

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CARGA PARA UN SISTEMA
DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE CRUDO DE CAMPO ESCUELA
COLORADO.**

DARWIN MAURICIO PARDO SANTAMARIA

DIEGO ANTONIO RUIZ SALAMANCA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2013

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CARGA PARA UN SISTEMA DE
LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE CRUDO DE CAMPO ESCUELA COLORADO.**

DARWIN MAURICIO PARDO SANTAMARIA

DIEGO ANTONIO RUIZ SALAMANCA

Trabajo de grado para optar al título de

INGENIERO MECÁNICO

Director

JORGE ENRIQUE MENESES

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2013

DEDICATORIA

A Dios,

Porque siempre ha estado a mi lado amparándome.

A mi madre,

Por su inquebrantable fe en la superación de su hijo.

A mi padre,

Por sus consejos, palabras y apoyo incondicional.

A mis hermanos

Porque representan parte fundamental en la formación de mi vida.

A mi novia, Karine,

Por su comprensión, apoyo y amor en todo momento.

Diego Antonio Ruiz Salamanca

DEDICATORIA

A Dios,

Por esta gran oportunidad.

A mi madre y a mi padre,

Por su Fe, consejos, palabras y apoyo incondicional.

A mis Familiares,

Por infundir valores como respeto, ética, perseverancia y humildad, esenciales para alcanzar esta gran meta.

A mi novia, Johanna,

Por su comprensión, apoyo y amor en todo momento.

Darwin Mauricio Pardo Santamaría

AGRADECIMIENTOS

A todos nuestros familiares porque siempre estuvieron apoyándonos en las decisiones que tomamos.

A nuestro director de proyecto de grado, el ingeniero Jorge Enrique Meneses y Alfredo Acevedo quienes mantuvieron su constante apoyo y nos brindaron veraces consejos durante el desarrollo del proyecto.

A los profesores y a la Escuela de Ingeniería Mecánica quienes nos llevaron a formar como ingenieros mecánicos.

A todos nuestros amigos de la carrera que nos acompañaron y nos enseñaron mucho en nuestra formación.

Darwin Mauricio Pardo Santamaría

Diego Antonio Ruiz Salamanca

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	23
1. IMPORTACIAS Y OBJETIVOS DEL PROYECTO	26
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	26
1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	28
1.3 OBJETIVOS.....	29
1.4 Objetivos generales	29
1.5 Objetivos específicos.....	30
2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CARGA PARA UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE CRUDO DE CAMPO ESCUELA COLORADO.	31
2.1 INTRODUCCIÓN AL BOMBEO MECÁNICO.....	31
2.2 CELDA DE CARGA	34
2.3 STRAIN GAGES.....	36
2.4 LOCELL SOFT	37
2.5 BANCO DE PRUEBAS ESTÁTICAS DE 10.000 LB.....	39
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DE CARGA.....	41
3.1 GEOMETRÍA DE LA CELDA DE CARGA	43
3.1.1 Estructura Tipo Columna.....	43
3.1.2 Dimensiones de la Celda limitadas por el montaje.....	44
3.2 MATERIAL DE LA CELDA DE CARGA.....	46
3.2.1 Acero SAE 1045.....	48
3.2.2 Acero SAE 4340.....	49
3.2.3 Alumold 500	49
3.2.4 Acero Inoxidable AISI 420.....	49
3.2.5 Propiedades mecánicas del material, corroboración con MTS 810 ...	50
3.3 DISEÑO POR CARGA ESTÁTICA	57

3.3.1	Diseño por partes.....	59
3.4	DISEÑO POR CARGA DINÁMICA (FATIGA).....	70
3.4.1	Fatiga en ciclos altos.....	70
3.4.2	Límite de resistencia a la fatiga.....	71
3.4.3	Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga.	72
3.4.4	Concentradores de Esfuerzos.....	77
3.4.5	Diagramas S-N.....	78
3.4.5	Diagrama de Goodman Modificado.....	80
3.5	DISEÑO DE LA CARCASA DE LA CELDA DE CARGA.....	83
3.5.1	Celda de carga.....	86
3.5.2	Carcasa.....	86
3.5.3	Oring.	89
3.5.4	Soporte del Integrado.....	91
3.5.5	Tapa del integrado.	92
3.6	DISEÑO DE ANILLOS.....	94
3.6.1	Anillos centradores.....	97
3.6.2	Anillos Niveladores.....	98
3.7	CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DE CARGA.....	99
4.	LOCCELL SOFT - SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE CELDA DE CARGA. 102	
4.1	DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE.....	104
4.1.1	Datos de la Celda.....	104
4.1.2	Resultados a fatiga.....	107
4.1.3	Plano. Dimensiones de la Celda de Carga.....	109
4.1.4	Dibujo proporcionado de la Celda de Carga.	110
4.1.5	Resultados Estricción.....	110
4.1.6	Resultados base.....	112
4.1.7	Resultados Reducción.	113
4.1.8	Gráfica esfuerzo alterno-esfuerzo medio (.....	114
4.1.9	Resistencia a fatiga – ciclos de vida.....	115

5.	GALGAS EXTENSIOMETRICAS.....	117
5.1	COMPONENTES DE UNA GALGA EXTENSIOMÉTRICA.....	118
5.2	FACTOR DE GALGA.....	118
5.3	GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS ADHERIDAS A MATERIALES.....	119
5.4	COMPENSACIÓN DE EFECTOS TÉRMICOS.....	120
5.5	ACONDICIONAMIENTO DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS FUENTE DE WHEATSTONE.....	122
5.5.1	puente de 1 galga.....	122
5.5.2	Puente de 2 galgas	123
5.5.3	Puente de 4 Galgas.....	123
5.5.4	Galgas en el puente.	124
5.6	SELECCIÓN DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS.....	125
5.6.1	Tipo de aplicación de la galga.....	126
5.6.2	Tipo de transductor (transductor tipo columna).....	127
5.6.3	Tipo de galgas bidireccionales- unidireccionales.	128
5.6.4	Tamaño de la galga.....	130
5.6.5	Serie de la galga.	131
5.6.6	Opciones encapsulación de la galga.....	135
5.6.7	Resistencia.....	135
5.6.8	Numero STC.	136
5.7	BANCO DE PEGADO DE GALGAS.....	138
5.7.1	banco de pegado de galgas.....	138
5.8	KIT DE PEGADO DE STRAIN GAGES	141
5.9	PEGADO DE STRAIN GAGES EN CELDA DE CARGA	142
5.9.1	Preparación de la superficie.....	143
5.9.2	Preparación de la Galga:.....	147
5.9.3	Preparado de pegante M-bond AE15 para galgas:	149
5.9.4	Pegado de Strain Gages:	151
5.9.5	Curado de la celda de carga:	152
5.9.6	Armado de puente Wheatstone y Soldado de cables.....	153

6.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ESTÁTICO DE 10.000 LB.....	157
6.1	PARTES DEL BANCO DE PRUEBAS, PARTE ESTRUCTURAL	159
6.1.1	Bastidor del banco.....	159
6.1.2	Ensamble base.....	160
6.1.3	Rotulas	161
6.1.4	Celda de Carga Tipo S.....	161
6.1.5	Barra Pulida	164
6.1.6	Grapa.	165
6.1.7	Celda de carga a compresión.	166
6.1.8	Cilindros hidráulicos Enerpac.....	167
6.1.9	Tornillos de sujeción.....	168
6.2	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE BANCO DE 10.000 LB ...	169
6.2.1	Chassis NI cDAQ-9147.	169
6.2.2	Módulo NI9237.....	170
6.2.1	Programa de adquisición de datos	172
6.2.4	Interfaz Gráfica del programa Labview.....	174
6.2.5	Adquisición de datos.	177
6.2.6	CREEP.....	177
6.2.7	Pruebas Creep Compensation	179
7.	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	185
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	187
8.1	CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA DE CARGA.....	187
8.2	NÚMERO DE PRUEBAS Y CONFIABILIDAD.	195
8.3	SELECCIÓN DE LAS ECUACIONES CARCATERIZADAS DE LA CELDA DE CARGA.	198
8.4	INTERVALO DE MEDICIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN PARA LA CELDA DE CARGA TIPO COLUMNA.....	200
8.5	DATOS DE LA CELDA DE CARGA TIPO COLUMNA.	203
9.	CONCLUSIONES	204

BIBLIOGRAFÍA.....207
ANEXOS209

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Pozo 74, campo escuela colorado.	26
Figura 2. Sistema de Bombeo mecánico.....	31
Figura 3. Dinagrama.....	32
Figura 4. Ubicación celda de carga.	33
Figura 5. Celda de carga	35
Figura 6. Celdas de carga y carcasa.....	36
Figura 7. Ubicación celda de carga.	37
Figura 8. Locell Soft.	38
Figura 9. Banco de pruebas estáticas de 10.000 lb.	39
Figura 10. Distribución de esfuerzos en la celda.....	44
Figura 11. Montaje Porta varillas y grapa.....	45
Figura 12. Dimensiones de la celda.	46
Figura 13. Prototipo de celda de carga.	49
Figura 14. Máquina de ensayos universales MTS 810.....	50
Figura 15. Probetas para pruebas de tensión.	51
Figura 16. Torno CNC	52
Figura 17. Corte longitudinal barra de acero para fabricación de probetas.....	52
Figura 18. Montaje probetas en MTS 810	53
Figura 19. Extensómetro MTS 810.....	54
Figura 20. Falla de probetas.....	54
Figura 21. Gráficos de esfuerzo-deformación para acero AISI 420.....	55
Figura 22. Barra sometida a tensión.	57
Figura 23. Diagrama Esfuerzo – Deformación unitaria.....	59
Figura 24. Tipos de Apoyo	67
Figura 25. Diagrama S-N	72
Figura 26. Esfuerzos fluctuantes a tensión.	74
Figura 27. Factores de modificación de acabado superficial.....	75
Figura 28. Línea de flujo de fuerzas en un eje sometido a tensión.	77
Figura 29. Diagrama S-N	79
Figura 30. Diagrama de Goodman modificado.....	80
Figura 31. Diagrama de Goodman modificado.....	82
Figura 32. Dimensiones de la celda de carga AISI 420.....	83
Figura 33. Vista ensamble celda de carga.	84
Figura 34. Vista explosionada ensamble celda-carcasa.	85

Figura 35.	Geometría de la Celda.	86
Figura 36.	Carcasa.....	87
Figura 37.	Vista en corte ensamble de carcasa y celda de carga	88
Figura 38.	Alojamiento y especificaciones del Oring	90
Figura 39.	Sello de vástago – deformación radial	91
Figura 40.	Soporte del Integrado.....	92
Figura 41.	Tapa del Integrado.	92
Figura 42.	Corte carcasa y tapa del circuito	93
Figura 43.	Aplicación de una carga Excéntrica	94
Figura 44.	Celda de carga en rozamiento con la barra pulida	95
Figura 45.	Ensamble Celda con anillos niveladores y centradores	96
Figura 46.	Anillo centrador.	97
Figura 47.	Anillo nivelador.....	98
Figura 48.	Adaptación del anillo nivelador a superficies inclinadas.....	98
Figura 49.	Transmisión de la fuerza a través de Anillos niveladores.....	99
Figura 50.	Parte de mecanizado en torno convencional de la celda.	100
Figura 51.	Manguito para montaje de celda en torno CNC	100
Figura 52.	Mecanizado de celda de carga en torno CNC.....	101
Figura 53.	Software para cálculo de celda de carga	103
Figura 54.	Datos de entrada de la Celda de Carga.	105
Figura 55.	Resultados del diseño a fatiga.	108
Figura 56.	Dimensiones de la Celda.	109
Figura 57.	Dibujo Proporcionado de la Celda.....	110
Figura 58.	Resultados Estricción.....	111
Figura 59.	Resultados Base.	113
Figura 60.	Resultados Reducción	114
Figura 61.	Gráfica Esfuerzo alterno-Esfuerzo medio.....	115
Figura 62.	Gráfica resistencia a fatiga –ciclos de vida.	116
Figura 63.	Partes que componen la galga.....	117
Figura 64.	Alargamiento de una barra en tensión.	119
Figura 65.	Sensor de tensión con galgas extensiométricas.	121
Figura 66.	Puente de Wheatstone.....	122
Figura 67.	Puente de Wheatstone; una galga.	123
Figura 68.	Puente de Wheatstone; dos galgas.....	123
Figura 69.	Puente de Wheatstone; cuatro galgas.	124
Figura 70.	Puente de Wheatstone; cuatro galgas.	125
Figura 71.	Catálogo transducer-class Strain Gages, de vishay.....	127
Figura 72.	Ejemplos de Strain gages para transductores tipo Columna.....	127
Figura 73.	Galgas para transductor; dobles y sencillas.....	128

Figura 74.	Celda de carga con galgas sencillas.....	129
Figura 75.	Celda de carga con galgas dobles a 90°.....	130
Figura 76.	Datos de tamaño de la galga.....	131
Figura 77.	Designación de la galga en catálogo.....	134
Figura 78.	Designación de la galga.....	134
Figura 79.	Opción de la galga.....	135
Figura 80.	Galgas seleccionadas.....	137
Figura 81.	Celda de carga con galgas biaxiales (90°).....	137
Figura 82.	Banco de pegado de galgas.....	138
Figura 83.	Sistema de montaje y medidor de ángulos de 90°.....	139
Figura 84.	Sistema laser.....	140
Figura 85.	Kit de pegado de strain gages TAK-610.....	142
Figura 86.	Montaje de la celda de carga en banco de pegado.....	143
Figura 87.	Desengrasante CSM-2.....	144
Figura 88.	Lija 200-grit silicon carbide.....	144
Figura 89.	Acondicionador A.....	145
Figura 90.	Marcado con sistema laser.....	146
Figura 91.	Neutralizador 5A.....	147
Figura 92.	Galgas en su empaque.....	148
Figura 93.	Galga pegada en la cinta sobre el vidrio.....	148
Figura 94.	Pegante M-bond AE15.....	149
Figura 95.	Pesaje y mezclado de los adhesivos.....	150
Figura 96.	Aplicación del adhesivo para el pegado de la galga.....	151
Figura 97.	Celda de carga preparada para el curado.....	152
Figura 98.	Celdas de carga en horno eléctrico.....	153
Figura 99.	Celda lista para Soldar armado de puente de Wheatstone.....	154
Figura 100.	Armado de puente de Wheatstone en celda de carga.....	155
Figura 101.	Celda de carga terminada.....	156
Figura 102.	Banco de Pruebas Estático.....	157
Figura 103.	Principio de funcionamiento del banco de pruebas.....	158
Figura 104.	Partes Banco de Pruebas.....	159
Figura 105.	Marco del banco de pruebas.....	160
Figura 106.	Ensamble de celda tipo S.....	161
Figura 107.	Celda de carga tipo S.....	162
Figura 108.	Celda de carga montada en MTS 810.....	163
Figura 109.	Comparación valores de carga MTS 810 vs Tipo S.....	164
Figura 110.	Barra pulida.....	165
Figura 111.	Grapa.....	165
Figura 112.	Montaje de Celda de carga de compresión y grapa.....	166

Figura 113.	Bomba manual sistema Enerpac.	167
Figura 114.	Cilindros Enerpac.....	168
Figura 115.	Tornillos de sujeción.	169
Figura 116.	Chassis NI cDAQ-9174.....	170
Figura 117.	Módulo NI9237.....	171
Figura 118.	Adaptador	171
Figura 119.	Diagrama de bloques de programación.	173
Figura 120.	Programación sistema de adquisición de datos labview.....	173
Figura 121.	Interfaz gráfica de programa de adquisición de datos.	176
Figura 122.	Sistema de Adquisición de datos y banco de pruebas.....	177
Figura 123.	Creep	178
Figura 124.	Prueba 6 mV-tiempo	180
Figura 125.	Prueba 6 mV-tiempo 13 sep 3 celdas	181
Figura 126.	Prueba 5 mV-tiempo	182
Figura 127.	Prueba 8 mV-tiempo 12 septiembre	183
Figura 128.	Prueba mV-tiempo	184
Figura 129.	Tarjeta de adquisición de datos	186
Figura 130.	Montaje de celda de carga tipo s y tipo columna.	188
Figura 131.	Gráfica mV- Carga	189
Figura 132.	Curva de mediciones Celda tipo S.....	192
Figura 133.	Curva de ecuación caracterizada.....	192
Figura 134.	Línea recta de sección 2.....	193
Figura 135.	Ecuación de Línea caracterizada- sección 2.....	194

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Comparación módulo de elasticidad real vs teórico	56
Tabla 2. Comparación Límite de fluencia real vs teórico	56
Tabla 3. Diferentes diámetros para la geometría de la celda en AISI 420.....	62
Tabla 4. Diferentes diámetros para la geometría de la celda en SAE 1045	63
Tabla 5. Diferentes diámetros para la geometría de la celda en SAE 4340.	64
Tabla 6. Diferentes diámetros para la geometría de la celda en Alumold 500	65
Tabla 7. Tipos de Apoyo.....	68
Tabla 8. Factores de confiabilidad.....	76
Tabla 9. Diseño de alojamiento de Oring	90
Tabla 10. Característica de la celda tipo S.....	161
Tabla 11. Características Sistema Hidráulico Enerpac.	167
Tabla 12. Comparación curva caracterizada.....	190
Tabla 13. Tabla de distribución normal.	196
Tabla 14. Desviación Estándar de 20 pruebas.....	197
Tabla 15. Tabla de comparación de errores de cada ecuación.....	199
Tabla 16. Clase de precisión según número de intervalos de verificación.....	203

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A: Galgas Extensiométricas	210
Anexo B. Fundamentación Teórica de Bombeo Mecánico y Dinagramas	222
Anexo C. Diseño Estático y Dinámico.....	230
Anexo D. Tablas de Selección de Strain Gages	248
Anexo E. Planos Probetas Para Ensayos MTS 810	251
Anexo F. Planos Celda de Carga.....	253
Anexo G. Planos Banco de Pruebas Estático 10.000 lb	262

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CARGA PARA UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE CRUDO DE CAMPO ESCUELA COLORADO.*

AUTORES: PARDO SANTAMARIA Darwin Mauricio,
RUIZ SALAMANCA Diego Antonio.**

PALABRAS CLAVES: Celda de carga, banco de pruebas estático, Software diseño de celda, galgas extensiométricas.

DESCRIPCIÓN

Actualmente la industria requiere profesionales altamente eficientes y productivos enfocados al diseño, generando nuevas ideas para el mejoramiento de la calidad de vida. En busca del propósito de contribuir al desarrollo de nuevas ideas se necesita crear un producto que cumpla con los requerimientos exigidos a plena cabalidad dando un gran aporte a un proyecto de gran envergadura, pozo inteligente, el cual busca obtener información de calidad que permita su manipulación para la optimización de la producción de crudo. Para esto se empezó por desarrollar la celda de carga basada en galgas extensiométricas, la cual permite adquirir toda la información de un sistema de levantamiento artificial de crudo para su posterior manipulación; dicha celda de carga está diseñada a partir de las características específicas del pozo 74 de Campo Escuela Colorado, además para caracterizarla y probarla se desarrolló un banco de pruebas estático que simula la forma en que será cargada la celda cuando esté instalada en un sistema de bombeo mecánico, para mejorar el montaje se desarrolló un sistema que permite nivelar y centrar la celda, la celda de carga cuenta con un sistema de adquisición de datos que debe estar aislado de las condiciones ambientales por tal razón se construyó una carcasa hermética, dicho sistema se alimenta a través de paneles solares y comunicación inalámbrica a una estación de trabajo.

