVARRO, F. y ORELLANA, M.** 1993. *Labranza Vertical.* Centro de Investigación Agrícola Tropical, Misión Británica en Agricultura Tropical y Proyecto de Desarrollo Tierras Bajas del Este del Banco Mundial, Santa Cruz, Bolivia.
- BARBER. R.** 1997. Los principales tipos de labranza. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín No. 8 de tierras y aguas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 8:59-86. Roma Italia.
- BONIFAZ DEL CARPIO, A.** 2012. Evaluación de un transductora integral para determinar las magnitudes de las fuerzas que actúan en los implementos de labranza. Tesis, Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

- BUCKIGHAM F. 1984.** Fundamentos de funcionamiento de maquinaria (FMO), serie cultivo. Deere & Company Service Training. Moline, Illinois. EEUU.
- CAMACHO, J.H., y G.A. RODRÍGUEZ.** 2007. Evaluación de implementos de labranza a diferentes velocidades de operación y contenidos de agua del suelo. *Agric. Téc.* 67(1):60-67.
- CAMACHO, J.H., y P.S.G. MAGALHAES.** 2004. Estudio de parámetros operacionales de discos dobles y cinceles parabólicos para prácticas culturales en áreas con residuos vegetales. *Agric. Téc.* (Chile) 64:58-65.
- CAMACHO-TAMAYO, J.H. y RODRÍGUEZ, G.A.** (2007). Evaluación de implementos de labranza a diferentes velocidades de operación y contenidos de agua del suelo. *Agricultura Técnica* 6(1):60-67.
- CAMPOS- MAGAÑA, S. G.** 1993. Development of minimum maize planter for Mexican agriculture, unpublished phd thesis, Newcastle University, England. 167p.
- CAMPOS, M. S., WILLS, B., CADENA Z. M.** 1992. Consideraciones para el diseño de transductores octagonales y su aplicación en la evaluación de implementos de labranza. *Memorias del II Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola (AMIA)*. Irapuato, Gto., México.
- CAMPOS-MAGAÑA, S. G., ARAGÓN, R. A.;** Cadena-Zapata, M. 2000. Diseño y comportamiento de tres transductores de fuerzas para la evaluación de herramienta de labranza. *Congreso Latinoamericano de Ingeniería Agrícola. CLIA. X Congreso Nacional de Ingeniería Agrícola AMIA 2000.*
- CHAUDJURI, D.** 2001. Performance evaluation of various types of furrow openers on seed drills. A review. *J. Agric. Eng. Res.* 79:125-137.
- COOK, M.G. y LEWIS, W.M. (eds.)** 1989. Conservation tillage for crop production in North Carolina. North Carolina Agricultural Extension Service. North Carolina State University, Raleigh, N.C. USA.
- CRUZ, L.A.** 2011. Evaluación de la calidad de trabajo y consumo de energía de multicultivador modificado MCC 3-5-7 con diferentes arreglos. Tesis, Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.
- DE DIOS, C.** 1972. Potencia y energía absorbidas por máquinas de labranza y siembra. INTA, Pergamino, Argentina, Informe técnico No. 116. 10 p.

- DE TORO, A., and J. ARVIDSSON.** 2003. Influence of spring preparation date and soil water content on seedbed physical conditions of a clay soil in Sweden. *Soil Tillage Res.* 70:141-151.
- EDMUNDO, H. H.** 1987. Manejo y conservación de suelos. Programa de cooperación agrícola del Cono Sur. *Dialogo XXIV.*, pp. 95-116. Santiago, Chile.
- ELIZONDO, E., J.L. COSTA, E. Suero, K.P. FABRIZZI y F. GARCÍA.** 2001. Evaluación de algunas propiedades físicas del suelo luego de la introducción de labranzas verticales en suelo bajo la siembra directa. *Ciencia del suelo* 19(1):11:19.
- FAOa.** 2003. "Manual de prácticas integradas de manejo de conservación de suelos". (Texto de manual).[http://www.fao.org/ag/ags/agse/agse\\_s/7mo/iita/iita.htm](http://www.fao.org/ag/ags/agse/agse_s/7mo/iita/iita.htm)
- FERRANDO, J. y SMITH, J.** Vibrocultivador (I): pontencia requerida según la velocidad de Trabajo. INTA, Castelar, Argentina. Serie: Labranzas No. 14. 1985.
- FRIEDRICH, T.** 1997. Conceptos y objetivos de la labranza en agricultura conservacionista. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín No. 8 de tierras y aguas de la Organización de las Naciones Unidad para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 4: 29-38. Roma Italia.
- GILL, W. and VANDEN VERG, G.** 1967. Soil dynamics in tillage and traction. USDA-ARS. *Agriculture Handbook* No. 316, 511 p.
- GILL, W.R., A.C. BAILEY, and C.A. REAVES.** 1982. Harrow disk curvature. Influence on soil penetration. *Trans. ASAE* 25: 1180-1180.
- GODWIN, R. J.** 1975. An Extended Octagonal Ring Transducer for Use in Tillage Studies. *J. Agric. Eng. Res.*, 20: 347-352.
- GODWIN, R. J., A. J. REYNOLDS, M. J. O'DOGHERTY, A.A. AI-GHAZAL.** 1993. A triaxial dynamometer for force and moment measurements on tillage implements. *J. Agric. Engng. Rese.*, 55(3): 189-205.
- GODWIN, R. J., MAGALHAES, P. S. G., MILLER,S. M. and FRY, R. K.** 1987. Instrumentation to Study the Force System and Vertical Dynamic Behavior of Soil-engaging Implements. *J. Agric. Eng. Res.*, 36: 301-310.