* Proyecto de Grado

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director. Jorge Enrique Meneses. Ingeniero Mecánico.

SUMMARY

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A LOAD CELL FOR AN ARTIFICIAL LIFT SYSTEM CRUDE OF CAMPO ESCUELA COLORADO.*

AUTHORS: PARDO SANTAMARIA Darwin Mauricio,
RUIZ SALAMANCA Diego Antonio.**

KEY WORDS: Load cell, static testing bench, Cell Design Software, strain gauges.

DESCRIPTION

Currently the industry requires highly efficient and productive professionals focused on design, generating new ideas for improving the quality of life, looking for the purpose of contributing to the development of new ideas is needed to create a product that meets the requirements set forth in full fully giving a great contribution to a major project, well smart, which is seeking quality information that allows handling for optimizing oil production, to achieve a well smart begins to develop load cell based on strain gauges, which will acquire all the information of a lift system oil for further manipulation; this load cell is designed based on the specific characteristics of hole 74 of Campo Escuela Colorado, also will be tested and it will develop a static test bench that simulates how the cell will be loaded when installed in a mechanical pumping system. A contrast will be given in the universal testing machine MTS 810 civil engineering school of the Universidad Industrial de Santander, allowing this to calibrate the test cell, to improve the assembly developed a system to level and center the cell, Load cell has a data acquisition system must be isolated from environmental conditions for that reason we built a sealed enclosure, the system is powered through solar panels and wireless communication to a workstation.

* Graduation Project

** Industrial University of Santander. Faculty of Physical Engineering – Mechanical. School of Mechanical Engineering. Director. Jorge Enrique Meneses. Mechanical Engineer.

INTRODUCCIÓN

La automatización ha traído a la industria enormes beneficios en cuanto a eficiencia, producción, economía, etc. haciendo que cada día sea más común usarla en cualquier ámbito industrial.

Con un proyecto de la magnitud que tiene Desarrollo de un prototipo de pozo inteligente para Campo Escuela Colorado – FASE 1 – 8586 – Financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander y en conjunto con Campo Escuela Colorado, se abre la posibilidad de generar varios proyectos de investigación, diseño y construcción de hardware y software, en el cual hace parte este proyecto de grado. Buscando identificar con precisión y rapidez los problemas (fallas) en un pozo, con el fin de disminuir el riesgo operacional y mejorar la producción, incorporando un sistema automático que reconozca los patrones de falla del sistema de bombeo mecánico, es necesario tener una herramienta para adquirir toda la información del pozo mientras este está en funcionamiento, de esta manera se diseñó y construyó una celda de carga.

Con el propósito de innovar en el desarrollo de tecnologías, que en nuestro país no se han explorado desde ningún punto de vista creando así una dependencia total de estos productos con respecto a fabricantes extranjeros, se desarrolló una celda de carga propia y de acuerdo a los requisitos de nuestro medio industrial, específicamente para un pozo de Campo Escuela Colorado. El generar una celda de carga propia proporciona cualidades que con los productos extranjeros no se tienen como son la total capacidad de manipulación de la información recolectada, celdas de carga diseñadas de acuerdo a los requerimientos específicos de cada uno de los pozos donde se quiera montar, total control en el funcionamiento y mantenimiento de la celda, etc.

La celda de carga permite adquirir la información necesaria para poder mantener el control sobre los diferentes comportamientos del pozo, es de entender que este

control de las fallas y la identificación de problemas se logran con la posterior manipulación de dicha información a través de software y hardware.

El presente libro explica de manera detallada las consideraciones usadas para el diseño y la construcción de la celda de carga. Para lograr una mejor comprensión del mismo se organizan los capítulos de la siguiente forma:

1. *Importancia y Objetivos del proyecto:* En esta sección se da a conocer la problemática tratada, la justificación de la misma y los objetivos generales y específicos que se desarrollarán en el proyecto.
2. *Diseño y construcción de una celda de carga para un sistema de levantamiento artificial de crudo de campo escuela colorado.* Presenta la idea general del proyecto mostrando los diversos desarrollos realizados a los largo del presente proyecto de manera resumida.
3. *Diseño y construcción de la celda de carga:* En este capítulo se muestran las diferentes consideraciones en el diseño de la celda de carga, tanto mecánicas como cinemáticas. Adicionalmente se muestra el modelo desarrollado y sus especificaciones técnicas.
4. *Locell Soft - Software para el diseño de la celda de carga:* En este capítulo se describe el funcionamiento del software, las prestaciones, los datos necesarios, los resultados para el diseño estático y dinámico de la celda.
5. *Galgas extensiométricas.* Se define el concepto de galga extensiométrica, se describe el proceso de selección de las galgas extensiométricas usadas y el procedimiento para el pegado en la superficie de la celda de carga.

6. *Diseño y construcción de un banco de pruebas estático de 10.000 lb.* En esta sección se describe el diseño y la construcción del banco de pruebas estático de 10.000 lb haciendo referencia a las diferentes partes incluidas durante el desarrollo del mismo para mejorar su funcionamiento. Además se describe la celda de carga de tensión usada para la contrastación con la celda de carga a compresión desarrollada. El banco está diseñado de tal forma para simular las condiciones de carga en estado estático que se presentan en un sistema de levantamiento artificial de crudo.

7. *Sistema de Adquisición de datos.* Aquí se describe el sistema que permite leer la información adquirida desarrollado por el proyecto MEDICIÓN DEL ESFUERZO MECÁNICO Y DISTANCIA DE RECORRIDO SOBRE UNA BARRA PULIDA. Se describen sus partes principales y su función dentro del sistema de adquisición de datos. La importancia de la relación con los ingenieros electrónicos del proyecto del sistema de adquisición de datos se ve reflejada en el intercambio de información para determinar algunos parámetros como el espacio en la carcasa para la tarjeta electrónica.

8. *Análisis de los resultados:* Esta sección describen las pruebas realizadas para la caracterización de la celda, la cantidad de pruebas realizadas, la selección de las ecuaciones, intervalos de medición de la celda y finalmente se especifican todos los parámetros técnicos de la celda.

9. *Conclusiones*

10. *Anexos.*

1. IMPORTACIAS Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Campo Escuela Colorado (CEC) es un Convenio Interadministrativo de Cooperación Empresarial entre la Universidad Industrial de Santander y ECOPETROL S.A. con fines Científicos y Tecnológicos, el cual tiene dentro de su misión desarrollar proyectos de investigación y apropiación tecnológica. Cabe resaltar que en CEC se encuentran perforados 75 pozos, no todos se encuentran activos pero la gran mayoría trabajan con bombeo mecánico y únicamente con la supervisión de operarios generando riesgos operacionales y en conjunto deficiencias en la producción, ya que la supervisión del operario no cubre todos los aspectos y variables con que funciona el bombeo mecánico. Además de estos problemas, el sistema de bombeo, físicamente, también se ve vulnerable a fallas en cualquiera de sus componentes por problemas que un operario no podría prever, bien sea la sarta de varillas, la bomba, el motor, la caja de engranajes, etc. y bien sea por diferentes razones como interferencias por gas, baches de arena, bajos niveles de fluido, entre otros.

Figura 1. **Pozo 74, campo escuela colorado.**



Fuente: Autores

Enmarcado en un proyecto de investigación en el que participa la escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones y mecánica que busca el desarrollo de un prototipo de pozo y campo inteligente el cual permita garantizar menores costos de operación, aumenten las tasas de producción, reduzcan los gastos de capital, aumenten las reservas, y haciendo que se pueda identificar de forma precisa y rápida problemas en un pozo por medio de un sistema automático que reconozca los patrones de falla del sistema de bombeo mecánico a partir de los dinagramas de fondo generados desde toda la información sensada en el pozo y posteriormente tratada, se requiere un desarrollo de software y hardware (sensores, actuadores, controladores) que permita la automatización generándose con esto la inteligencia del pozo donde este proyecto busca contribuir con el desarrollo de parte del hardware.

Ya que en Colombia no existe ningún desarrollo propio, la industria colombiana se ha dedicado a consumir estos paquetes de automatización proporcionados por empresas extranjeras creando así absoluta dependencia en todos sus aspectos, económica, mantenimiento, funcionamiento, etc., por tanto la necesidad radica en el diseño y la implementación de hardware y software propio que contribuya al desarrollo del concepto de pozo y campo inteligente propio.

Para esto diferentes dispositivos deben estar incluidos dentro del paquete de herramientas que permitirá el desarrollo del pozo y campo inteligente, siendo uno de los más importantes la celda de carga, que es la principal herramienta en la detección de fallas para un sistema de bombeo mecánico, esta permite sensar la carga en la barra pulida y para el cual estará enfocado este proyecto.

En búsqueda de generar nuevas alternativas de tecnologías propias de nuestro país se diseñó y construyó una celda de carga a compresión para un pozo de Campo Escuela Colorado, la cual permite adquirir toda la información del pozo mientras está en funcionamiento para luego, a partir de software y hardware, ser

tratada y manipulada en busca de un diagnóstico del pozo, además de permitir prevenir fallos del sistema de bombeo mecánico.

1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN.

El proyecto Desarrollo de un prototipo de pozo inteligente para Campo Escuela Colorado – FASE 1 – 8586 – Financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión en que está enmarcado y se desarrolla este proyecto proporciona ventajas tan importantes como permitir una reacción rápida y oportuna ante acontecimientos inesperados, mantener una operación autónoma, eficiente y continua generando el aumento en la producción, además de disminuir la necesidad de intervención humana lo cual reduciría costos de operación.

El desarrollo de los diferentes sensores necesarios para la automatización incluye la celda de carga que constituye parte fundamental en la adquisición de los datos que luego se procesaran para obtener los dinagramas de fondo. Cabe resaltar que esta misma información se puede adquirir a partir de otros sensores (variador de velocidad de motor) de forma indirecta generando incertidumbres en la medición y desechando la idea del pozo inteligente planteado. El poder tener acceso a toda la información recopilada por la celda abriría puertas a la completa manipulación de dicha información para ser transformada de la mejor manera a conocimiento.

Aunque la industria fabrica este tipo de sensores es de notar que estos son proporcionados por empresas extranjeras, creando con esto una dependencia absoluta hasta en sus especificaciones económicas que llegan a ser bastante elevadas para ser adquiridas y puestas en funcionamiento en un campo maduro como es CEC, pues el nivel de producción no permitiría un margen de utilidad que justifique su compra.

Al tener un diseño propio, la adaptabilidad que se le puede dar dependerá del pozo, por tal razón la celda se desarrollará a la medida del pozo satisfaciendo las necesidades de carga del mismo, esto permitirá que la adquisición de los datos sea más precisa dando resultados óptimos.

Aun así, siendo la primera celda de carga en desarrollarse, se busca seguir las normas que rigen su diseño y construcción como es la NTC2031, la cual está regida por la OIML R60 2000(E), la más importante.

Siendo la celda de carga una de las principales herramientas en el diagnóstico de fallas del bombeo mecánico y completamente necesaria para contribuir al desarrollo de la operación autónoma (automática), eficiente y continua del sistema, es decir, pozo y campo inteligente; se ha propuesto el diseño y construcción de una celda de carga de compresión que permite medir directamente la carga en la barra pulida basado en las condiciones específicas de operación del pozo 74 de CEC.

1.3 OBJETIVOS

1.4 Objetivos generales

- ✓ Contribuir con el objetivo de la Universidad Industrial de Santander con la generación y adecuación de conocimientos para liderar procesos de cambio por el progreso y mejor calidad de vida de la comunidad mediante el diseño y construcción de una celda de carga para una unidad de bombeo mecánico de Campo Escuela Colorado que contribuirá al proyecto de investigación de un pozo y campo inteligente.

1.5 Objetivos específicos

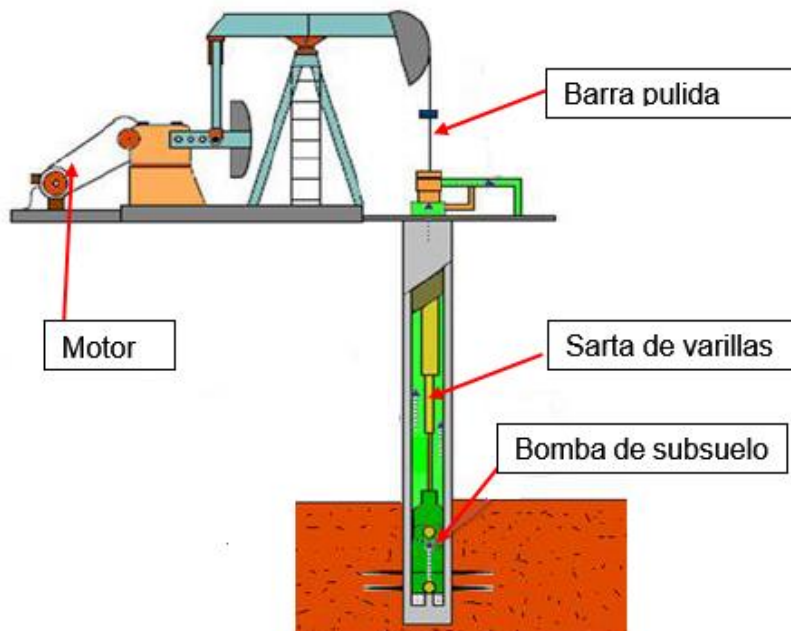
- ✓ Diseñar y construir una celda de carga de 10.000 lb a compresión, de fijación permanente y resistente a las condiciones ambientales presentes en el pozo 74 de CEC.
- ✓ Diseñar y construir un banco de pruebas de carga estática de 10.000 lb para el desarrollo de los diferentes modelos de instrumentación.
- ✓ Desarrollar los planos de construcción y ensamble de la celda de carga y banco de pruebas a través de herramientas CAD.

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CARGA PARA UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE CRUDO DE CAMPO ESCUELA COLORADO.

2.1 INTRODUCCIÓN AL BOMBEO MECÁNICO.

El bombeo mecánico es el método de levantamiento artificial más comúnmente usado en la producción de petróleo. Consiste una bomba de subsuelo de acción recíprocante (bombeo de desplazamiento positivo), y consta de una sarta de varillas conectadas a la barra pulida figura 2, que están en constante movimiento de manera vertical, de sube y baja.

Figura 2. Sistema de Bombeo mecánico.

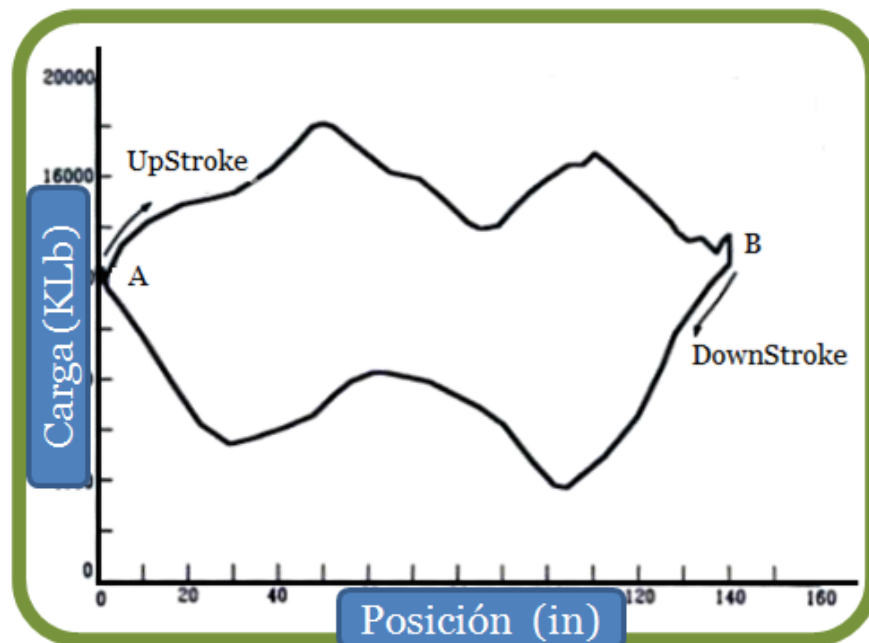


Fuente. Seminario de Investigación. Estudio de las variables involucradas en el sistema de Bombeo. Diego Torrado Soto y otros.

El bombeo mecánico es un sistema dinámico, que cuando la sarta de varillas baja, la barra pulida soporta una carga equivalente al peso de la sarta de varillas, y cuando esta sube, la barra pulida soporta una carga equivalente al peso de la sarta de varillas más el peso del fluido que se está extrayendo, este proceso se repite una y otra vez durante todo el ciclo de operación de la máquina y es representado a través de unas gráficos llamados dinagramas, donde se muestra la carga contra la posición de la barra pulida.

Los dinagramas son una muestra de cómo se encuentra el funcionamiento de la máquina, y cualquier variación en estos datos, corresponde a una novedad en el sistema, ya sea algún daño físico, nivel del pozo muy bajo, cambio de viscosidad en el fluido etc.

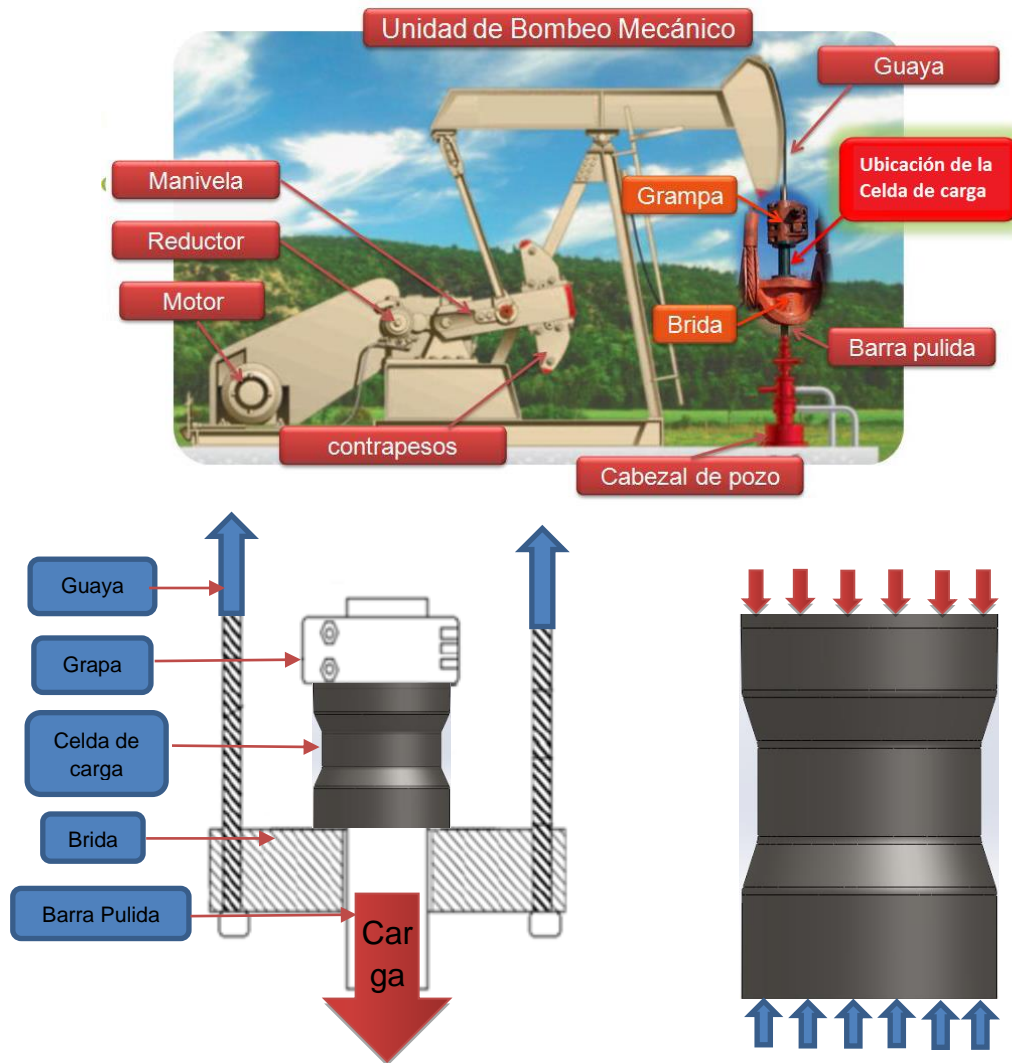
Figura 3. **Dinagrama.**



Fuente. Seminario de Investigación. Estudio de las variables involucradas en el sistema de Bombeo.

Para hacer un dinagrama es necesario de un sensor de posición que determine si el sistema está subiendo o bajando y de un sensor que cense las cargas sobre la barra pulida, el sensor es una celda de carga de compresión y es ubicada en la barra pulida entre la grapa y la brida figura 4.

Figura 4. **Ubicación celda de carga.**



Fuente. Seminario de Investigación. Estudio de las variables involucradas en el sistema de Bombeo. Diego Torrado Soto y otros.

De acuerdo al diagrama de cuerpo libre de la figura 4, la celda de carga siempre está a compresión, debido a que la grapa por efecto de la carga sobre la barra pulida siempre ejerce fuerza hacia abajo, y la brida por acción de las guayas que transmiten la tensión ocasionada por la unidad motora de bombeo ejerce fuerza hacia arriba.

El proyecto de investigación “Desarrollo de un prototipo de pozo inteligente Para Campo Escuela Colorado – FASE 1 – 8586” Financiado por la VIE (Vicerrectoría de investigación y Extensión) UIS, como su nombre lo dice tiene la labor de desarrollar un prototipo de pozo inteligente, a través de la generación de dinagramas de fondo.

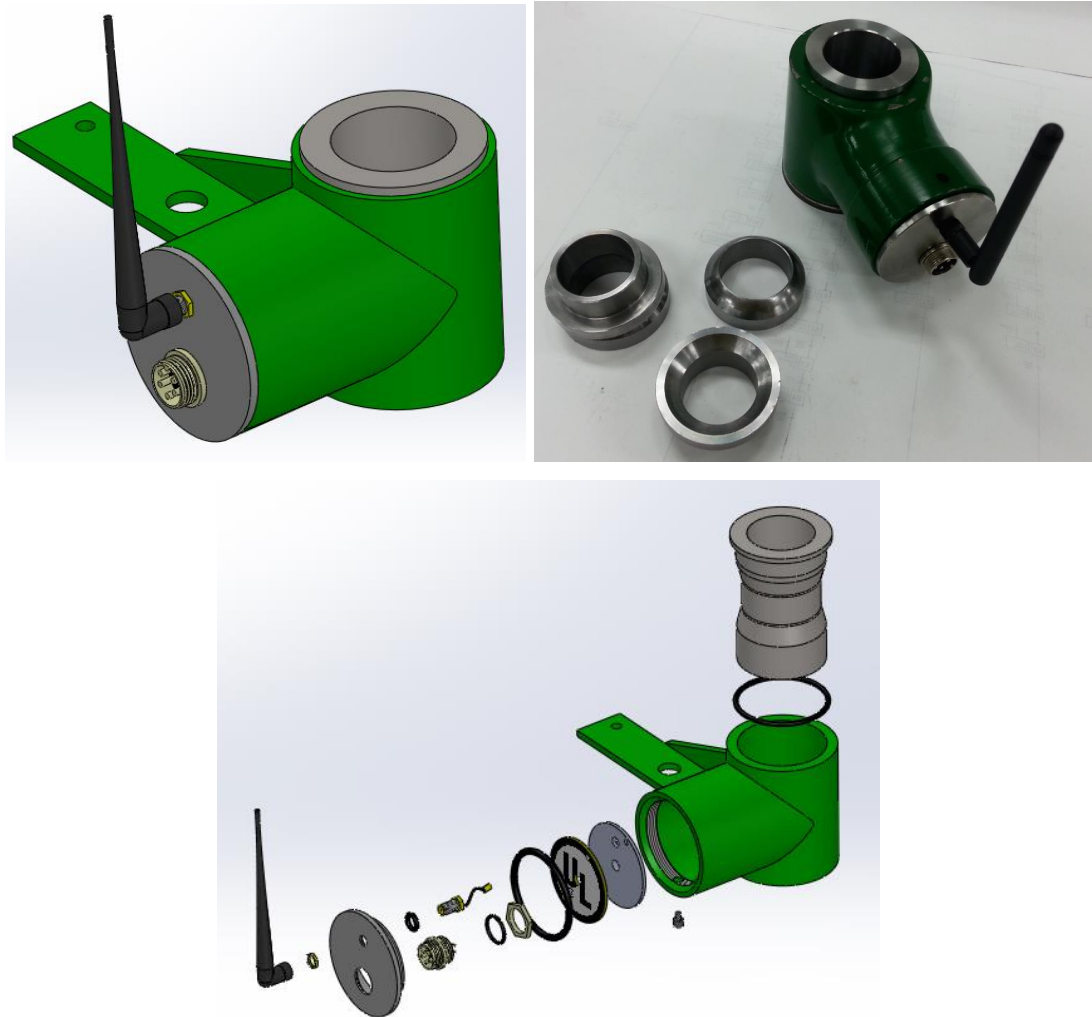
Para esta labor el proyecto propone el desarrollo de una celda de carga de 10.000 libras tipo compresión, que cense las cargas en el pozo 74 de campo escuela colorado y las transmita de modo inalámbrico a un sistema receptor ubicado en un lugar seguro en el pozo, que sea de fácil acceso para el operario.

2.2 CELDA DE CARGA

El desarrollo de este sensor se efectuará en varias fases, para esta primera fase, en el cual se enfocó este proyecto, se evaluó el diseño estático y dinámico, también como su construcción y caracterización.

La celda de carga que se diseñó es un cilindro hueco que se adapta fácilmente al montaje efectuado en la máquina de bombeo, también tiene un sistema de centrado y autonivelación, el cual permite que la celda opere en condiciones óptimas de trabajo, la celda de carga queda preparada para adquirir certificación OMLR 60, trabajo que se realizara en otra fase del proyecto general de la VIE (Vicerrectoría de Investigación y Extensión).

Figura 5. **Celda de carga**



Fuente: Autores

Se diseñó una carcasa totalmente hermética diseñada para albergar tanto la celda de carga como el equipo transmisor de datos, y también está preparada para una certificación anti-explosión y de norma de protección IP.

Al final del proyecto se diseñaron un total de 17 celdas de carga, cuatro carcasas y cuatro pares de anillos

Figura 6. **Celdas de carga y carcasa.**



Fuente: Autores

2.3 STRAIN GAGES

Este sensor trabaja bajo strain gages (galgas extensiométricas), tecnología que en Colombia no se tiene muy desarrollada, las galgas extensiométricas son sensores que al pegarlos sobre una superficie que se deforma, ellas tienen la capacidad de medir esa deformación y convertirla en una señal eléctrica, para poder trabajar con esta tecnología en transductores, primero que todo se tuvo que adquirir kits de aprendizaje de pegado de galgas, los cuales consistían en pegar strain gages sobre placas de aluminio en voladizo, y luego hacer pruebas de flexión en un banco que se diseñó y se construyó para esto Figura 6. Midiendo así las deformaciones de las placas de aluminio.

Figura 7. **Ubicación celda de carga.**



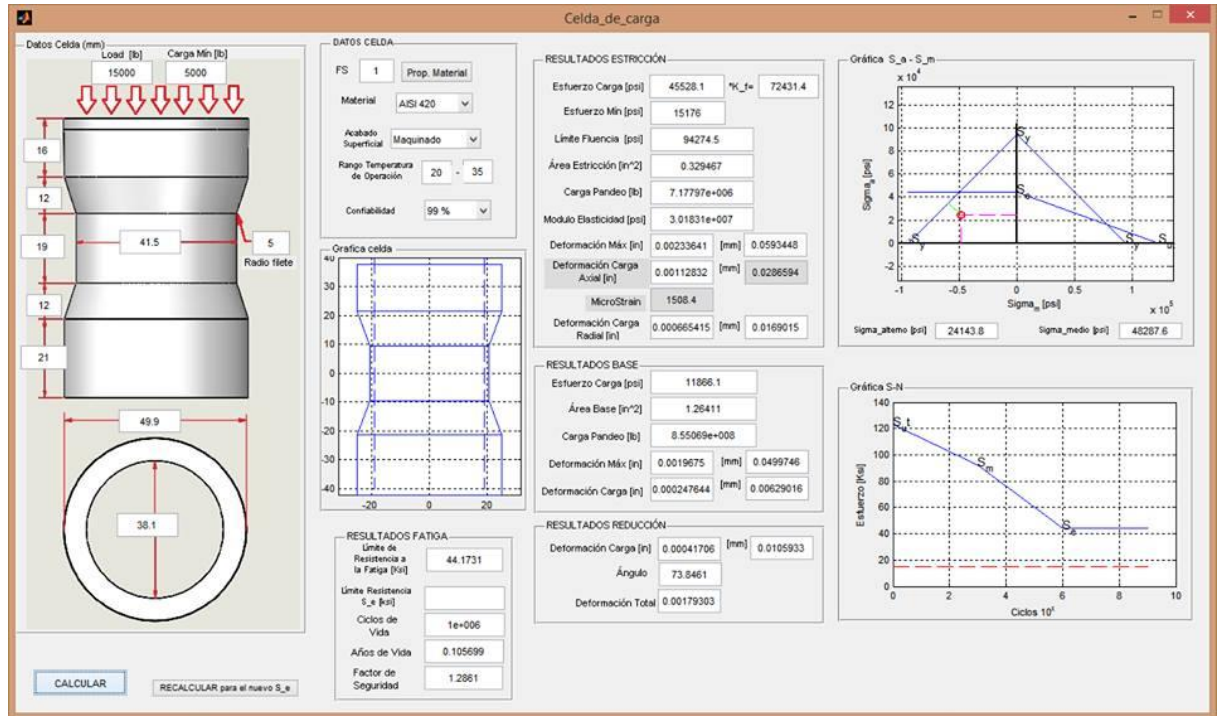
Fuente: Autores.

2.4 LOCELL SOFT

Con el fin de analizar el diseño total de una celda de carga tipo columna para un sistema de bombeo mecánico de forma tan sencilla como esperar resultados en un solo click, surgió Locell Soft un software desarrollado en este proyecto en la plataforma Guide de Matlab, el software incluye todos los aspectos a evaluar en el diseño mecánico de la celda, subdivididos inicialmente en el diseño estático y el diseño dinámico.

Basado en la geometría de la celda de carga, obviamente tipo columna hueca debido a las condiciones de montaje, llega a evaluar parámetros tan específicos como el acabado superficial con que se fabrica la celda, la confiabilidad del diseño que se quiere y tan necesarios como una lista de materiales aplicables a su diseño.

Figura 8. Locell Soft.



Fuente: Autores.

El entorno del software es amigable incluyendo detalles como una imagen preliminar proporcional al tamaño real de la celda especificada y una forma didáctica y llamativa de ingresar datos como las dimensiones de la celda.

Los resultados expresados en forma gráfica y tan bien numérica dan una ventaja importante para prever en que forma podrían variar los datos de entrada en busca de un diseño óptimo, además de indicar el instante donde para un caso la celda falle con las condiciones programadas.

Gracias a Matlab se tiene un ejecutable del programa que funciona sin necesidad de tener Matlab instalado. Disponible para Windows 8, 7, xp; versión en 32 bits y

64 bits. Para tener especificaciones más precisas del funcionamiento, datos de entrada y resultados ver capítulo 5.

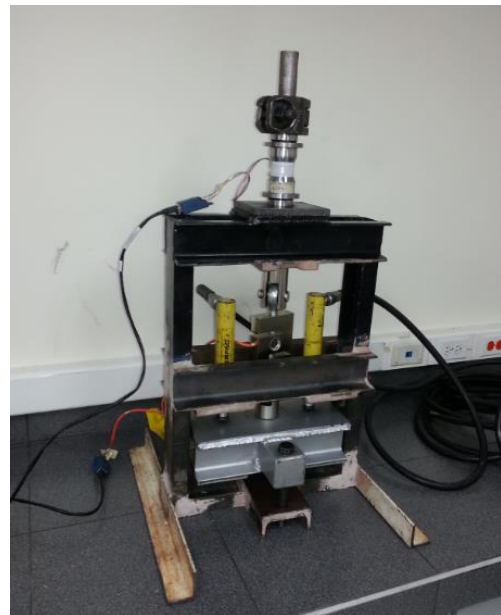
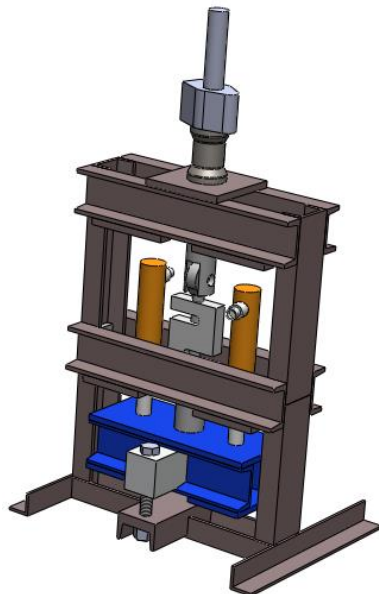
2.5 BANCO DE PRUEBAS ESTÁTICAS DE 10.000 LB

El banco de pruebas fue diseñado específicamente para la celda de carga tipo columna teniendo en cuenta el espacio disponible y la ubicación de la celda en el sistema de bombeo mecánico.

Cuenta con un sistema hidráulico Enerpac (cilindros hidráulicos y bomba manual) que genera hasta 20.000 lb; Además está provisto de un par de tornillos de fijación que permiten mantener la carga generada independizando el banco del Enerpac. (Ver capítulo 6). Esto hace posible hacer pruebas como:

- ✓ Mantener una carga constante entre 0 y 10.000 lb
- ✓ Cargar la celda de 0 a 10,000 lb generadas manualmente por el Enerpac.

Figura 9. Banco de pruebas estáticas de 10.000 lb.



Fuente: Autores.

Permite generar la simulación de tener la celda de carga tipo columna sometida a compresión debido a la carga a tensión en la que se encuentra la barra pulida (mismo principio que usa un sistema de bombeo mecánico), usando elementos de un sistema mecánico de bombeo real como una grapa proporcionada por Campo Escuela Colorado. (Ver capítulo 6).

Una celda tipo S de 10.000 lb permite contrastar los resultados de carga generados por el sistema Enerpac con los obtenidos por la celda tipo columna gracias al sistema de adquisición de datos de National Instruments (ver capítulo 6,2) que permite comparar en tiempo real los resultados de la celda tipo S con los medidos en la celda tipo columna.

El banco permite un fácil montaje y desmontaje de la celda de carga, bien sea para cambio de celda, incluir una desnivelación de la superficie, incluir un descentre entre la celda y la barra pulida, montar anillos niveladores y centradores; todo esto simplemente con soltar la barra pulida para tener acceso directo a la celda tipo columna.

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DE CARGA

Para el diseño de la celda se tienen en cuenta 4 condiciones esenciales:

- a) El tipo de material usado para la celda, enfocado a las condiciones ambientales a las que estará sometido.
- b) Las propiedades físicas del material para resistir la carga para la que será diseñada.
- c) La compatibilidad del material con el tipo de galga extensiométrica usada. (Creep code).
- d) El material debe generar la suficiente deformación para que cumpla con los requisitos de funcionamiento de las galgas extensiométricas. (1500 MicroStrain).

a). Desde la primera condición se tiene que ningún material que no sea inoxidable no cumplirá con la misma, por tal razón debe ser un acero inoxidable el material de la celda de carga, sin embargo se analizaron algunos materiales que no son inoxidables y están incluidos en el software desarrollado para el diseño de la celda en busca de obtener experiencia con aspectos como la fabricación, el pegado de galgas, las pruebas necesarias, entre otros. Se hace énfasis en los materiales que cumplen con esta condición.

b). Las propiedades físicas y sus condiciones frente al diseño necesario fueron corroboradas inicialmente con el diseño estático y dinámico (capítulos 3.3 y 3.4), posteriormente con el software hecho especialmente para el diseño de la celda, allí se encuentra una lista de 15 materiales distintos para comparar:

- ✓ SAE 1020
- ✓ SAE 1045
- ✓ SAE 4340
- ✓ SAE 8620

- ✓ ALUMOLD 500
- ✓ AISI 201
- ✓ AISI 304
- ✓ AISI 410
- ✓ AISI 420
- ✓ AISI 430
- ✓ AISI 439
- ✓ 15H-5PH(H900)
- ✓ 17-4H (H900)
- ✓ 17-4PH (A)
- ✓ 17-7PH (H900)

La necesidad de comparar todos los materiales opcionales alentó al desarrollo del software Locell Soft (ver capítulo 4) con el fin de comprobar el rendimiento de cada elemento para luego escoger 4 materiales de los listados: SAE 1045, SAE 4340, Alumold 500, AISI 420.

El acero SAE 1020 fue descartado para continuar con el diseño ya que se eligió el SAE 1045 que tiene propiedades muy parecidas pero mejor adaptables a la celda de carga.

El acero SAE 8620 es un material más costoso para hacer prototipos y por su condición de oxidable se descartó, sin embargo dentro de los elegido están el acero SAE 1045 y el SAE 4340 que aunque son oxidables, su precio es menor, presentan mejores propiedades de resistencia (ver capítulo 3.3 y 3.4 diseño estático y dinámico) y fueron objeto de prueba y entrenamiento para el pegado de las galgas en la superficie de la celda.