- GODWIN, R. J., REYNOLDS, A. J., O'DOGHERTY, M. J. and Al-Ghazal, A. A.** 1993. A Triaxial Dynamometer for Force and Moment Measurements on Tillage Implements. *J. Agric. Eng. Res.*, 55: 189-205.
- GODWIN, R.J.** 1974. An investigation into the mechanics of narrow tines in frictional soils. Ph.D. Thesis, Univ. of Reading, 248 pp.
- HINOJOSA, M. G.** 2003. Desarrollo de un transductor de fuerza para la evaluación de implementos integrales en tractores categoría II basado en el diseño octagonal extendido. Tesis, Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.
- HOAG, D. L. AND YOERGER, R. R.** 1975. Analysis and Design of Load Rings. *Trans. ASAE*, 19: 995-1000.
- HUNT, D.** 1987. Farm power and machinery management. 7th ed. Iowa State University Press. pp.28-52; 277-288.
- KASISIRA L.L., y H.L.M DU PLESSIS.** 2006. Energy optimization for subsoilers in tandem in a sandy clay loam soil. *Soil Tillage Res* 86:185-198.
- KEPNER, R.A., BAINER, R. and BARGER, E.L.** 1978. Principles of farm machinery. Avi Pub. Co., Westport, Conn., USA, 527 p.
- KHAN, J., GODWIN, R. J., KILGOUR, J. and BLACKMORE, B. S.** 2007. Design and Calibration of a Bi-axial Extended Octagonal Ring Transducer System for the Measurement of Tractor-implement Forces. *J. Eng. Appl. Sci.*, 2(1): 16-20.
- KHEIRALLA, A.F. and Y. AZMI.** 2002. A Tractor Instrumentation and Data Acquisition System for Power and Energy Demand Mapping. University Putra Malaysia.
- KHEIRALLA, A.F., YAHYA, A., ZOHADIE, M. and ISHAK, W.** 2003. Design and Development of a Three-point Auto Hitch Dynamometer for an Agricultural Tractor. *AJSTD*, 20(3 and 4): 271-288.
- KORKUT, I.** 2003. A Dynamometer Design and Its Construction for Milling Operation. *Materials and Design*, 24(8): 631-637.
- KOSTRITSYN, A.K.** 1956. (Cutting of cohesive soil medium with knives and cones). *Vsesoiuzz Akad. Sel'skokhoziaistvennykh Nauk. Zeml. Mekh. Sborn. Trudov*, Leningrad, Vol. 3, pp. 247-290, (NIAE Translation No. 58).

- LACKAS, G.M., R.D. GRISSO, M. YASIN and L.L. BASHFORD.** 1991. Portable data acquisition system for measuring energy requirements of soil-engaging implements. *Computers and Electronics in Agriculture* 5:285-296.
- LOWEN, E. G., MARSHALL, E. R. and SHAW, M. C.** 1951. Electric Strain Gauge Tool Dynamometers. *Proc. Soc. Exp. Stress Analysis*, 8(2): 1-16.
- MAGALHÃES, P.S.G., e W.R. SOUZA.** 1990. Subsolador: Influência de parâmetros geométricos no mecanismo de forças. 2:1033. XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Piracicaba, São Paulo, Brasil, Julio de 1990. Sociedad Brasileira de Ingenieria Agrícola, Jaboticabal, Sao Paulo, Brasil.
- MARÍN, L.O.** 2003. Desarrollo de un transductor de fuerza para la evaluación de implementos integrales a tractores categoría II basado en el diseño de vigas sometidas a esfuerzos flexionantes y torsionantes. Tesis, Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.
- MARTÍNEZ J. A.** 1999. Evaluación agrotécnica y tecnológico-explotativa de un multirrado modelo M-250. Tesis, licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, Edo. de México.
- MARTINEZ-RUBIN, C.E., LÓPEZ-MARTINEZ, J.D., DÍAZ-MARTÍNEZ, J.R. and VALDEZ, C.R.** 2001. Modelos de simulación para estimar el consumo energético requerido para efectuar la labranza. *TERRA* 20(2): 183-188.
- MAYERHOF, G.G.** (1951). The ultimate bearing capacity of foundation. *Geotechnique*, 2(4): 301-332.
- MCKYES, E.** 1985. *Soil Cutting and Tillage*. Elsevier, Amsterdam, 217 p. (Developments in Agricultural Engineering No 7).
- MCKYES, E.** 1989. *Agricultural Engineering Soil Mechanics*. ELSEVIER p. 192-219.
- MCKYES, E. and ALI, O.S.** (1977). The cutting of soil by narrow blades. *J. Terramechanics* 14(2): 43-58.
- MCLAUGHLIN, N. B.** 1996. Correction of in Equation for Extended Ring Transducers. *Trans. ASAE*, 39(2): 443-444.