Como una opción para otro tipo de celdas se incluyó el Alumold 500 que no se oxida, es una opción planeada que al no ser un acero deberá ser detallado en su análisis en los siguientes capítulos.

Y el acero inoxidable AISI 420, que cumple con el requisito para soportar las condiciones ambientales aunque tiene un precio más elevado que cualquiera de los otros materiales es el seleccionado entre los de su misma naturaleza inoxidable por superar el diseño estático y dinámico (ver capítulo 3.3 y 3.4).

Los aceros 4 inoxidables enlistados en la parte final presentan condiciones muy favorables para el diseño de la celda de carga, mejorando el comportamiento de cualquiera de los demás materiales pero son aceros poco comerciales en Colombia y de elevado costo en el exterior, por tal razón no fueron seleccionados para la fabricación de celdas.

c). La tercera condición depende directamente de los tipos de galgas extensiométricas que existen para celdas de carga tipo columna, cada una tiene un creep diferente, es decir cierta compatibilidad con el material de la celda de carga y esta compatibilidad se ve reflejada en el comportamiento de la galga (cuando ya está adherida al material de la celda) y es sometida a un esfuerzo constante. Según el fabricante mejor forma de verificar la compatibilidad de la galga con el material es experimentalmente en pruebas a carga constante durante 20 min.

La compatibilidad que tiene cada aleación con cada material se muestra en el capítulo 4.

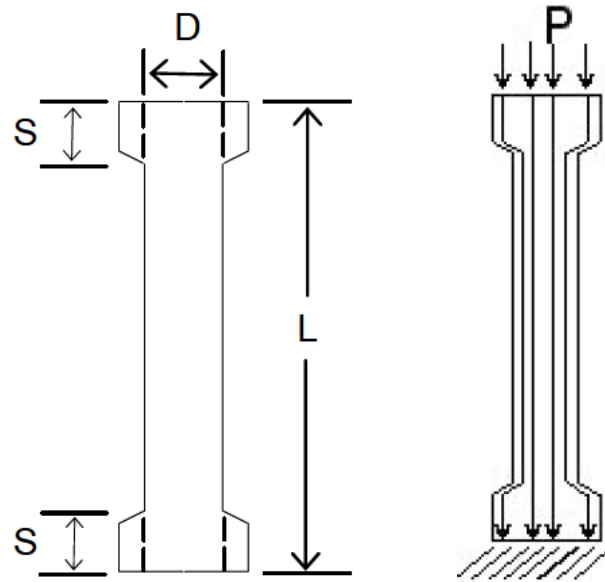
d). La cuarta condición está ligada al diseño geométrico de la celda ya que de esta depende la relación de deformación y resistencia del material, esta condición es corroborada en el diseño estático para cada material (capítulo 3.3).

3.1 GEOMETRÍA DE LA CELDA DE CARGA

3.1.1 Estructura Tipo Columna. La estructura tipo columna es una barra prismática circular, que permite medir cargas de compresión y tracción, este tipo

de geometría se compone de 2 soportes (s) que sirven como base estabilizadora y ayuda a la concentración de esfuerzos a lo largo de la columna

Figura 10. **Distribución de esfuerzos en la celda.**



Fuente: Autores.

Es de notar que los soportes S representan un concentrador de esfuerzos en la celda y que probablemente harían fallar la celda en los cambios de sección, por tal razón las dimensiones de estos soportes están íntimamente ligadas a la reducción de estos concentradores, también a restricciones a algunas medidas fijas de diámetros para fabricar la carcasa, además de incluir determinado espacio para la ubicación de las galgas extensiométricas.

3.1.2 Dimensiones de la Celda limitadas por el montaje. Para estimar las dimensiones de la celda se tuvieron en cuenta todas las consideraciones nombradas anteriormente desde el numeral 3 (Diseño y Construcción de la Celda de Carga) específicamente para la celda; además de eso se tiene una restricción

de espacio en el montaje que se tiene en la unidad de bombeo mecánico, en la unión entre el cabezal por medio de guayas unidas en la brida o porta varillas y la grapa ubicada en la barra pulida, teniendo sobre el porta varillas un área apróximada de 200 mm x 100 mm, mientras que la altura depende de la posición de la grapa.

Figura 11. **Montaje Porta varillas y grapa.**



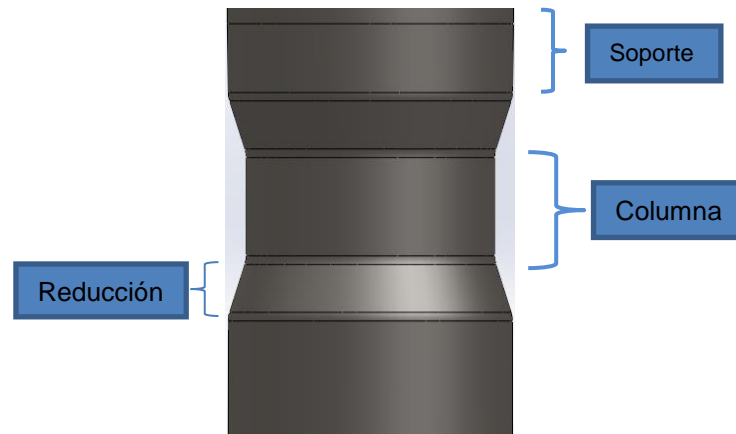
Fuente: Bombeo Mecánico Theta Enterprises

En la figura 12 se muestra la denominación asignada a cada parte de la celda, la cual será usada durante todo el proyecto.

Las dimensiones de la columna están limitadas al diseño estático y al diseño dinámico (capítulos 3.3 y 3.4), en cuanto al diseño estático el parámetro fundamental a tener en cuenta fue el límite de fluencia, este permitió conocer el punto hasta el cual la celda pudo ser cargada sin que fallara (VER ANEXO C), mientras que el diseño dinámico tuvo en cuenta muchos otros factores que están reunidos, junto con el diseño estático en un software desarrollado en Matlab, como son los factores de concentración de esfuerzos, el diseño teniendo en cuenta el

número de ciclos de vida de la celda, entre otros (Ver Capitulo 4. Locell_soft Software para el diseño de la celda de carga - Matlab).

Figura 12. **Dimensiones de la celda.**



Fuente: Autores

3.2 MATERIAL DE LA CELDA DE CARGA

Para la selección del material de la celda de carga se debe tener en cuenta parte de las condiciones de las nombradas en el capítulo 3, estas tres principales características son:

- a) El material debe permitir que este se deforme tanto como sea posible pero sin que supere el límite elástico, pues es en la zona elástica en la que el material puede deformarse mientras es cargado y capaz de regresar a su posición inicial cuando se descarga; de otro modo si la deformación que genera la carga llega a la zona plástica se tendrá una deformación permanente que alterará tanto físicamente como a nivel molecular la estructura del material haciendo que cambien sus dimensiones permanentemente y del mismo modo cambien sus propiedades físicas.

- b) La deformación de la galga debe ser la misma que sufre el material, y por recomendación del fabricante las galgas extensiométricas que se usan para la medición de esfuerzos en celdas de carga, deben tener una deformación unitaria de 1000 a 1500 μstrain a carga nominal, por tanto nuestro material debe estar dentro de este rango de deformación cuando la carga sea 10000 libras.
- c) Debe existir una cierta compatibilidad entre el material de la celda de carga y el material de la galga extensiométrica, ya que al pegar una galga extensiométrica a una superficie y someterla a carga constante, debido a la característica elástica de la rejilla, se refleja un fenómeno de cedencia (Creep), y por tanto un cambio en el valor de salida de voltaje del transductor con el incremento del tiempo.
- d) El material inoxidable garantizará la durabilidad de la celda de carga por tal razón es indispensable asegurar dicha condición, aunque dar a un material oxidable la condición de inoxidable es posible por medio de pinturas o de procesos químicos como galvanizados o cromados cada uno tiene sus desventajas, en el caso de la pintura esta podría fácilmente ser arrancada debido a las condiciones de vibración a las que estaría sometida la celda, además de un ajuste por interferencia que la celda tendrá con respecto a la carcasa donde podría fácilmente desprenderse la pintura donde la corrosión podría producir:
- ✓ El deterioro de las galgas
 - ✓ Errores en la lectura de las galgas
 - ✓ La falla del pegante de las galgas
 - ✓ La falla prematura de la celda de carga por fatiga.

Mientras que un tratamiento químico afectaría las propiedades físicas del material y cambiaría las condiciones de funcionamiento de las galgas.

Teniendo en cuenta estos cuatro criterios se procede a hacer una preselección de material, de acuerdo al módulo de elasticidad, límite de fluencia, y recomendación del fabricante de galgas extensiométricas (Vishay Precision Group).

Recordando los materiales seleccionados para realización de pruebas fueron:

- Acero SAE 1045
- Acero SAE 4340
- Alumold 500
- Acero Inoxidable AISI 420

3.2.1 Acero SAE 1045. Un acero con límite de fluencia (σ_y) de 55000 psi y un módulo de elasticidad (E) de 24×10^6 psi, caracterizado por su bajo costo y su comercialización, hacen de este material un primer candidato para la realización de pruebas experimentales de diseño, fabricación, carga y pegado de galgas.

El primer prototipo de la celda de carga se construyó de una probeta en Acero 1045, el diseño geométrico se mantuvo hasta la celda final, con únicamente variaciones en las dimensiones requeridas por el uso de otro material, la adaptación a la carcasa y a la instrumentación necesaria para la obtención de la data, entre otros. Esta se muestra en la (figura 13).

Debido a las condiciones ambientales a las que estaría sometida la celda de carga, el acero SAE 1045 presenta una debilidad, enfocada principalmente al fenómeno de la oxidación, el cual afecta directamente la geometría de la celda y por ende el funcionamiento de las galgas extensiométricas. Además las propiedades físicas del material sometidas a los requerimientos de carga exigidos llevan al material hasta sus límites, a punto de fallar.

Figura 13. **Prototipo de celda de carga.**



Fuente: Autores.

3.2.2 Acero SAE 4340. Este es un acero altamente recomendado por la empresa de galgas extensiométricas para la fabricación de transductores, posee un límite de fluencia (σ_y) de 90.000 psi y un módulo de elasticidad (E) de 30×10^6 psi, es un acero que posee buena resistencia a la fatiga, costo medianamente bajo y es muy comercial en la zona.

3.2.3 Alumold 500. Una aleación de aluminio diseñada para reemplazar los aceros en algunas aplicaciones, con óptimas propiedades mecánicas, baja densidad, fácil mecanización, excelente pulido y sobretodo excelente resistencia a la corrosión. posee un límite de fluencia (σ_y) de 72518 psi y un módulo de elasticidad (E) de 10.6×10^6 psi, es un material de costo medianamente bajo pero de baja comercialización.

3.2.4 Acero Inoxidable AISI 420. Es un material medianamente recomendado por la empresa de galgas (Vishay Precision Group), pero con propiedades físicas y

mecánicas muy óptimas como el límite de fluencia (σ_y) de 94274 psi y módulo de elasticidad (E) de 30×10^6 psi, es un acero muy comercial, pero de costo medianamente alto.

3.2.5 Propiedades mecánicas del material, corroboración con MTS 810

3.2.5.1 MTS 810. Es una máquina de ensayos universales que tiene la capacidad de realizar pruebas de cargas estáticas y dinámicas en materiales y componentes. Posee un sistema variado de cargas controladas de hasta 500 kN, tiene la capacidad de realizar diferentes pruebas como pruebas de tensión, compresión, fatiga, fractura mecánica y durabilidad de los materiales.

Figura 14. **Máquina de ensayos universales MTS 810.**



Fuente: Autores

3.2.5.2 Probetas para ensayos de tensión. Se construyeron cuatro probetas por cada material seleccionado, cada una con dimensiones según norma técnica colombiana NTC 3353 (ver plano de probeta anexo E), las probetas fueron extraídas de una barra de 2" de diámetro de la cual se fabricaron las celdas de carga, con el propósito de corroborar que el material usado para la construcción de las celdas de carga posee realmente las propiedades mecánicas que expone la compañía proveedora de aceros (Compañía general de aceros CGA) en su catálogo, y que estas propiedades son confiables a la hora de diseñar el transductor.

Figura 15. **Probetas para pruebas de tensión.**



Fuente: Autores

3.2.5.3 Mecanizado probetas Torno CNC. Un torno de control numérico es una máquina herramienta que actúa guiado por un software de computadora que utiliza datos alfanuméricos, este tipo de tornos permite producir cantidades y gran precisión en las piezas.

LEADWELL T6, es un torno ubicado en el laboratorio de CNC en la escuela de ingeniería mecánica de la UIS, torno en el cual se mecanizaron las probetas y celdas de carga, la programación se realizó a través del software Mastercam X7.

Figura 16. **Torno CNC**



Fuente: autores

Como se dijo anteriormente las probetas fueron extraídas de la misma barra de material de la que se hicieron las celdas de carga, esta barra tenía un diámetro de 2", así que se tomaron dos pedazos de 20 cm y se les hizo un corte de manera longitudinal (figura 16).obteniendo dos pedazos en forma de media luna, cada pedazo fue montado y mecanizado en el torno CNC hasta dar forma a la probeta.

Figura 17. **Corte longitudinal barra de acero para fabricación de probetas**



Fuente: Autores

3.2.5.4 Pruebas de tracción en MTS 810 y Resultados. Obtenidas todas las probetas, se procedió a realizar las pruebas de tracción en la máquina de ensayos Universales MTS 810.

Figura 18. **Montaje probetas en MTS 810**



Fuente: Autores

Se montaron las probetas en la máquina de ensayos universales (figura 18). Sujutando la probeta inicialmente desde la parte inferior y luego la parte superior, según manual de operación de la máquina, luego se procede a hacer montaje del extensómetro MTS y así tener una medida exacta de la deformación de la estricción de la probeta para cálculo del módulo de elasticidad.

Figura 19. **Extensómetro MTS 810**



Fuente: Autores.

La MTS 810 proporciona 3 datos, el valor de la carga, la deformación total y la deformación del extensómetro; Con el montaje ya hecho, se procede a aplicar carga axial (tensión) sobre la probeta, a medida que se aplica carga se toma la deformación con el extensómetro hasta que se encuentra el límite elástico, en ese punto se hace una pausa a la máquina y se retira el extensómetro, para que este no se dañe cuando la probeta llegue a la rotura. Luego se procede con la carga para hacer fallar la probeta y continuar con la toma de datos (carga Lb vs deformación total).

Figura 20. **Falla de probetas.**

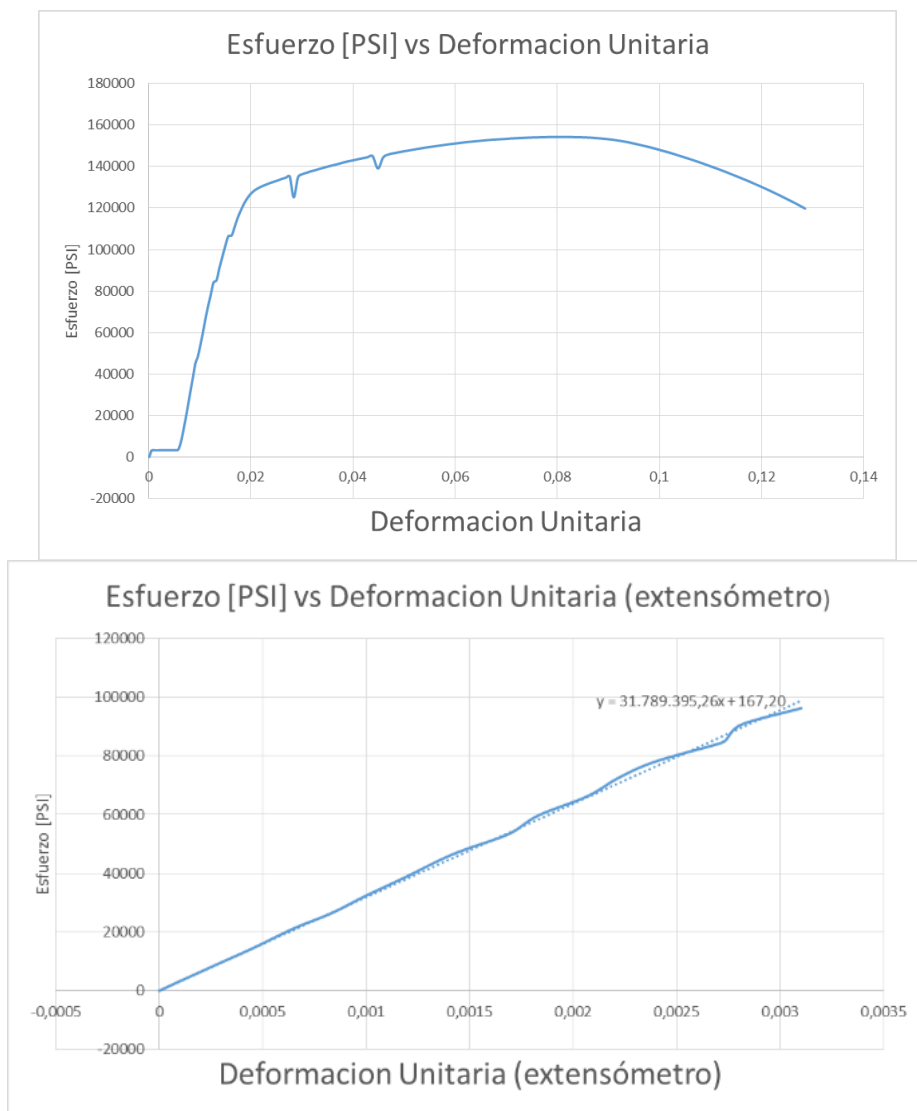


Fuente: Autores

Se exportaron los datos a Microsoft Excel para graficarlos y obtener los valores de módulo de elasticidad y límite de fluencia para cada uno de los materiales.

El límite de fluencia se obtuvo gráficamente, donde termina la recta de la zona elástica, y el módulo de elasticidad se obtuvo con los valores de esfuerzo y la deformación unitaria proporcionada por el extensómetro.

Figura 21. **Gráficos de esfuerzo-deformación para acero AISI 420**



Fuente: Autores

Resultados: De las cuatro probetas de cada material se obtuvieron 4 valores de módulo de elasticidad y límite elástico, estos valores se promediaron y se obtuvo un solo valor para cada material como lo muestra la tabla 1 y 2.

Tabla 1. Comparación módulo de elasticidad real vs teórico

Acero Inoxidable AISI 420		% ERROR
MODULO DE ELASTICIDAD TEÓRICO	30.000.000	3,5361348
MODULO DE ELASTICIDAD REAL	31.060.840,44	
Acero 1045		% ERROR
MODULO DE ELASTICIDAD TEÓRICO	29.000.000	1,92978552
MODULO DE ELASTICIDAD REAL	29.559.637,80	
Alumold 500		% ERROR
MODULO DE ELASTICIDAD TEÓRICO	10.442.720	0,56269315
MODULO DE ELASTICIDAD REAL	10.501.480,47	

Fuente: Autores

Tabla 2. Comparación Límite de fluencia real vs teórico

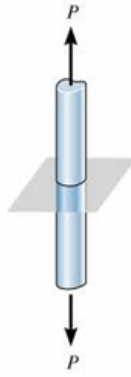
Acero Inoxidable AISI 420		% ERROR
LÍMITE DE FLUENCIA TEÓRICO	94.274,50	0,65072086
LÍMITE DE FLUENCIA REAL	94.887,96	
Acero 1045		% ERROR
LÍMITE DE FLUENCIA TEÓRICO	28.427,40	8,47232621
LÍMITE DE FLUENCIA REAL	30.835,86	
Alumold 500		% ERROR
LÍMITE DE FLUENCIA TEÓRICO	72.518,87	2,29937392
LÍMITE DE FLUENCIA REAL	74.186,35	

Fuente: Autores

Al observar los resultados de estas pruebas se puede concluir que las propiedades dadas por el fabricante de aceros son confiables.

3.3 DISEÑO POR CARGA ESTÁTICA

Figura 22. Barra sometida a tensión.



Fuente: Autores

$$\sigma = \frac{P}{A} [1]$$

σ = Esfuerzo aplicado al objeto [Lb/ in²]

P= Tensión, Fuerza, Peso, Carga [Lb]

A= Área transversal de la estructura [in²]

Cuando la barra es estirada por las fuerzas P , el esfuerzo es de tensión; si las fuerzas son invertidas en sentido, ocasionando que la barra quede comprimida, se obtiene un esfuerzo de compresión.

Una barra recta cambia de longitud al cargarla axialmente, volviéndose más larga en tensión y más corta en compresión, este concepto adimensional se llama alargamiento por unidad de longitud o deformación unitaria, se denotada por la letra griega ϵ (épsilon) y está dado por la ecuación.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [2]$$

ϵ = Deformación unitaria.

ΔL = Cambio en la longitud del objeto.

L_0 = Longitud inicial del objeto.

La relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria en una barra sometida a compresión la modela la ley de Hooke.

$$\sigma = E * \epsilon \quad [3]$$

σ = Esfuerzo aplicado al objeto.

E = Módulo de elasticidad del material.

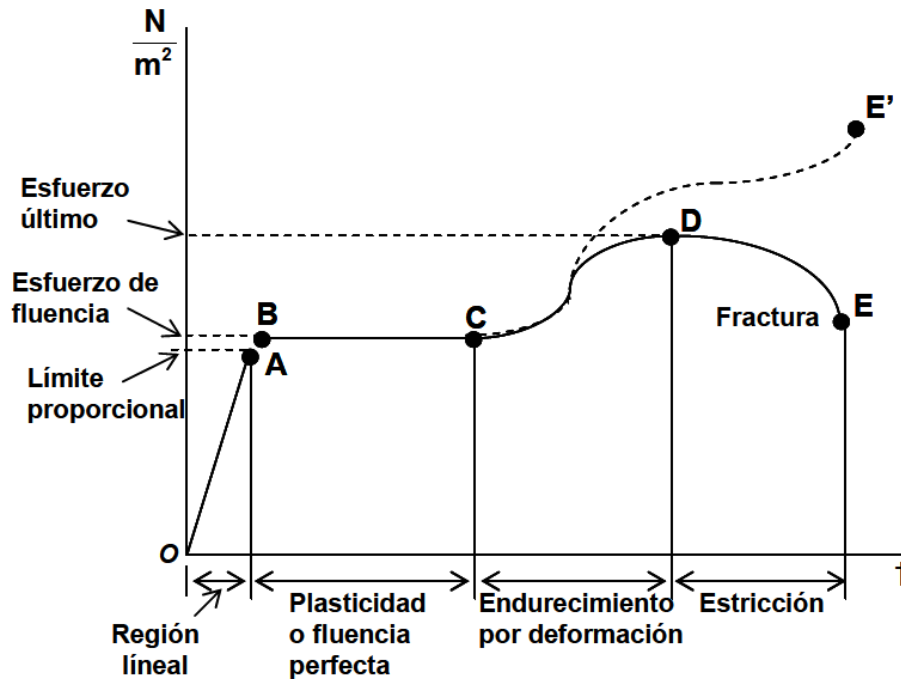
ϵ = Deformación unitaria.

De manera importante la ley de Hooke predice el cambio que tendrá la longitud de un objeto en función de la tensión aplicada.

Según se observa en la figura 6 una barra es sometida a una tensión (P), esta tensión provoca un cambio de longitud (ΔL) en la barra. Conociendo el módulo de elasticidad de la barra y la tensión aplicada a la misma, se puede conocer el cambio de longitud que sufrió la barra aplicando la ley de Hooke.

Muchos materiales estructurales (metales, madera, plásticos y cerámicos) se comportan elásticamente y linealmente en las primeras etapas de carga (región lineal y plasticidad), un ejemplo de esto se observa en el diagrama esfuerzo-deformación unitaria para el acero estructural en tensión mostrado en la figura 23.

Figura 23. Diagrama Esfuerzo – Deformación unitaria.



Fuente: Autores.

Se observa que el diagrama comienza con una línea recta que pasa por el origen, lo que significa que la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria en esta región es tanto lineal como elástica y proporcional. La pendiente de esta línea recta se llama módulo de elasticidad. La pendiente tiene unidades de esfuerzo dividido entre deformación unitaria (adimensional), esto quiere decir que el eje de las ordenadas corresponde al esfuerzo y el eje de las abscisas corresponde a la deformación unitaria.

3.3.1 Diseño por partes. Para el diseño de cada sección de la celda se tuvieron en cuenta diferentes consideraciones que podrían llegar a hacer fallar la celda como son la deformación axial, la deformación radial, el pandeo y los tipos de apoyo.

3.3.1.1 Columna.

Deformación axial:

Siendo el principal criterio de diseño la deformación elástica, se tiene que la deformación esperada en la columna es la relación entre las ecuaciones [1] que representa el esfuerzo generado por la carga aplicada en la sección transversal de la columna, la ecuación [2] que representa la deformación unitaria y la ecuación [3] que representa la ley de Hooke, dando como resultado la ecuación [4] que describe la deformación axial:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad [1]$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [2]$$

$$\sigma = E * \epsilon \quad [3]$$

$$\Delta L = \frac{PL}{AE} \quad [4]$$

Las condiciones de operación del pozo 74 de Campo Escuela Colorado demuestran que la carga aproximada que soporta la barra pulida es de 10000 lb, siendo esta la carga P a la que se va a someter la columna, se puede estimar un área se sección transversal que podría soportar la columna sin que exceda el límite de fluencia del material (AISI 420) que corresponde a 87022,04 psi.

Esto se corroboró cuando se eligió la dimensión D_ext mostrada en la figura 11; ya que la sección transversal de la columna depende del diámetro interno D_int, pues la columna es hueca debido a la disposición que esta tendrá en el montaje, esta dimensión depende exclusivamente del diámetro de la barra pulida a usar y dentro de los diámetros estándar usados en las barras pulidas se tiene que $1\frac{1}{2}$ in es la usada en el pozo 74 de Campo Escuela Colorado, por tal razón la dimensión

D_{int} se toma de 39 mm siendo mayor que $1\frac{1}{2} \text{ in} = 38.1 \text{ mm}$, para permitir el paso de la barra pulida a través de la columna con cierto ajuste.

El diámetro exterior de la celda D_{ext} seleccionado de 41.5 mm, ya que este permite un área de sección transversal de 0.329467 in^2 y genera un esfuerzo de 45528.1 psi, calculado con la ecuación [1] siendo mucho menor que los 87022,04 psi del límite de fluencia.

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{1.3 * 15000 \text{ lb}}{0.329467 \text{ in}^2} = 45528.1 \text{ psi}$$

Se toma este D_{ext} ya que en combinación con una longitud L de 0,748 in (19 mm) se obtienen una deformación axial aproximadamente de 0.003604 mm .

$$\Delta L = \frac{PL}{AE} = \frac{15000 * 0,748}{0.329467 * 24 \times 10^6} = 1,4189 \times 10^{-4} \text{ in} = 0.003604 \text{ mm}$$

La siguiente ecuación representa la deformación unitaria que se presenta en la celda de carga cuando es sometida a un esfuerzo σ y el material tiene un módulo de elasticidad E , para este caso el AISI 420 tiene un $E = 30 \times 10^6 \text{ psi}$.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{15000 \text{ lb}}{0,329467 \text{ in}^2 * 30 \times 10^6 \text{ psi}} = 1,51760210^{-3} = 1517,6026 \text{ MicroStrain}$$

Dicho valor de **1517,6026 MicroStrain** cumple con las condiciones del diseño de la celda, pues la galga debe trabajar aproximadamente en 1500 μ Strain en su carga nominal. Dicho valor se puede corroborar en el software desarrollado.

En la tabla 3 se muestra una lista de diámetros posibles para el AISI 420 que generaría dicha deformación unitaria en μ Strain. Se puede ver la opción más viable la cual resaltada además de generar un esfuerzo (45527,71045 psi) menor al límite de fluencia (87022,04 psi). Asegurando otra de las condiciones de diseño, en la cual no fallará el material por fluencia. De esta manera se confirma que el diámetro 41,5 cumple con la condición de que el esfuerzo generado en dicha área no supere el límite de fluencia y que a su vez genere 1500 MicroStrain.

Tabla 3. Diferentes diámetros para la geometría de la celda en AISI 420

D_ext [mm]	D_int [mm]	Area [in ²]	Carga [lb]	Modulo Elasticidad [psi]	Esfuerzo [psi]	Límite Fluencia [psi]	MicroStrain
40,5	38,1	0,2296451	15000	30E6	65318,1	87022,04	2177,27233
40,7	38,1	0,2494153	15000	30E6	60140,6	87022,04	2004,68885
40,9	38,1	0,2692828	15000	30E6	55703,5	87022,04	1856,78414
41,1	38,1	0,2892477	15000	30E6	51858,6	87022,04	1728,62227
41,3	38,1	0,30931	15000	30E6	48495	87022,04	1616,50131
41,5	38,1	0,3294697	15000	30E6	45527,7	87022,04	1517,59035
41,7	38,1	0,3497268	15000	30E6	42890,62	87022,04	1429,68759
41,9	38,1	0,3700812	15000	30E6	40531,6	87022,04	1351,05478
42,1	38,1	0,3905331	15000	30E6	38409,03	87022,04	1280,30128
42,3	38,1	0,4110823	15000	30E6	36489,04	87022,04	1216,30139
42,5	38,1	0,431729	15000	30E6	34744,02	87022,04	1158,13403
42,7	38,1	0,452473	15000	30E6	33151,1	87022,04	1105,03834

Fuente: Autores

Para los otros materiales, en este caso el SAE 1045 se ve también en la tabla 4 que se cumple con las dos condiciones de diseño, 1500 μ Strain y un esfuerzo (36489,04 psi) menor que el límite de fluencia de 87031,04. Se diría que el SAE 1045 es una mejor opción que el AISI 420 porque está más lejos de fallar por fluencia pero la condición de oxidable lo deja un paso atrás del AISI 420.

Tabla 4. Diferentes diámetros para la geometría de la celda en SAE 1045

D_ext [mm]	D_int [mm]	Area [in ²]	Carga [lb]	Modulo Elasticidad [psi]	Esfuerzo [psi]	Límite Fluencia [psi]	MicroStrain
40,5	38,1	0,2296451	15000	24000000	65318,16983	54969.3	2721,59041
40,7	38,1	0,2494153	15000	24000000	60140,66555	54969.4	2505,86106
40,9	38,1	0,2692828	15000	24000000	55703,52422	54969.5	2320,98018
41,1	38,1	0,2892477	15000	24000000	51858,66817	54969.6	2160,77784
41,3	38,1	0,30931	15000	24000000	48495,03919	54969.7	2020,62663
41,5	38,1	0,3294697	15000	24000000	45527,71045	54969.8	1896,98794
41,7	38,1	0,3497268	15000	24000000	42890,62781	54969.9	1787,10949
41,9	38,1	0,3700812	15000	24000000	40531,64328	54969.10	1688,81847
42,1	38,1	0,3905331	15000	24000000	38409,03852	54969.11	1600,3766
42,3	38,1	0,4110823	15000	24000000	36489,04157	54969.12	1520,37673
42,5	38,1	0,431729	15000	24000000	34744,02086	54969.13	1447,66754
42,7	38,1	0,452473	15000	24000000	33151,15034	54969.14	1381,29793
42,9	38,1	0,4733144	15000	24000000	31691,40833	54969.15	1320,47535
43,1	38,1	0,4942532	15000	24000000	30348,81664	54969.16	1264,53403
43,3	38,1	0,5152894	15000	24000000	29109,85531	54969.17	1212,91064

Fuente: Autores.

En la tabla 5 se ve el mismo análisis para el SAE 4340, donde para 1500 μ Strain se tiene un diámetro de 41,5 mm, y que mejora por una gran diferencia el límite de fluencia que los dos anteriores materiales, pero que de nuevo pierde por su condición de oxidable.

Tabla 5. Diferentes diámetros para la geometría de la celda en SAE 4340.

D_ext [mm]	D_int [mm]	Area [in ²]	Carga [lb]	Modulo Elasticidad [psi]	Esfuerzo [psi]	Límite Fluencia [psi]	MicroStrain
40,7	38,1	0,2494153	15000	29000000	60140,66555	122992	2073,81605
40,9	38,1	0,2692828	15000	29000000	55703,52422	122992	1920,81118
41,1	38,1	0,2892477	15000	29000000	51858,66817	122992	1788,22994
41,3	38,1	0,30931	15000	29000000	48495,03919	122992	1672,24273
41,5	38,1	0,3294697	15000	29000000	45527,71045	122992	1569,92105
41,7	38,1	0,3497268	15000	29000000	42890,62781	122992	1478,98717
41,9	38,1	0,3700812	15000	29000000	40531,64328	122992	1397,64287
42,1	38,1	0,3905331	15000	29000000	38409,03852	122992	1324,4496
42,3	38,1	0,4110823	15000	29000000	36489,04157	122992	1258,24281
42,5	38,1	0,431729	15000	29000000	34744,02086	122992	1198,06968

Fuente: Autores.

En el caso del Alumold se ve que al ser un material más dúctil, es decir tener un módulo de elasticidad más pequeño que cualquiera de los aceros este debe tener un diámetro mucho mayor, por eso 47.1 mm generarían 1515,93 μ Strain, de igual forma el límite de fluencia (72518,87 psi) está extremadamente elevado con respecto al esfuerzo generado por la carga de 16068,8 psi, cumpliendo con la tercera condición de soportar las condiciones ambientales al no oxidarse, sin

embargo más adelante en otras pruebas con respecto a la otra condición faltante, que relaciona las galgas extensiométricas será rechazado.

Tabla 6. Diferentes diámetros para la geometría de la celda en Alumold 500

D_ext [mm]	D_int [mm]	Area [in^2]	Carga [lb]	Modulo Elasticidad [psi]	Esfuerzo [psi]	Límite Fluencia [psi]	MicroStrain
46,3	38,1	0,8425191	15000	10600000	17803,75037	72518.87	1679,59909
46,5	38,1	0,8651135	15000	10600000	17338,76443	72518.87	1635,73249
46,7	38,1	0,8878054	15000	10600000	16895,59505	72518.87	1593,92406
46,9	38,1	0,9105946	15000	10600000	16472,75342	72518.87	1554,03334
47,1	38,1	0,9334812	15000	10600000	16068,88309	72518.87	1515,93237
47,3	38,1	0,9564652	15000	10600000	15682,74559	72518.87	1479,5043
47,5	38,1	0,9795466	15000	10600000	15313,20784	72518.87	1444,64225
47,7	38,1	1,0027253	15000	10600000	14959,2312	72518.87	1411,24823
47,9	38,1	1,0260015	15000	10600000	14619,86184	72518.87	1379,23225
48,1	38,1	1,049375	15000	10600000	14294,22222	72518.87	1348,51153

Fuente: Autores.

Deformación Radial:

Los materiales sometidos a compresión axial tienden a deformarse axialmente y radialmente. Para esto se define el coeficiente de Poisson (denotado mediante la letra griega ν), este coeficiente es una constante elástica que proporciona una medida del ensanchamiento a compresión o estrechamiento a tensión de la sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo como la columna usada en la celda a diseñar. La ecuación que describe el coeficiente de Poisson es:

$$\nu = \frac{\epsilon_{trans}}{\epsilon_{long}}$$

El cual se define como la relación de deformación unitaria transversal sobre la deformación longitudinal unitaria.

Para un material isótropo elástico perfectamente incompresible, este es igual a 0,5. La mayor parte de los materiales prácticos en la ingeniería rondan entre 0,0 y 0,5. Para el caso del Acero AISI 420 el módulo de Poisson es de 0.27, dato proporcionado por el distribuidor del material, y de acuerdo a esto la deformación radial para las dimensiones tomadas es:

$$\epsilon_{trans} = \nu * \epsilon_{long}$$

Donde ϵ_{long} fue la deformación unitaria axial calculada anteriormente.

$$\epsilon_{long} = \frac{1,4189 \times 10^{-4} \text{ in}}{0,748 \text{ in}}$$

$$\epsilon_{long} = 1,8968 \times 10^{-4}$$

$$\epsilon_{trans} = 0.27 * 1,8968 \times 10^{-4} = 5,12 \times 10^{-5}$$

La deformación radial será entonces:

$$\delta_{radial} = \epsilon_{trans} * (D_{ext} - D_{int}) = 0.00442 \text{ mm}$$

Cabe resaltar que todos los cálculos anteriores se hicieron con la carga máxima que soportará la celda de carga.

Pandeo.