- MCLAUGHLIN, N. B.**, Tessier, S. and Guilbert, A. 1998. Improved Double Extended Octagonal Ring Drawbar Transducer for 3-D Measurement. *Can. Agric. Eng.*, 40: 257-264.
- MELLO, R.C., e P.S.G. Magalhães.** Desempenho operacional de um arado de discos. *Bragantia (Campinas)* 54:447-454.
- MILLER, P.C.H.** 1971. Soil Failure and the nature of the force system with very narrow tines. B.Sc. Thesis, Nat. Col. Agric. Eng., Silsoe, Benford, U.K.
- MOJICA, L. E. D.** 2000. Evaluación de discos cortadores de residuos y abresurcos para labranza de conservación, empleando equipo multiusos de tracción animal, TESIS, Licenciatura, Instituto Tecnológico de Veracruz, México.
- MOJICA, L.E.D.** 2000. Evaluación de discos cortadores de residuos y abresurco para la labranza de conservación empleando equipo multiuso tracción animal. Tesis, Licenciatura, Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, México.
- MOO-YAM, V.M.J.** 1999. Desarrollo y evaluación de un sistema de adquisición de datos para la evaluación de implementos de labranza. Tesis, Maestría, Universidad Veracruzana, Instituto de ingeniería, Veracruz, Veracruz, México.
- MOUAZEN, A.M., and H. RAMÓN.** 2002. A numerical-statistical hybrid modeling scheme for evaluation of different manure incorporation tools in a loamy sand soil. *Soil Tillage Res.* 58:19-29.
- NEUHOLFF, L.A.** 1959. Measuring force in two or more members whit one instruments. *Agricultural Engineering* 40: 546-457.
- O'CALLAGHAN, J. R. and FARRELLY, K. M.** 1964. Cleavage of soil by tined implements. *J. Agric. Eng. Res.*, 9(3): 259-270.
- O'DOGHERTY, M. J.** 1975. A Dynamometer to Measure the Forces on a Sugar Beet Topping Knife. 20: 339-345.
- O'DOGHERTY, M. J.** 1996. The Design of octagonal Ring Dynamometer. *J. Agric.Eng. Res.*, 63: 9-18.
- OCHOA, J. G., 2002.** Manual de prueba y evaluación de arados CENEMA. Chapingo, México.
- OROZCO, E. De J.** Evaluación de la calidad de trabajo y consumo de energía en implementos comerciales de labranza vertical con diferentes arreglos espaciales y puntas aladas. Tesis, Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

- OZUNA-GÓMEZ, C. A.** 2011. Evaluación de un transductor integral de fuerza bajo condiciones de campo. Tesis, Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.
- SAKURAI, H.** 1996. An application of strain gages to the agricultural machinery. Edit. Farm machinery section. 2nd Training Division. Tsukuba International Centre (TBIC). Japan International Cooperation Agency (JICA).
- SAKURAI, H.,** 1996. An application of strain gages to the agricultural machinery. The 2nd training division, Tsukuba International Centre (TBIC). Japan International Cooperation Agency (JICA).
- SOANE, D and PIDGEON, J.** Tillage requirements in relation to soil physical properties. Soil Science 119: 370-384. 1975.
- SOTO, R.C.** 2010. Evaluación de la calidad de trabajo y consumo de energía de tres implementos comerciales de labranza vertical. Tesis, Licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.
- SPOOR, G. and R. J. GODWIN.** 1978. An experimental investigation into the deep loosening soil by rigid tines. J. Agric. Engng. Res. 23:243-258.
- STAFFORD, J.V.** 1983. Force prediction model for brittle and flow failure of soil by draught tillage tools. Journal of Agricultural Engineering Research. 29(1):51-60.
- SUMMERS, J.; KHALILIAN, A. and BATCHELDER, D.** 1986. Draft Relationships for primary tillage in Oklahoma soils. Transactions of the ASAE 29 (1): 37-39.
- THOMSON, N.P. and K.J. SHINNERS.** (1989). A portable instrumentation system for measuring draft and speed. Applied Engineering in Agriculture 5(2): 133-137.
- TRIPLETT, G. and VAN DOREN, D.** Agriculture Without tillage. Scientific American 236(1) 28-33. 1977.
- VALERA, V.S.** 2000. Evaluación de discos cortadores de residuos y dibujos patentes. Instituto Tecnológico de Veracruz.

## VII. ANEXOS

### 6.1. Características del material a usar en los sensores octagonales transductores de anillo extendido

$$E = 205 \text{ GPa}$$

$$\sigma_y = 440 \text{ MPa}$$

$$F_s = 3$$

$$FG = 2.11$$

$$M = 2.11 \text{ kN}$$

$$b = 0.077$$

$$mT = 0.0498 \text{ m}$$

$$\sigma_0 = 440 \times 10^6 / 3 = 146.6 \text{ MPa}$$

Primeramente es necesario determinar el valor del momento sensitivo ( $S$ ) derivado de las ecuaciones de deformación:

$$\varepsilon = \frac{M}{ES}$$

$$S = \frac{\varepsilon E b t^2}{M}$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$S = \frac{(176 \times 10^6)(0.0762)(0.028^2)}{30000}$$

$$S = 0.8748$$

El momento sensitivo es 0.8748, por lo tanto se tiene:

$$\varepsilon = \frac{S}{E * b * t^2}$$

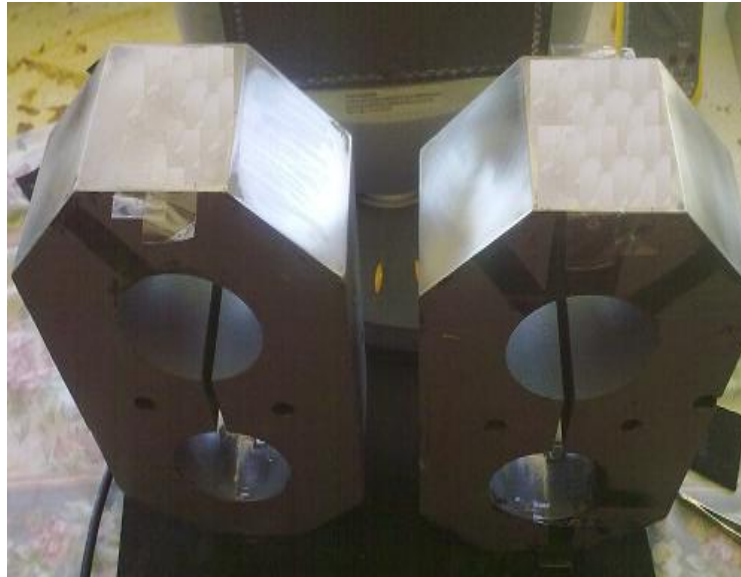
Sustituyendo valores tenemos:

$$\varepsilon = \frac{(0.3505)}{(205 \times 10^9)(0.0762)(0.028^2)}$$

## 6.2. Construcción de dinamómetros (Maquinado, pegado de galgas y cableado)

Se realizó el corte y el barrenado de las piezas de acero con las dimensiones ya mencionadas para los dinamómetros octagonales en la empresa BISON (TECNOMECA AGRICOLA, S.A. de C.V), ubicada en el Municipio de Jesús María, Aguascalientes, México.

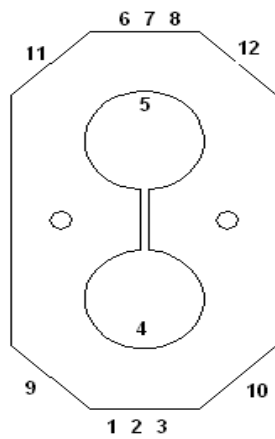
Después de lo anterior, se procedió a lijar las partes donde se colocarían las galgas extensiométricas, con alcohol. Las lijas fueron del 240 y para un mejor acabado se usaron lijas del 360. Se procedió a una limpia con alcohol y acetona para el retiro de impurezas. Los octagonales extendidos quedaron como se muestra en la figura 6.1.



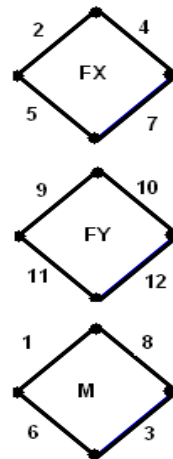
**Figura 6.1.** Octagonal lijado listo para montaje de galgas extensiométricas.

Calculamos el centro de los octagonales y todos sus lados donde se colocarían las galgas, tomando en cuenta los puentes de Wheatstone para poder después cablear y facilitar la conexión de los mismos. Para las galgas 4 y 5 se tomó en cuenta el ángulo 39.5 descrito por Campos (2002), ya que es donde se encuentra el mayor esfuerzo.

numeros y posicion de galgas



puentes de Wheatstone



**Figura 6.2.** Numeración y posición de las galgas extensiométricas según el puente de Wheatstone.

Una vez realizado lo anterior se procede a la colocación de las galgas extensiométricas al centro de la parte superior del octagonal, para después pegarlas con un pegamento comercial que contiene pasta y endurecedor para una mejor adherencia al metal. Todo esto según su numeración, como se muestra en la figura 6.3.