En el diseño de la columna se debe tener en cuenta la estabilidad de la columna, ya que esta podría ser lateralmente inestable debido a la carga aplicada, para esto

se verificó el diseño por pandeo y para ello se necesita calcular la inercia de la columna con respecto a su eje central, la cual depende directamente de su geometría y para una columna hueca el segundo momento de inercia es:

$$I = \pi * \frac{[D_{\text{ext}}^4 - D_{\text{int}}^4]}{64} = 0.5167 \text{ in}^4$$

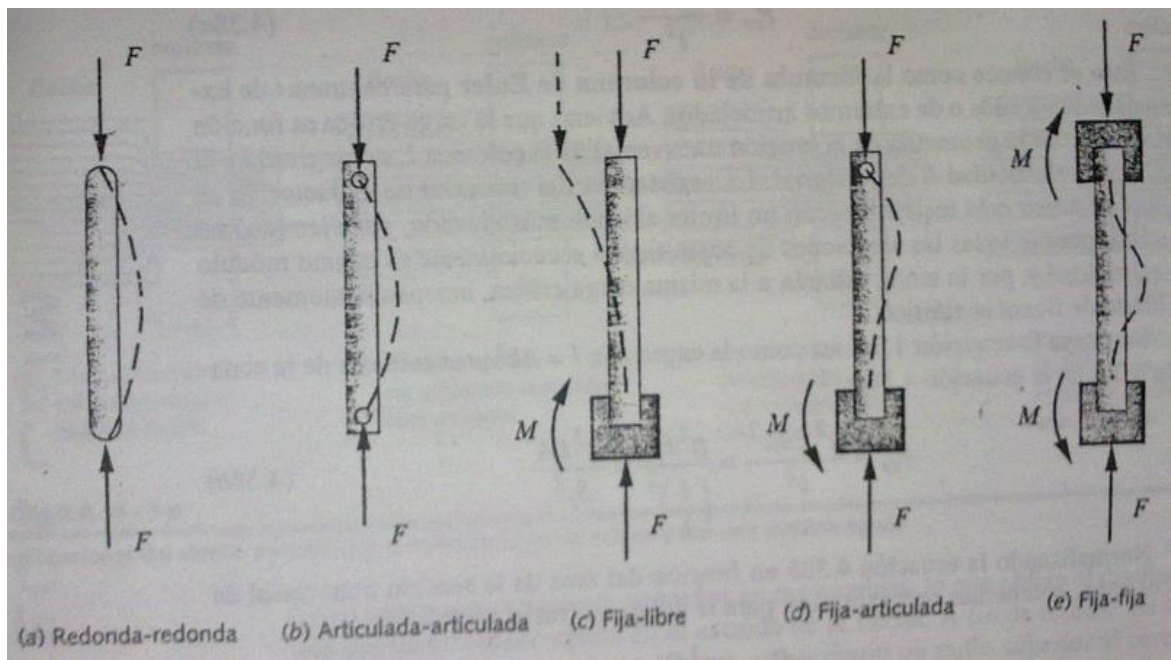
Donde la carga crítica por pandeo es proporcionada por la siguiente ecuación:

$$P_{\text{pand}} = \frac{(\pi^2 * E * I)}{C * L^2} = 7,04 \times 10^6 \text{ lb}$$

Donde C es un factor que depende del tipo de apoyo al que está sometida la columna y sus valores se encuentran relacionados en la tabla 7 y en la figura 24 mostrada a continuación, son recomendados por AISC*:

Tipos de apoyo:

Figura 24. Tipos de Apoyo



Fuente: Diseño de Máquinas. Robert L. Norton

Tabla 7. Tipos de Apoyo

TIPO DE APOYO	C
Redondo –Redondo	1
Articulada –Articulada	1
Fija – Libre	2.1
Fija – Articulada	0.8
Fija – Fija	0.65

Fuente: Diseño de Máquinas. Robert L. Norton

Para estas dimensiones la relación de esbeltez $S_r = l/k$ tiene un valor de 4.2038, lo cual indica que este tipo de columna corresponde a una columna corta. Aunque para este caso no es necesario el cálculo de la carga crítica de pandeo, al encontrar su valor se ve que está muy por encima del valor de la carga, es decir, $P_{pand} < P$, por tal razón la columna no sufrirá pandeo.

Es razonable que no solo la columna de longitud L y diámetros externo (D_ext) e interno (D_int) que se acabó de calcular se va a deformar, los soportes y las reducciones de área también lo harán y para calcular las deformaciones se realiza el mismo procedimiento anterior pero en este caso se busca que las deformaciones esperadas sean mucho menores que en la columna, esto en razón de concentrar todos los esfuerzos que genera la carga sobre dicha columna.

3.3.1.2 Soportes. Con las dimensiones mostradas en la **figura 6**, se tiene que la dimensión S del apoyo se tomó de 21mm, y un diámetro D_a=50mm, que generaban una deformación de 0,000236149 mm, muy por debajo de la deformación que se espera en la columna. De nuevo esta es una columna corta y por tanto no sufrirá pandeo.

3.3.1.3 Reducción. La reducción de área mostrada en la figura 6, tiene un especial tratamiento debido a que a lo largo de su longitud el área de sección transversal no es constante. El criterio para el cálculo de la deformación es el mismo usado anteriormente, a diferencia que el principio que se usa es el de dividir esta sección de área variable en muchas otras más pequeñas en las que se pueda tomar el área constante. Es decir:

$$dL = \epsilon * dx = \frac{P dx}{AE}$$

La deformación total ∂ de la reducción se obtiene al integrar esta expresión por la longitud L de la varilla:

$$\partial = \int_0^L \frac{P dx}{AE}$$

Se tiene que el área es función de la variable x, entonces:

$$A = \frac{\pi}{4} (D_{ext\ red} - D_{int})^2$$

Donde el diámetro interno de la probeta (D_{int}) se mantiene constante mientras que el diámetro externo (D_{ext}) es el que varía:

$$D_{ext\ red} = \frac{y}{1.78} + D_{ext}$$

Realizando la integral se tiene que la deformación esperada en la reducción de área es de 0.00041367 mm, que de igual forma es muy más pequeña que la de la columna.

Todo el procedimiento anterior está compactado en un programa GUIDE de Matlab, además de incluir todo el diseño cinemático, haciendo más sencilla la comparación entre los resultados que se esperan.

3.4 DISEÑO POR CARGA DINÁMICA (FATIGA)

Ya que el sistema de bombeo mecánico permanece en funcionamiento todo el tiempo, y la celda de carga estará montada de tal forma que siempre estará a compresión en todo instante, ya sea al final de la carrera ascendente o descendente, debido a la disposición en la que está sujeta (véase capítulo 2.1).

Ya que la sarta de varillas tiene un peso fijo, se encuentra a tensión junto con la barra pulida, y que es la carrera ascendente del flujo quien varía la carga en la barra pulida (al transportar el flujo de crudo) y que por medio de la grapa es transmitida a la celda, habrá una variación en la presión ejercida sobre la celda que se repetirá en cada stroke, aproximadamente 15 strokes por minuto, esto hace que la celda de carga esté sometida a muchos ciclos e incitándola a fallar por fatiga, por tal razón se debe tener en cuenta el diseño por fatiga.

El diseño por fatiga incluye diferentes consideraciones que serán nombradas a continuación y que fueron incluidas en el software desarrollado en Matlab para facilitar su comparación frente a varias geometrías posibles.

En esta sección se describen algunos de los factores que disminuyen la resistencia a la fatiga como son la fatiga en ciclos altos, límite de resistencia a la fatiga, factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga, concentradores de esfuerzos, finalmente el diagrama de Goodman modificado.

3.4.1 Fatiga en ciclos altos. Como se indica en la figura 25, la fatiga en ciclos altos es la región que corresponde a valores superiores a $N = 10^3$ ciclos de esfuerzo, así con 15 strokes por minuto aproximadamente, y un límite teórico de ciclos de vida resistente a la fatiga de 10^6 la celda de carga podría soportar 10 años en constante funcionamiento antes de llegar a fallar por fatiga.

De acuerdo a los materiales usados, las pruebas realizadas y los límites en las propiedades de cada material como son el módulo de elasticidad y el límite de fluencia, quienes restringen en primera estancia el diseño geométrico de la celda de carga, esto debido a la carga para la cual es diseñada (10000 lb), el diseño estático la posibilidad de fluencia gobernó las decisiones de diseño en esta región, sin embargo se tuvo presente la posibilidad de una falla por fatiga. (Capítulo 3.4)

Basado en el texto Diseño de Máquinas de Norton el caso de la celda de carga corresponde al diseño para esfuerzos uniaxiales fluctuantes debido a que existe un componente del esfuerzo medio diferente de 0 y la carga es aplicada siempre en la misma y única dirección.

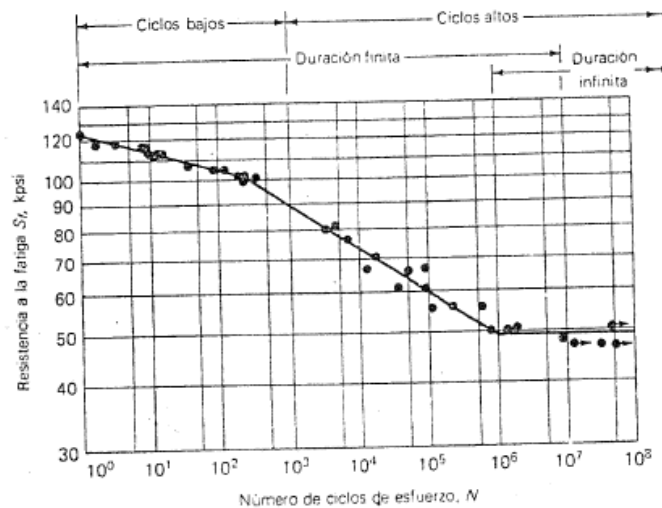
Antes de relacionar directamente el diseño por esfuerzos uniaxiales fluctuantes se deben tener en cuenta los criterios de falla por fatiga como sigue.

3.4.2 Límite de resistencia a la fatiga. La mejor información sobre la resistencia a la fatiga a una cierta vida infinita o su límite de resistencia a la fatiga, proviene de pruebas de ensambles reales o de prototipos de diseño, pero cuando esto no resulta práctico o posible la siguiente mejor información proviene de las pruebas de especímenes tomados del material particular, como son fabricados para la pieza (es decir, como se vacían, forjan, se maquinan, etc.). De no poder tener esto se recurre a efectuar una estimación del límite de resistencia a la fatiga con base a información monótonica del material como es el valor de la resistencia máxima S_{ut} y el límite elástico S_y .

$$\text{Acero: } \left\{ \begin{array}{l} S_{e'} \cong 0.5S_{ut} \quad \text{para } S_{ut} < 200 \text{ ksi (1400 MPa)} \\ S_{e'} \cong 100 \text{ Ksi} \quad \text{para } S_{ut} \geq 200 \text{ Ksi (1400 MPa)} \end{array} \right.$$

En la figura 25 se muestra un diagrama S-N, esfuerzo contra número de ciclos, en el cual se identifica el límite de resistencia a la fatiga, la línea casi horizontal, donde se espera que la celda tenga un punto infinito de ciclos de trabajo sin que llegue a la falla.

Figura 25. **Diagrama S-N**



Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica – Joseph Edward Shigley.

3.4.3 Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga. Al ser tomados los datos de experimentos que se basan en pruebas estáticas deben modificarse para tomar en consideración las diferencias físicas entre el espécimen de prueba y la pieza real que se está diseñando, por tal razón son aplicados ciertos factores que consideran las diferencias del entorno y las diferencias de temperatura entre las condiciones de prueba y las condiciones reales. También se tomaron en cuenta las diferencias en la manera de aplicar la carga. Estos y otros factores se tomaron en cuenta para estimar la resistencia a la fatiga o el límite de resistencia a las fatigas corregidas.

$$S_e = C_{carga} C_{tamaño} C_{superficie} C_{temperatura} C_{confiabilidad} S_{e'} \quad []$$

Tal y como se muestra en la ecuación son diversos factores los que se incorporan para la estimación del límite de resistencia a la fatiga, cabe resaltar que se estimara el límite de resistencia a la fatiga para vida infinita.

3.4.3.1 Efectos de la carga

Flexión: $C_{carga} = 1$

Carga axial: $C_{carga} = 0.85$

Estos datos corresponden a información obtenida de Diseño de Máquinas Robert L. Norton, pero teniendo en cuenta investigaciones realizadas en la escuela de ingeniería mecánica información más detallada sobre el análisis de fatiga en el libro Fatiga. Fisura progresiva de Alfredo Parada Corrales aparecen datos más específicos para el análisis de fatiga a compresión.

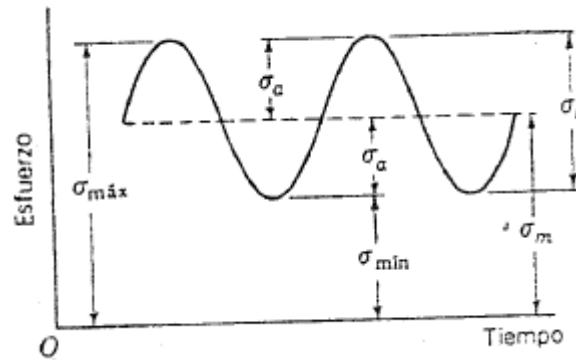
De esta manera:

Para cargas simples o combinadas que produzcan esfuerzos REVERSIBLES, donde el esfuerzo medio es $\sigma_{medio} \leq 0,5$ del esfuerzo alterno $\sigma_{alterno}$ el factor de carga es $C_{carga} = 0,8$.

Para cargas simples o combinadas que produzcan esfuerzos REPETITIVOS, donde el esfuerzo medio es $\sigma_{medio} > 0,5$ del esfuerzo alterno $\sigma_{alterno}$ el factor de carga es $C_{carga} = 1,2$.

La figura 26 muestra la forma del esfuerzo fluctuante, téngase en cuenta que esta gráfica representa el esfuerzo a tensión más no a compresión.

Figura 26. **Esfuerzos fluctuantes a tensión.**



Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica – Joseph Edward Shigley.

Sin embargo Norton no tiene en cuenta que la carga axial aplicada está en compresión constantemente, de esta manera y guiados por el texto FATIGA, fisura progresiva de Alfredo Parada Corrales.

Se tiene que para cargas axiales simples o combinadas que produzcan esfuerzos repetitivos donde el esfuerzo medio es mayor que 0,5 del esfuerzo alterno el factor de carga es 1.2.

3.4.3.2 Efectos Dimensionales. Las piezas mayores fallan a esfuerzos mayores, debido a una mayor probabilidad que en el volumen más grande bajo esté presente defecto. Para más información ver anexo C.

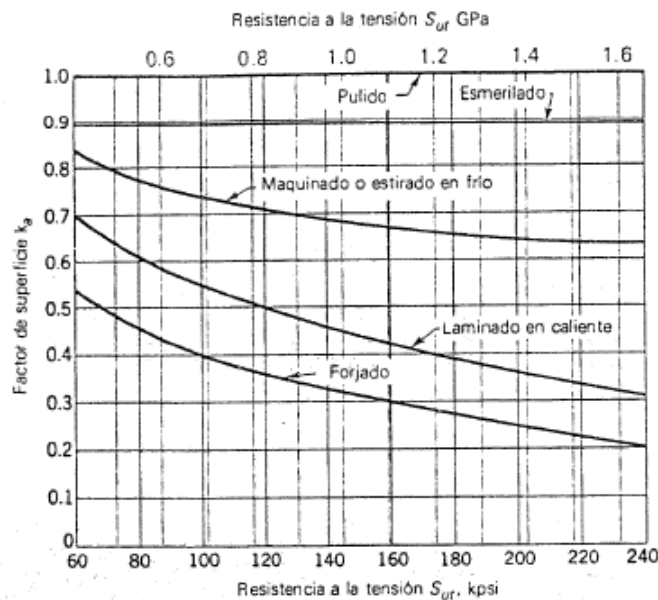
Para $d \leq 0,3 \text{ in (8mm)}$ $C_{\text{tamaño}} = 1$

Para $0,3 \text{ in} \leq d \leq 10 \text{ in}$ $C_{\text{tamaño}} = 0,869d^{-0,097}$

Para $d > 10 \text{ in}$ $C_{\text{tamaño}} = 0,6$

3.4.3.3 Efectos Superficiales. El acabado superficial influye en concentradores de esfuerzos que representarán posibles puntos de falla, por eso un acabado espejo omitiría tales probabilidades pero en función del costo de generar tal acabado se necesita un factor de reducción de resistencia $C_{superficie}$. La figura 27 muestra el factor de superficie en función del tipo de acabo de la celda de carga.

Figura 27. Factores de modificación de acabado superficial.



Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica – Joseph Edward Shigley.

3.4.3.4 Efectos de Temperatura. A bajas temperaturas la tenacidad a la fatiga se reduce y a temperaturas moderadas altas (350°C) se incrementa. Shigley propone varias ecuaciones para tomar en consideración la reducción del límite de resistencia a la fatiga a temperaturas moderadamente altas:

Para $T \leq 450^{\circ}\text{C}$

$$C_{\text{temperatura}} = 1$$

Para $550^{\circ}\text{C} \leq T \leq 450^{\circ}\text{C}$

$$C_{\text{temperatura}} = 1 - 0,0059(T - 450)$$

Estas ecuaciones se usan para aceros únicamente con el empleado tanto en los prototipos de celda como en la celda final.

3.4.3.5 Confiabilidad. Existe una dispersión en los valores de un mismo material generados en cada prueba, aunque se dice que las desviaciones estándar de la resistencia a la fatiga no exceden el 8% sobre sus valores medios. En la siguiente tabla 8 se muestran los factores de confiabilidad para una desviación estándar supuesta del 8%.

Tabla 8. Factores de confiabilidad.

Confiabilidad R	Variable estandarizada z_r	Factor de confiabilidad k_c
0.50	0	1.000
0.90	1.288	0.897
0.95	1.645	0.868
0.99	2.326	0.814
0.999	3.091	0.753
0.999 9	3.719	0.702
0.999 99	4.265	0.659
0.999 999	4.753	0.620
0.999 999 9	5.199	0.584
0.999 999 99	5.612	0.551
0.999 999 999	5.997	0.520

Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica – Joseph Edward Shigley.

Finalmente para el AISI 420

$$S_e' = 0,5 S_{ut} = 0,5 \times 123,821 = 61,611 \text{ ksi}$$

$$S_e = C_{carga} C_{tamaño} C_{superficie} C_{temperatura} C_{confiabilidad} S_e'$$

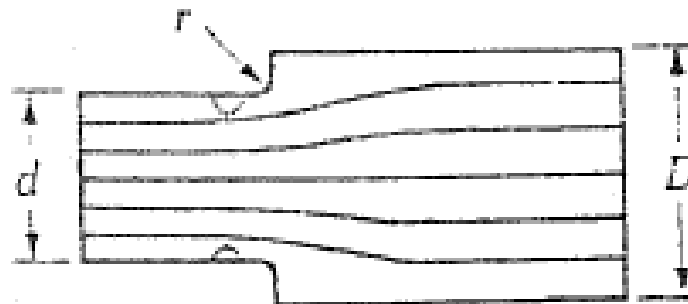
$$S_e = 1,2 \times 1 \times 0,7336 \times 1 \times 0,8140 \times 61,611$$

$$S_e = 44,15 \text{ ksi}$$

3.4.4 Concentradores de Esfuerzos. Los concentradores de esfuerzos están representados por contornos geométricos que dificultan el “flujo de fuerza” (figura 28) a través de la pieza. Haciendo de estos contornos muy probables puntos de localización de una falla. De esta manera a este factor, el cual disminuye el límite de resistencia a la fatiga o aumenta el esfuerzo producido, se le denomina factor de concentración de esfuerzo en el caso de fatiga (K_f).

De igual manera se tiene que q representa una sensibilidad a las muescas y es definida como sigue.

Figura 28. Línea de flujo de fuerzas en un eje sometido a tensión.



Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica – Joseph Edward Shigley.

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

Sin embargo los concentradores de esfuerzos vienen definidos desde el análisis estático que de acuerdo a la geometría de la celda de carga se tiene que la figura 28 muestra los factores a tener en cuenta para determinar el factor de concentración de esfuerzos estático K_t .

Varios puntos se reiteraron antes de aplicar el factor de corrección de concentración de esfuerzos para predecir el límite de resistencia a la fatiga.