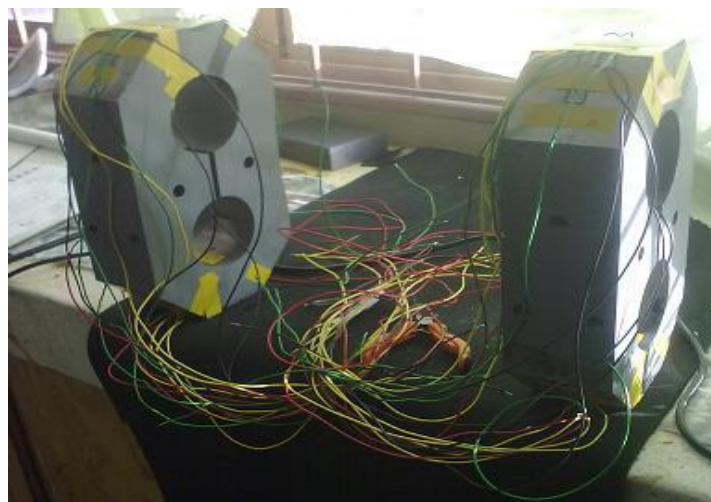
**Figura 6.3.** Colocación de las galgas extensiométricas en el octagonal extendido.

Proporcionamos calor por un período de 12 horas para apresurar el proceso de pegado como se muestra en la figura 6.4.



**Figura 6.4.** Proceso de secado del acoplamiento de galgas pegadas a los octagonales extendidos.

Cumpliendo el periodo de secado, se procede al chequeo de la resistencia de cada galga, verificando que no estén aterrizadas a tierra. Después realizamos el cableado, un color de cable para cada galga del puente de Wheatstone, como se muestra en la figura 6.5. agregar aparatito



**Figura 6.5.** Sistema de cableado de los sensores octagonales.

Procedemos a la protección de las galgas con un pedazo de hule, pegando éste con silicón, para después ser aisladas con cinta (cinta de aislar) para una



mayor protección de éstas. Se montan los sensores en el implemento articulado, como se muestra en la figura 6.6.



**Fig. 6.6.** Implemento articulado con el octagonal ya protegido.

**En el cuadro (6.1). Se muestran las sumas de las medias y los valores espectrales en los diferentes registros de fuerzas FX, FY y Momento.**

FX						
		2F201T20SA			2F201T30SA	
CORRIDAS	MEDIAS	ESPECTRO	total	MEDIAS	ESPECTRO	TOTAL
1	0.2170	0.0294	3.3	0.7480	0.0492	10.8
2	0.1813	0.0109	2.6	0.6816	0.0417	9.8
3	0.2686	0.0319	4.1	0.7234	0.0479	10.5
4	0.3295	0.0410	5.0	0.9146	0.1134	14.0
		2F201T20AM			2F201T30AM	
1	0.5864	0.0638	8.8	1.0487	0.0875	15.4
2	0.5874	0.0669	8.9	1.1106	0.1129	16.6
3	0.5749	0.0580	8.6	1.0070	0.0888	14.9
4	0.5969	0.0664	9.0	1.1977	0.1125	17.8
		2F201T20AG			2F201T30AG	
1	0.9111	0.0854	13.5	1.2789	0.0762	18.4
2	0.8154	0.0793	12.2	1.1559	0.0587	16.5
3	1.0084	0.1249	15.4	1.2394	0.0869	18.0
4	0.8367	0.0923	12.6	1.4414	0.0830	20.7
FY						
		2F201T20SA			2F201T30SA	
1	MEDIAS	ESPECTRO	TOTAL	MEDIAS	ESPECTRO	TOTAL

2	0.0641	0.0085	1.48	0.1296	0.0061	2.76
3	0.0487	0.0055	1.10	0.1194	0.0060	2.55
4	0.0633	0.0038	1.36	0.1093	0.0049	2.32
	0.0806	0.0043	1.73	0.1808	0.0148	3.98
1		2F201T20SA			2F201T30SA	
2	0.1074	0.0077	2.34	0.0243	0.0253	1.01
3	0.0960	0.0057	2.07	0.0585	0.0251	1.70
4	0.1040	0.0136	2.39	0.0610	0.0109	1.46
	0.1269	0.0074	2.73	0.0868	0.0175	2.12
1		2F201T20SA			2F201T30SA	
2	0.0142	0.0138	0.57	0.0556	0.0093	1.32
3	0.0352	0.014	1.00	0.0537	0.0078	1.25
4	0.0304	0.0198	1.02	0.0789	0.0112	1.83
	0.0408	0.0237	1.31	0.0857	0.0140	2.03