- ✓ Los diagramas simplificados de factores de concentración de esfuerzos.
- ✓ K_t y K_f son valores teóricos.
- ✓ La concentración de esfuerzo es un efecto altamente localizado.
- ✓ K_t y K_f no necesitan ser aplicados en el caso de esfuerzos estáticos en materiales dúctiles, pero si deben emplearse en materiales de alta resistencia, baja ductilidad, endurecimientos superficiales y/o trabajados en frío intensamente.

A partir de la tablas de constantes de Neuber para aceros (se incluye la tabla para el Aluminio) y la sensibilidad a las muescas, para la celda de carga en AISI 420.

$$K_f = 1,5909$$

3.4.5 Diagramas S-N. Al generar dichos criterios los diagramas de S-N estimados (esfuerzo – ciclos) fueron generados a partir de la información de cada material; todo el procedimiento es compactado en el software diseñado en Matlab, el diagrama del AISI 420 sometido a 10.000 lb se muestra en la figura 17.

De donde:

$$S_e = 44.1731 \text{ ksi}$$

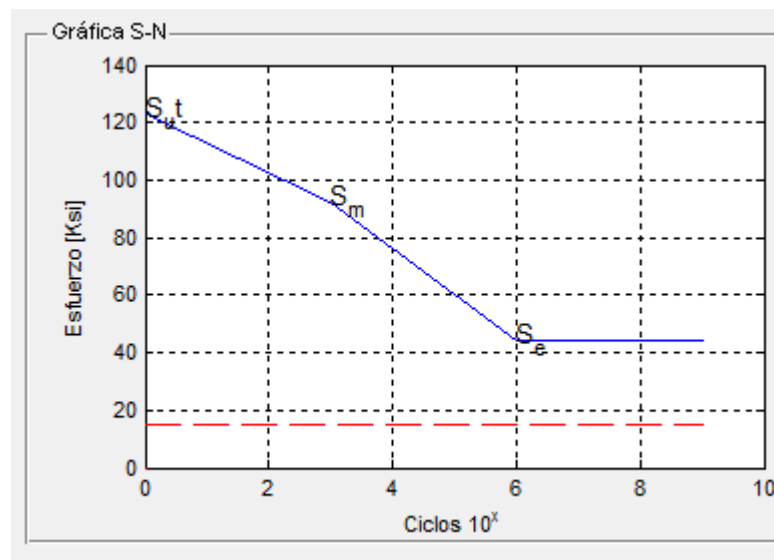
$$S_{ut} = 123282.1 \text{ psi}$$

$$S_m = 0,75S_{ut} \quad []$$

Para el AISI 420 $S_m = 0,75S_{ut} = 0,75 \times 123282.1 = 92461,57 \text{ psi}$

El límite de resistencia a la fatiga fue calculado en el capítulo 3.5.3 y el S_{ut} corresponde al esfuerzo último a tracción del AISI 420.

Figura 29. **Diagrama S-N**



Fuente: Autores

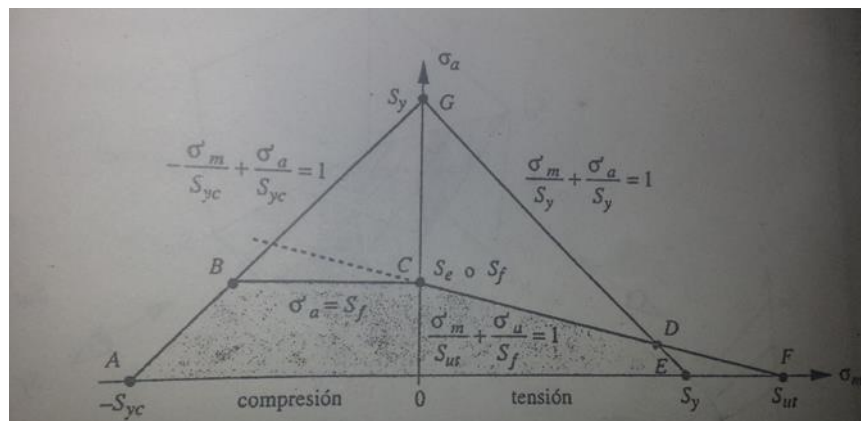
Así la línea azul, a simple vista horizontal muestra el límite de resistencia a la fatiga para vida infinita, esta es definida para 10^6 ciclos, para el caso del AISI 420 y con las dimensiones ya calculadas el límite de resistencia a la fatiga es de

44.1731 ksi, cualquier valor de esfuerzo por debajo de este valor garantizará vida infinita en la celda de carga.

Sobre la línea $S_m S_e$ y de acuerdo al valor de ciclos definido existirá un valor del límite a la resistencia a la fatiga S_n definido con la ecuación $S_n = aN^b$ donde a y b son definidas con condiciones de frontera, sin embargo el diseño de la celda estará definido en 10^6 ciclos para garantizar vida infinita de la misma.

3.4.5 Diagrama de Goodman Modificado. Formado por el componente alternante del esfuerzo $\sigma_{\text{alternante}}$ y esfuerzo medio σ_{medio} y el número de ciclos N, están incluidas las líneas de fluencia y la región de esfuerzos a compresión. El área ABCO mostrada en la figura 18 detalla en área segura a compresión en el diagrama de Goodman modificado. Teniendo la línea CB horizontal más conservadora que con el corte en el eje en S_{ut} se ignoran los beneficios del esfuerzo medio a compresión y se considera esta situación totalmente idéntica al caso totalmente alternante.

Figura 30. **Diagrama de Goodman modificado.**



Fuente: Diseño de Máquinas. Robert L. Norton.

Así la línea AG define la fluencia a compresión, la línea BC define la falla por fatiga por esfuerzos medios a compresión y la línea CF la falla por esfuerzos medio a tensión. De esta manera cualquier combinación de esfuerzo alternante y medio que caiga en el área ABCDEA resultara segura.

La línea de Goodman modificada es un criterio de fallas más conservador y de uso más común, al diseñar piezas sujetas a esfuerzos medios, además de alternantes.

El punto en el que se encuentra la celda de carga con las dimensiones calculadas corresponde a un esfuerzo alterno de 24143.8 psi y un esfuerzo medio de 48287.6 psi.

$$\sigma_{\text{alterno}} = \frac{\sigma_{\text{carga}} - \sigma_{\text{min}}}{2}$$

$$\sigma_{\text{carga}} = \frac{\text{Load}}{\text{Área}} = \frac{15000}{0.329467} = 45528.1 \text{ psi}$$

$$\sigma_{\text{min}} = \frac{\text{Load}}{\text{Área}} = \frac{5000}{0.329467} = 15176,02 \text{ psi}$$

$$\sigma_{\text{alterno}} = 15176,04 \text{ psi}$$

El concentrador de esfuerzos dinámico modifica el esfuerzo alterno ampliándolo en busca de asegurar el esfuerzo extra que se generará en el movimiento constante al que estará sometido la celda de carga. Este concentrador es calculado a partir de tablas y es especificado líneas atrás:

$$\sigma_{\text{alterno-din}} = K_f \sigma_{\text{alterno}} = 1,5909 * 15176,04 = 24143,56 \text{ psi}$$

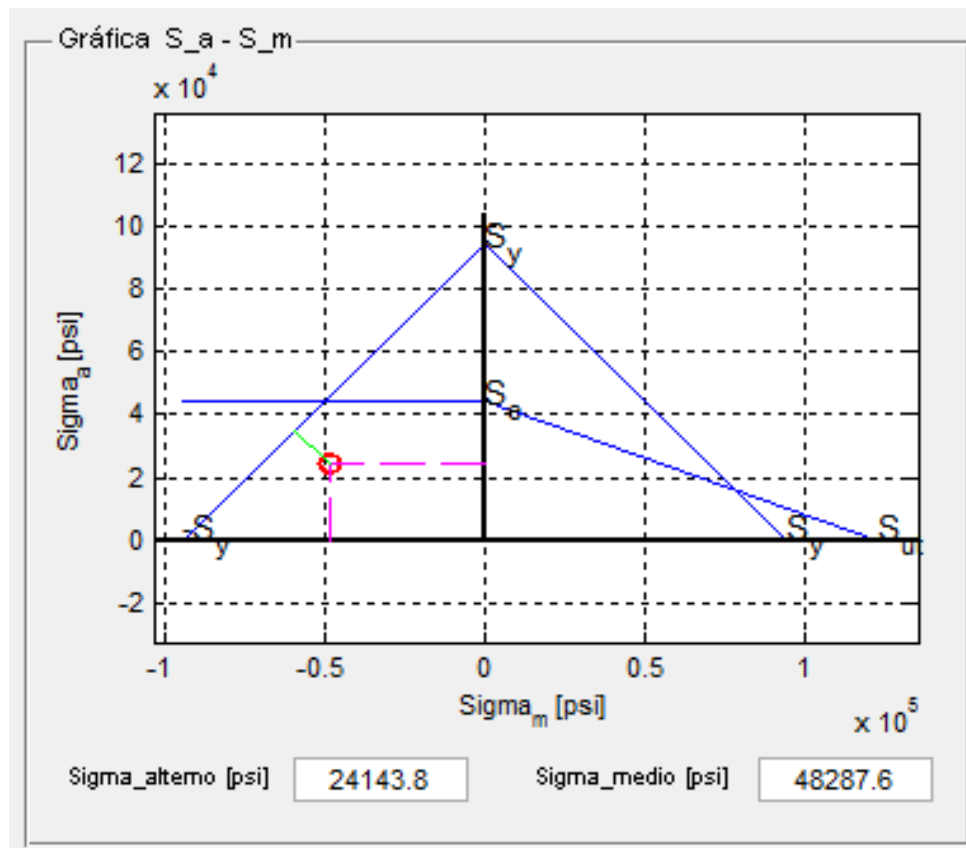
De la misma manera el componente medio es como sigue:

$$\sigma_{\text{medio}} = \frac{\sigma_{\text{carga}} + \sigma_{\text{min}}}{2} = 30352,06 \text{ psi}$$

$$\sigma_{\text{medio-din}} = K_f * \sigma_{\text{medio}} = 48287.6 \text{ psi}$$

De esta manera representando estos componentes en el diagrama de Goodman se obtiene el punto en el cual se encuentra la celda de carga de acuerdo a las condiciones del material, dicha gráfica está representada en la figura 31, estos datos se pueden corroborar en el software desarrollado.

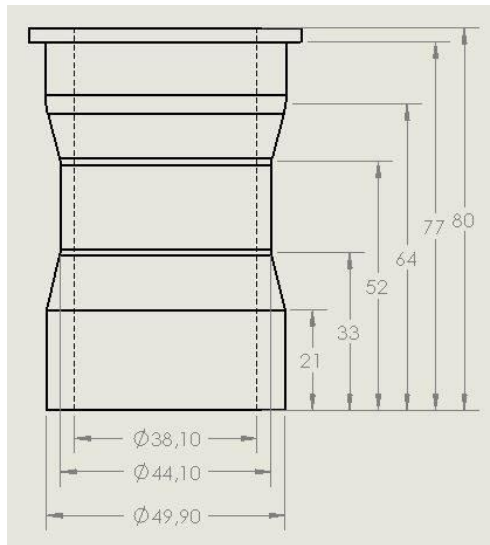
Figura 31. **Diagrama de Goodman modificado**



Fuente: Autores

De esta manera las dimensiones finales de la celda se muestran en la figura 32.

Figura 32. Dimensiones de la celda de carga AISI 420



Fuente: Autores.

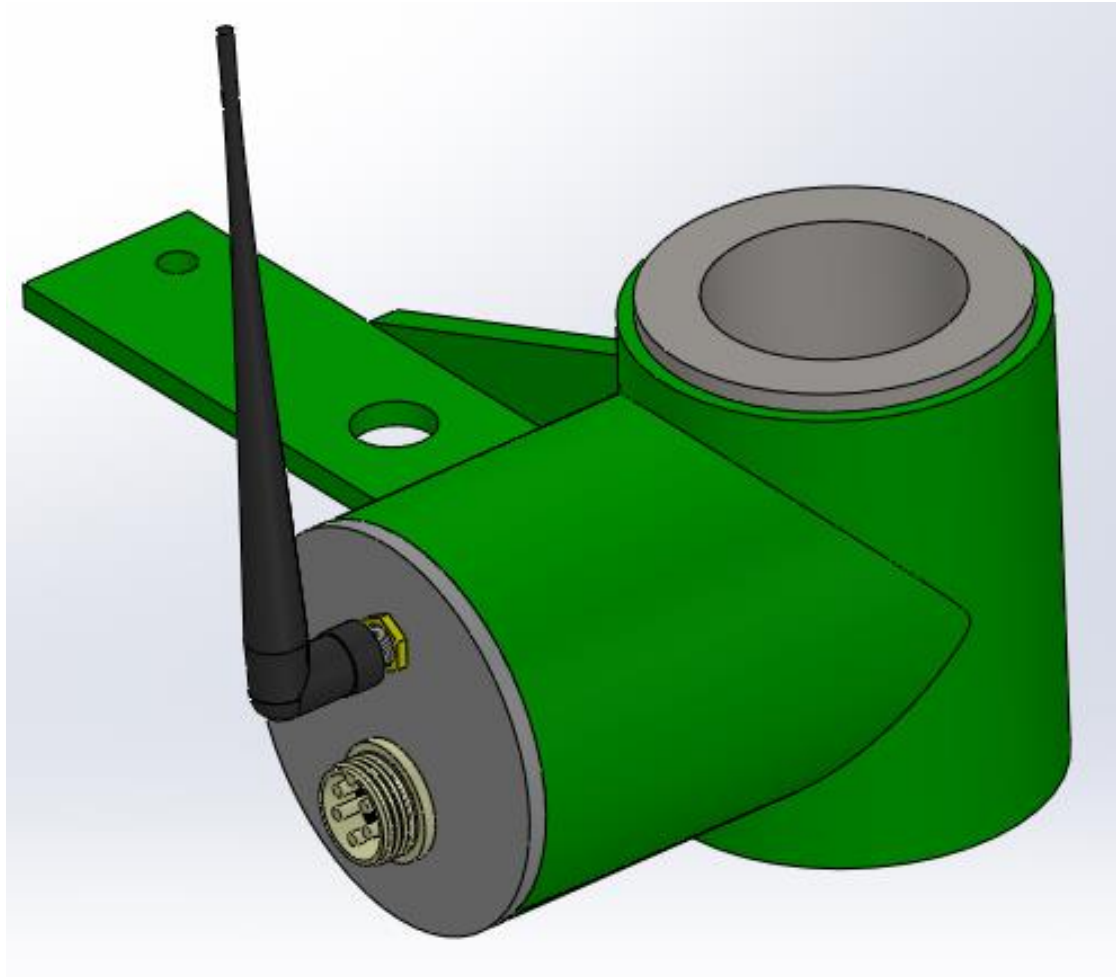
3.5 DISEÑO DE LA CARCASA DE LA CELDA DE CARGA.

La carcasa es un elemento que juega un papel fundamental en la celda de carga, ya que esta es la encargada de proteger y portar el sensor, esta debe cumplir una serie de requisitos como:

- ✓ La necesidad de ubicar el sistema de adquisición de datos cerca de la celda, buscando cumplir ciertos requerimientos para dicha instalación como son el movimiento de dicho sistema de igual forma que la barra pulida, además de la ubicación del integrado que contendrá los diferentes componentes como el acelerómetro, sensor de temperatura, antena receptora, entre otros.
- ✓ Mantener la celda de carga totalmente aislada de los efectos del medio ambiente.

- ✓ Garantizar la protección de las galgas extensiométricas adheridas a la celda de carga y el sistema de adquisición de datos.

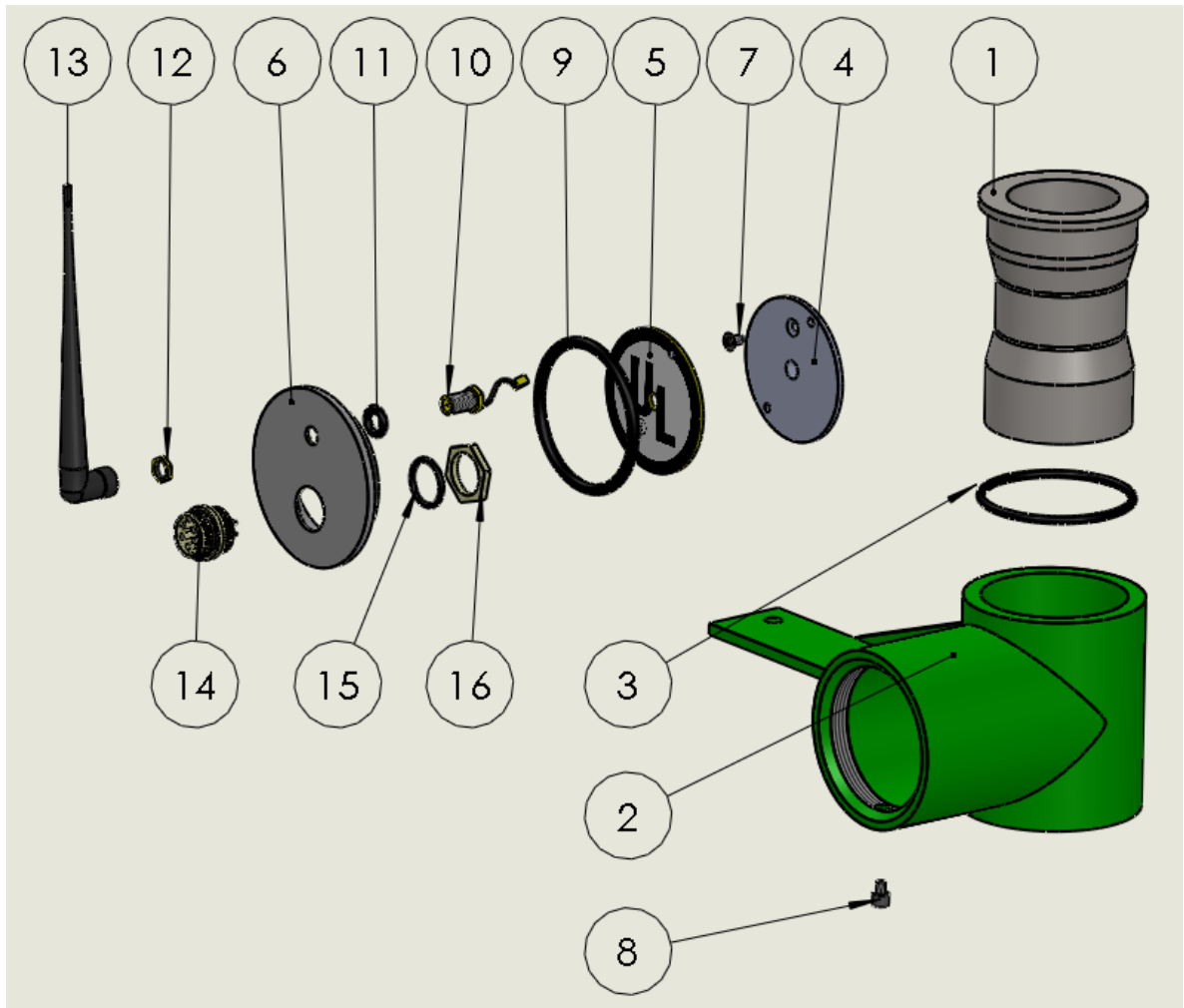
Figura 33. **Vista ensamble celda de carga.**



Fuente: Autores

En busca de lograr dichos requerimientos se planteó la geometría mostrada en la figura 34, esta figura muestra una vista explosionada del ensamblaje entre la celda y la carcasa y sus diferentes partes.