MOMENTO						
1	2F201T20SA			2F201T30SA		
2	MEDIAS	ESPECTRO	TOTAL	MEDIAS	ESPECTRO	TOTAL
3	0.2393	0.0281	1.17	0.6566	0.0361	3.03
4	0.2066	0.0187	0.99	0.6088	0.0331	2.81
	0.2931	0.0185	1.36	0.5814	0.0368	2.70
1	0.3565	0.0313	1.70	0.7976	0.1056	3.95
2	2F201T20SA			2F201T30SA		
3	0.8614	0.0719	4.08	0.8614	0.0719	4.08
4	0.9849	0.0637	4.59	0.9849	0.0637	4.59
	0.8530	0.0736	4.05	0.853	0.0736	4.05
1	1.0167	0.0974	4.87	1.0667	0.1316	5.24
2	2F201T20SA			2F201T30SA		
3	0.7929	0.0517	3.69	1.0527	0.0703	4.91
4	0.7059	0.0606	3.35	0.9815	0.0498	4.51
	0.7601	0.0536	3.56	1.0116	0.0717	4.74
	0.7557	0.1016	3.75	1.1650	0.0893	5.49

**En el cuadro (6.2) Se muestran los valores de las corridas hechas en campo y las distancias a las que se tomaron las muestras de profundidades.**

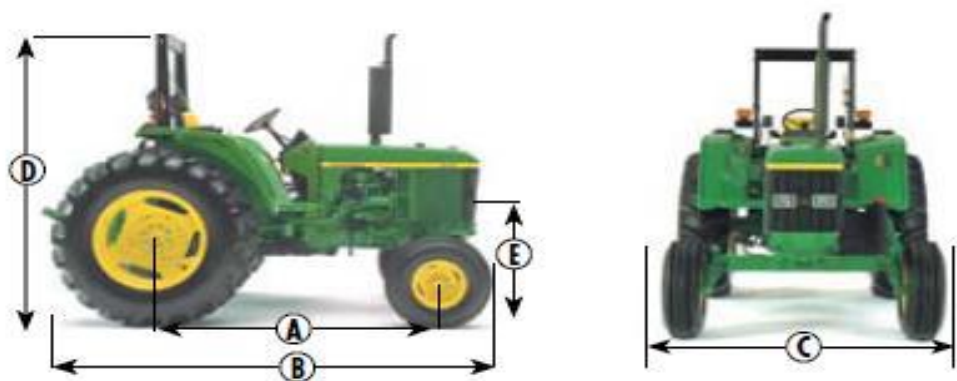
corridas	2F201T20AG						
Dist. (m)	10	20	20	20	20	10	P
R1 (cm)	18	20	19	21.5	20	21	19.92
R2 (cm)	19	21	19.5	21	20	20	20.08
R3 (cm)	18	20	19	20	22	18	19.50
R4 (cm)	20.5	20	21.5	20	20	19	20.17
						total	19.92
corridas	2F201T20AM						
Dist. (m)	10	20	20	20	20	10	P
R1 (cm)	20	21.5	21	22	20	21	20.92
R2 (cm)	19.5	20	20	21	19.5	22	20.33
R3 (cm)	21	22	20	22.5	18	21.5	20.83
R4 (cm)	20	21	19.5	21	20	23	20.75
						total	20.71
corridas	2F201T20SA						
Dist. (m)	10	20	20	20	20	10	medias
R1 (cm)	20	17	19.5	23	22.5	21.5	20.40
R2 (cm)	20	18.5	20	19	22	20.5	19.90
R3 (cm)	21	21.5	21	21	20	20	20.90
R4 (cm)	21	21	19	21.5	20	19.5	20.50
						total	20.43
corridas	2F201T30SA						
Distancias (m)	10	20	20	20	20	10	P
R1 (cm)	30	29.5	31.5	32	30	29	30.33
R2 (cm)	30	29	28	30	29	31	29.50
R3 (cm)	28	29	31	28	29	30	29.16
R4 (cm)	30	28.5	30	32	29	30	29.91
						total	29.73
corridas	2F201T30AM						
Distancias (m)	10	20	20	20	20	10	P
R1 (cm)	29	30	28	29.5	30	29	29.25
R2 (cm)	27	28	29	30	31	30	29.16
R3 (cm)	29	28.5	31	29.5	28	30	29.33
R4 (cm)	29.5	30	32	30	28.5	29	29.83
						total	29.40
corridas	2cf201ct30AG						
Distancias (m)	10	20	20	20	20	10	P
R1 (cm)	25	26	27	27	27.5	27	26.58
R2 (cm)	28.5	29	28	29	30	31	29.25
R3 (cm)	29	27	28.5	29	30	28	28.58
R4 (cm)							
						total	28.14

**6.3. especificaciones y características del tractor utilizado en monitoreo de campo con el transductor octagonal extendido.**

**Especificaciones Tractor 6403 de John Deere**

<b>MOTOR</b>	
Potencia a las rpm nominales - HP (kW)	106 (78)
Velocidad nominal del motor - rpm	2100
Par máximo - N.m	359 @ 2100 rpm
Cilindros, Aspiración	4, Turbo
Cilindrada - L (in <sup>2</sup> )	4.5 (276)
Relación de compresión	17.0:1
Bombas de inyección	Rotativa
<b>TRANSMISIÓN</b>	
Estándar	Sincronizada
Velocidades	9 avance / 3 reversa
<b>EMBRAGUE</b>	
Tipo	Seco
Material	Ceramético
Diámetro - mm (in)	305 (12)
<b>TOMA DE FUERZA</b>	
Potencia máxima a la TDF - Hp	95.7
Tipo	Independiente
Velocidad - rpm	540/1000
<b>SISTEMA HIDRÁULICO</b>	
Tipo de circuito	Centro abierto
Tipo de bomba	De engranaje externo
Caudal de la bomba - L/min	66.62
Presión máxima al implemento - MPa (lb/in <sup>2</sup> )	19.5 (2830)
Capacidad de levante - Kgf a 610 mm al 90 %	3150
Sensibilidad del sistema	Brazos inferiores
Categoría de enganche	II
Válvula de control selectivo	1 (2a opcional)
<b>DIRECCIÓN</b>	
Tipo	Hidrostática
<b>EJE TRASERO</b>	
Traba del diferencial	Mecánica por pedal
Frenos tipo	Bañados en aceite
Accionamiento	Mecánico
<b>SITEMA ELÉCTRICO</b>	
Alternador - A	75

Motor de arranque Hp (kW)	4.2 (3.1)
<b>CAPACIDADES</b>	
Tanque de combustible - L	158
Sistema de enfriamiento - L	13.5
Aceite de motor - L	12
Aceite de transmisión, diferencial y sistema hidráulico - L	58
<b>CAPACIDADES</b>	
A = Distancia entre ejes DT - mm (in)	2310 (91)
B = Largo (sin enganche ni contrapesos delanteros) - mm(in)	4010 (158)
Rango de trocha delantera - mm	1310 a 1930
C = Rango de trocha trasera - mm	1490 a 1800
D = Altura a la parte superior del ROPS - mm (in)	2639 (104)
E = Despeje mínimo al suelo - mm (in)	457 (18)
Peso aproximado de embarque (TS/DT) - kg	3590/3870
<b>RODADES</b>	
Delantero estándar (TS/DT)	10.0-16/13.6-24
Trasero estándar	18.4 - 34
Delantero opcional (DT)	14.9 - 24
Trasero opcional	18.4 - 38
	16.9 - 38



**Figura 6.7.** Dimensiones del tractor John Deere 6403.

<b>Velocidades de Avance @ 2,400 rpm (Km/h) Para todos los modelos de las Serie 6003</b>												
Rodado	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	R1	R2	R3
18.4-34	2.8	3.9	5.0	6.6	9.2	11.8	16.0	22.0	28.3	4.7	11.1	26.6
18.4-38	3.0	4.2	5.3	7.1	9.8	12.6	17.0	23.5	30.2	5.0	11.8	28.3

**Cuadro 6.3.** Velocidades de avance del tractor.

#### 6.4. Características del implemento de cinceles utilizado para las pruebas en campo.

El implemento usado en los monitoreos de campo, es un prototipo articulado, que es controlado por una válvula, que regula el flujo de aceite hidráulico para que el implemento articulado pueda subir o bajar la parte trasera, de forma regular con sus actuadores como se puede apreciar en la figura 5.7. (a) y (b)



**Figura 6.8.** (a) Prototipo articulado.



**Figura 6.8.** Prototipo Articulado (b).

## 6.5. Programa utilizado para los análisis espectrales en Matlab

```
p=path;
incpath=( [...
'c:\edml\data\dcon',...
';c:\edml\data\ddob',...
';c:\edml\data\dgot',...
';c:\edml\data\dlgd',...
';c:\edml\data\dlich',...
';c:\edml\data\dlig',...
';c:\edml\data\dmdd',...
';c:\edml\data\dmue',...
';c:\edml\data\dond',...
';c:\edml\data\cincel',...
]);

path(p,incpath);

clear
clc
file=input('Nombre de archivo de datos sin extension : ','s');
filename=[file '.dat'];
eval(['load ' filename]);
disp('Listo, archivo cargado')
x=eval(file);
v=x(:,1);
h=x(:,2);
z=x(:,3);

pas=input('Numero de corrida (1/4) : ','s');
disco=input('Titulo para las graficas : ','s');
cv=[' Comp. Vert.' pas];
ch=[' Comp. Horiz.' pas];
cz=[' Comp. Vert.' pas];

disp('Trabajando con columna 1...')
titulo=[disco cv ];
plot(v, '-r');title(titulo);xlabel('Numero de
muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
dv=input('Desplazamiento del inicio de valores con respecto a cero :
');
v=v-dv;
signo=input('Multiplicar por -1 o por 1 : ');
v=v*signo;
disp('En este momento se graficarán los datos ajustados...Pulsa una
tecla...')
pause
plot(v, '-r');title(titulo);xlabel('Numero de
muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
ini=input('Posición inicial para el análisis :');
fin=input('Posición final para el análisis :');
v=v(ini:fin);
medial=mean(v);
disp('La media del segmento de datos es: ');disp(medial)
disp('Este valor será restado para desplazar los datos hacia el cero')
disp('Pulsa una tecla...')
pause
```

```

v=v-medial;
plot(v, '-r');title(titulo);xlabel('Numero de
muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
disp('Ahora se obtendran las magnitudes y frecuencias
correspondientes.')
disp('Esto puede tardar un poco. Pulsa una tecla...')
pause
Pn1=(abs(fft(v))*2)/length(v);
f=(272/length(v))*(0:length(v)/2);
plot(f,Pn1(1:length(f)),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia
(Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
disp('Si no se aprecian los valores, definir un rango entre 1 y el
siguiente valor : ');disp(length(f))
resp=input('¿ Definir nuevo rango (s/n) ? ','s');
if resp=='s'
ok=1;
while ok==1
a=input('Valor inicial : ');
b=input('Valor final : ');
plot(f(a:b),Pn1(a:b),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia
(Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
resp=input('¿ Definir un nuevo rango (s/n)?','s');
ok=strcmp('s',resp);
end
end

maxpn1=max(Pn1);
disp('El valor máximo para Pn es : ');disp(maxpn1)
disp('A continuación, se analizará la columna 2. Pulsa una tecla...')

pause

disp('Trabajando con la columna 2...')

titulo=[disco ch];
plot(h, '-r');title(titulo);xlabel('Numero de
muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
dh=input('Desplazamiento del inicio de valores con respecto a cero :
');
h=h-dh;
signo=input('Multiplicar por -1 o por 1 : ');
h=h*signo;
disp('En este momento se graficarán los datos ajustados...Pulsa una
tecla...')
pause
plot(h, '-r');title(titulo);xlabel('Numero de
muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
ini=input('Posición inicial para el análisis :');
fin=input('Posición final para el análisis :');
h=h(ini:fin);
media2=mean(h);
disp('La media del segmento de datos es : ');disp(media2)
disp('Este valor será restado para desplazar los datos hacia el cero')
disp('Pulsa una tecla...')
pause
h=h-media2;
plot(h, '-r');title(titulo);xlabel('Numero de
muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on

```



```

disp('Ahora se obtendran las magnitudes y frecuencias
correspondientes.')
disp('Esto puede tardar un poco. Pulsa una tecla...')
pause
Pn2=(abs(fft(h))*2)/length(h);
f=(272/length(h))*(0:length(h)/2);
plot(f,Pn2(1:length(f)),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia
(Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
disp('Si no se aprecian los valores, definir un rango entre 1 y el
siguiente valor : ');disp(length(f))
resp=input('¿ Definir nuevo rango (s/n) ? ','s');
if resp=='s'
ok=1;
while ok==1
a=input('valor inicial : ');
b=input('valor final : ');
plot(f(a:b),Pn2(a:b),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia
(Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
resp=input('¿ Definir un nuevo rango (s/n)?','s');
ok=strcmp('s',resp);
end
end

maxpn2=max(Pn2);
disp('El valor máximo para Pn es : ');disp(maxpn2)
disp('A continuación, se analizará la columna 3. Pulsa una tecla...')

pause

disp('Trabajando con la columna 3...')

titulo=[disco cz];
plot(z,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de
muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
dz=input('Desplazamiento del inicio de valores con respecto a cero :
');
z=z-dz;
signo=input('Multiplicar por -1 o por 1 : ');
z=z*signo;
disp('En este momento se graficarán los datos ajustados...Pulsa una
tecla...')
pause
plot(z,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de
muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
ini=input('Posición inicial para el análisis : ');
fin=input('Posición final para el análisis : ');
z=z(ini:fin);
media3=mean(z);
disp('La media del segmento de datos es : ');disp(media3)
disp('Este valor será restado para desplazar los datos hacia el cero')
disp('Pulsa una tecla...')
pause
z=z-media3;
plot(z,'-r');title(titulo);xlabel('Numero de
muestra');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
disp('Ahora se obtendran las magnitudes y frecuencias
correspondientes.')
disp('Esto puede tardar un poco. Pulsa una tecla...')
pause

```

```

Pn3=(abs(fft(z))*2)/length(z);
f=(272/length(z))*(0:length(z)/2);
plot(f,Pn3(1:length(f)),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia
(Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
disp('Si no se aprecian los valores, definir un rango entre 1 y el
siguiente valor : ');disp(length(f))
resp=input('% Definir nuevo rango (s/n) ? ','s');
if resp=='s'
ok=1;
while ok==1
a=input('valor inicial : ');
b=input('valor final : ');
plot(f(a:b),Pn3(a:b),'-r');title(titulo);xlabel('Frecuencia
(Hz)');ylabel('Magnitud en Volts');grid on;zoom on
resp=input('% Definir un nuevo rango (s/n)?','s');
ok=strcmp('s',resp);
end
end

maxpn3=max(Pn3);
disp('El valor máximo para Pn es : ');disp(maxpn3)

pause
disp('valores de las medias ')
disp(media1)
disp(media2)
disp(media3)

pause
disp('valores del espectro ')
disp(maxpn1)
disp(maxpn2)
disp(maxpn3)

pause
disp('Análisis terminado')

```