Figura 34. Vista explosionada ensamble celda-carcasa.



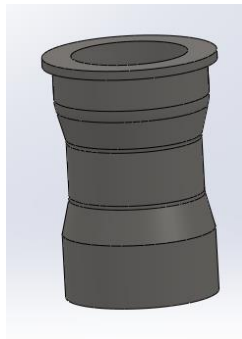
Fuente: Autores.

1. Celda de carga.
2. Carcasa.
3. Oring celda.
4. Soporte Integrado.
5. Circuito electrónico.
6. Tapa Integrado.
7. Tornillo avellanado 3mm.

8. Tornillo asegurador tapa-carcasa.
9. Oring asegurador tapa-carcasa.
10. Conector Antena.
11. Oring para conector antena.
12. Tuerca para conector de antena.
13. Antena.
14. Conector energía y datos.
15. Oring de conector energía y datos.
16. Tuerca Conector energía y datos.

3.5.1 Celda de carga. Como primera instancia se tiene el transductor, el elemento principal del proyecto, como se ha visto anteriormente este es el encargado de sensar la fuerza y convertirla en una señal eléctrica para que luego sea leída por un equipo de adquisición de datos ver anexo F.

Figura 35. **Geometría de la Celda.**



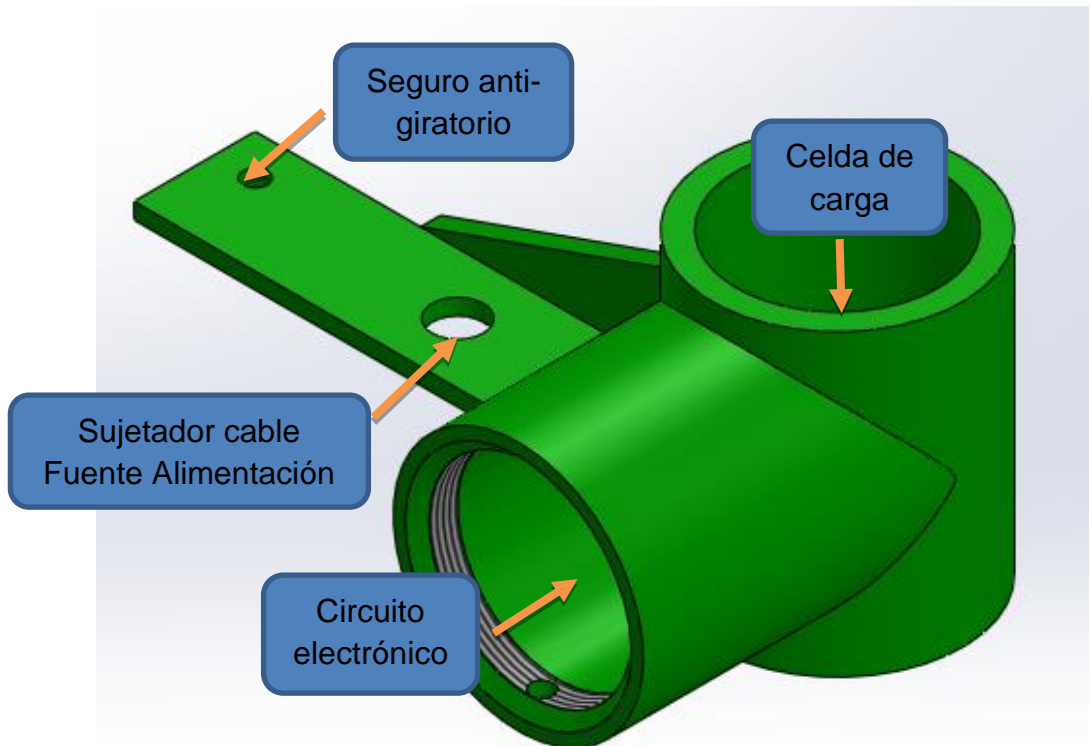
Fuente: Autores

3.5.2 Carcasa. El diseño mostrado en la figura 36, muestra la ubicación de la celda de carga la ubicación del circuito electrónico que conforma el sistema de adquisición de datos. De esta manera el sistema de adquisición de datos tendrá la

disposición necesaria para su funcionamiento dentro de la carcasa, mientras que la celda de carga también tendrá la suya.

También se tiene una aleta con dos agujeros, el agujero más grande tiene la función de sujetar el cable de datos y alimentación de la celda de carga, y el agujero pequeño es para sujetar la celda de carga a una de las guayas que unen el cabezal de la bomba con la brida, con el propósito de que el sensor no gire cuando el sistema esté en funcionamiento.

Figura 36. **Carcasa.**

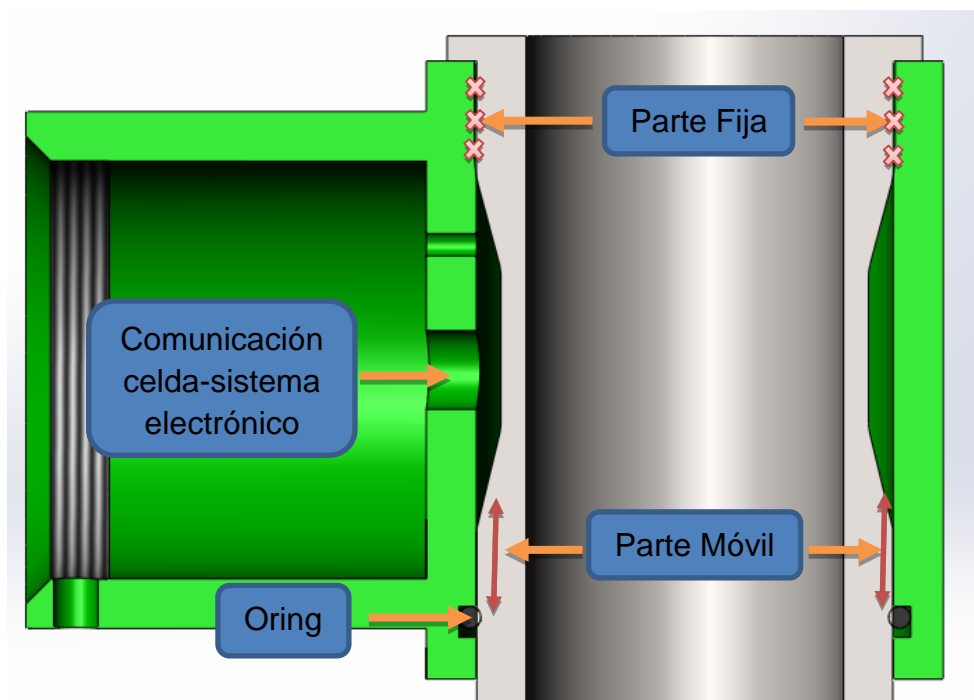


Fuente: Autores.

El Diseño de esta carcasa permite una completa hermeticidad, protegiendo al sistema electrónico y a las galgas de las condiciones ambientales que podrían causar daños al sistema.

La celda de carga como ya se sabe es un sensor que trabaja a compresión, y que debido a la fuerza aplicada esta debe deformarse proporcionalmente, lo cual es un problema a la hora de instalar una carcasa, ya que esta debe proporcionar además de hermeticidad, la capacidad de que la celda de carga también se deforme con la carga.

Figura 37. Vista en corte ensamble de carcasa y celda de carga



Fuente: Autores

La figura 37 muestra la celda de carga en ensamble con la carcasa, como se observa, la celda tiene una parte móvil y una fija, la parte fija entre la carcasa y la

celda proporciona hermeticidad y fijación de la carcasa al sensor, y la parte móvil muestra la capacidad de que la celda se deforme cuando esta sea sometida a alguna carga, además hay un Oring proporciona la hermeticidad y así proteger el sistema interior.

3.5.3 Oring. Un O-Ring es el elemento más accesible y eficaz para dar hermeticidad bajo distintas condiciones de servicio. Sus principales ventajas son:

- Además de sello estático, cuando las piezas tienen movimiento también hace sello dinámico de vaivén, oscilante o rotativo.
- Permite el sellado en todas las direcciones, radial, axial u oblicua.
- Sellado de fluidos tanto líquidos como gaseosos.
- Cierran en un amplio rango de presiones, temperaturas y tolerancias.
- Una vez instalados no requieren de ajustes durante su tiempo de vida útil.
- Son de peso reducido y requieren muy poco espacio, permitiendo un diseño muy compacto.

3.5.3.1 Diseño del alojamiento. El sellado del O-Ring se realiza mediante la deformación de su sección "W", obtenida a través de un correcto diseño de su alojamiento

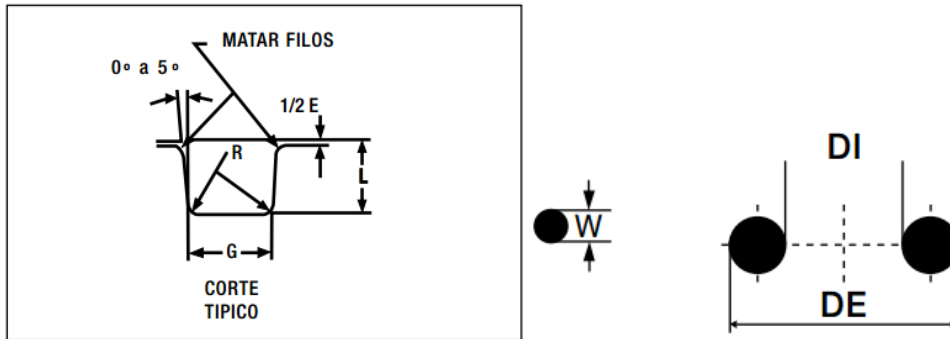
Se seleccionó un Oring marca Parker con las siguientes especificaciones:

W= 2.62 mm

DI= 48.90 mm

DE= 54.14 mm

Figura 38. Alojamiento y especificaciones del Oring



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

Después de seleccionar y ver las especificaciones del Oring se pasó a la tabla de diseño del alojamiento para el oring donde se obtuvieron las dimensiones L, G y R.

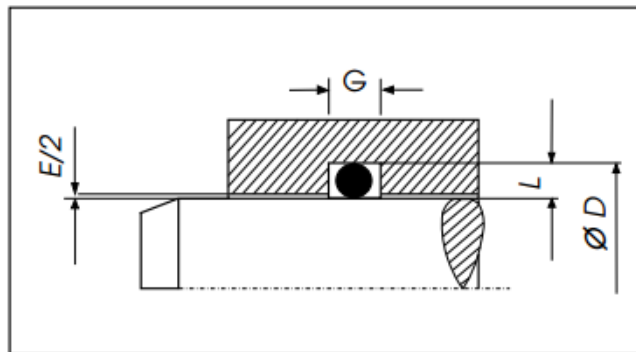
Tabla 9. Diseño de alojamiento de Oring

TABLA DE DISEÑO				
Secc. "W"	Dimensiones de Alojamiento			
	Profundidad "L"		Ancho "G" ± 0.1	Radio "R"
	Estático	Dinámico		
1.78	1.25 1.35	1.40 1.45	2.5	0.1 0.4
2.62	2.05 2.15	2.25 2.30	3.7	0.1 0.4
3.53	2.80 2.95	3.05 3.10	4.9	0.2 0.6
5.33	4.30 4.50	4.65 4.75	7.3	0.5 1.0
6.99	5.75 5.95	6.00 6.10	9.7	0.5 1.0

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

Para una sección W de 2.62 mm según la tabla 9 se tiene una profundidad L de 2.05 mm para una operación estática, un ancho G de 3.7 y un R de 0.1, según la figura 39 donde se muestra el montaje del Oring el diámetro DE del Oring debe ser mayor o igual al diámetro D .

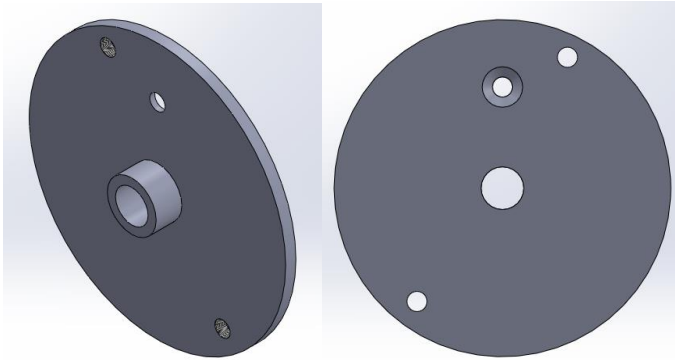
Figura 39. **Sello de vástago – deformación radial**



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

3.5.4 Soporte del Integrado. Está constituido por una placa circular con dos orificios en determinados puntos debido a la disposición del integrado electrónico para mantener fijo el mismo, además de un buje hueco en el centro para ser fijado a la carcasa de la celda, es hueco debido a que los cables provenientes de las galgas tendrán que pasar a través de este para ser fijados al integrado figura 40. Soporte del Integrado.

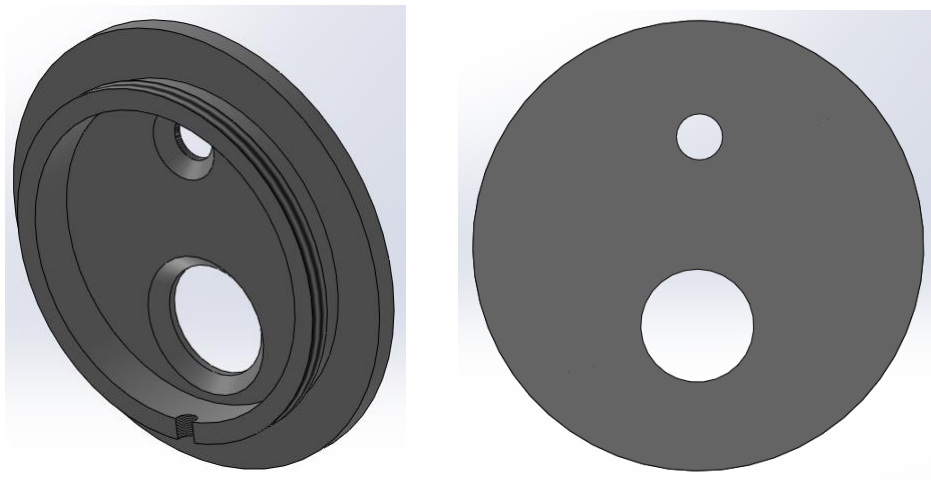
Figura 40. **Soporte del Integrado**



Fuente: Autores.

3.5.5 Tapa del integrado. Esta tapa cumple la función de aislar el sistema electrónico del exterior, además de esta tiene al función de soportar la antena que transmite la información obtenida por la celda en el sistema de adquisición y de igual manera el cable de la fuente de alimentación que usará el integrado.

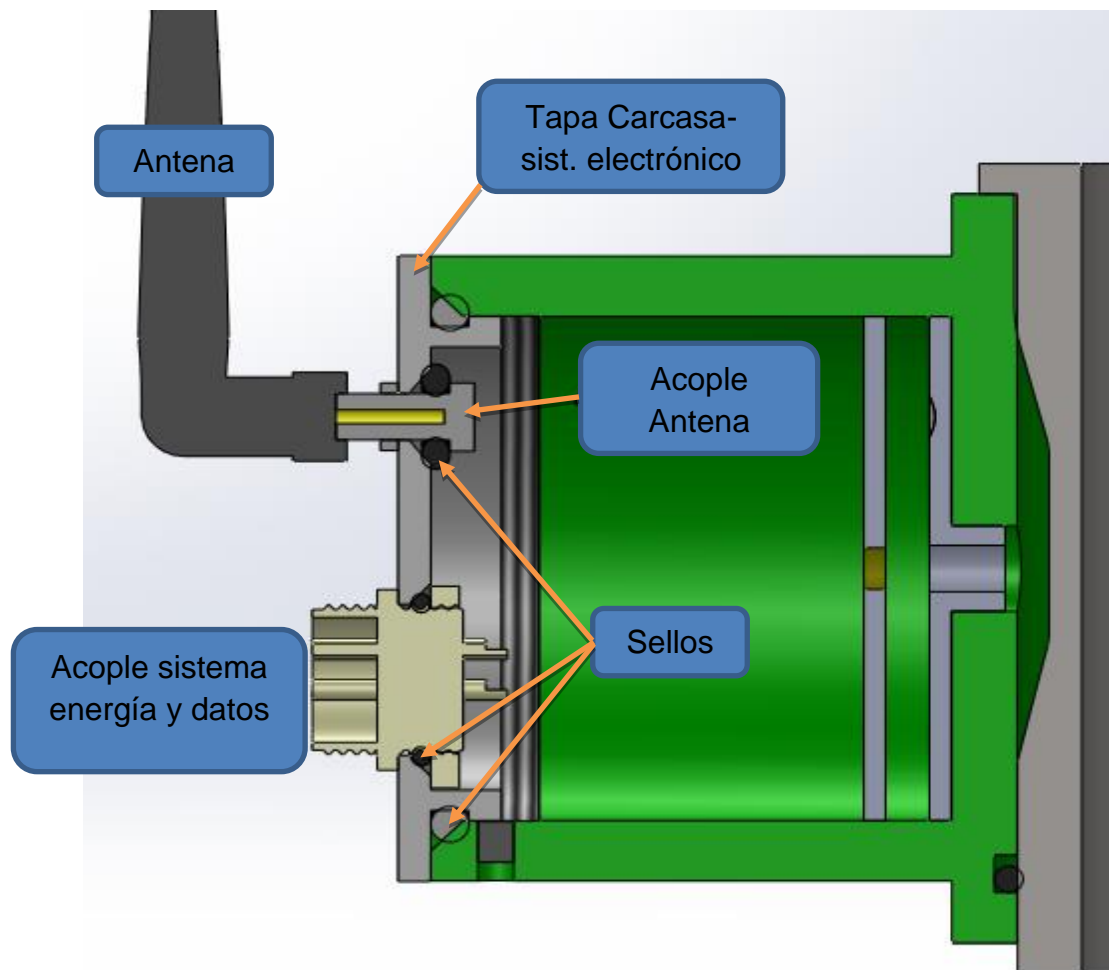
Figura 41. **Tapa del Integrado.**



Fuente: Autores.

Esta tapa tiene una rosca exterior que permitirá fijarla en la carcasa y a su vez un Oring, que hace la función de sello entre la tapa y la carcasa, también se colocaron sellos en los acoples de antena y cable de sistema de energía y datos, garantizando una hermeticidad total en la cámara del circuito.

Figura 42. **Corte carcasa y tapa del circuito**

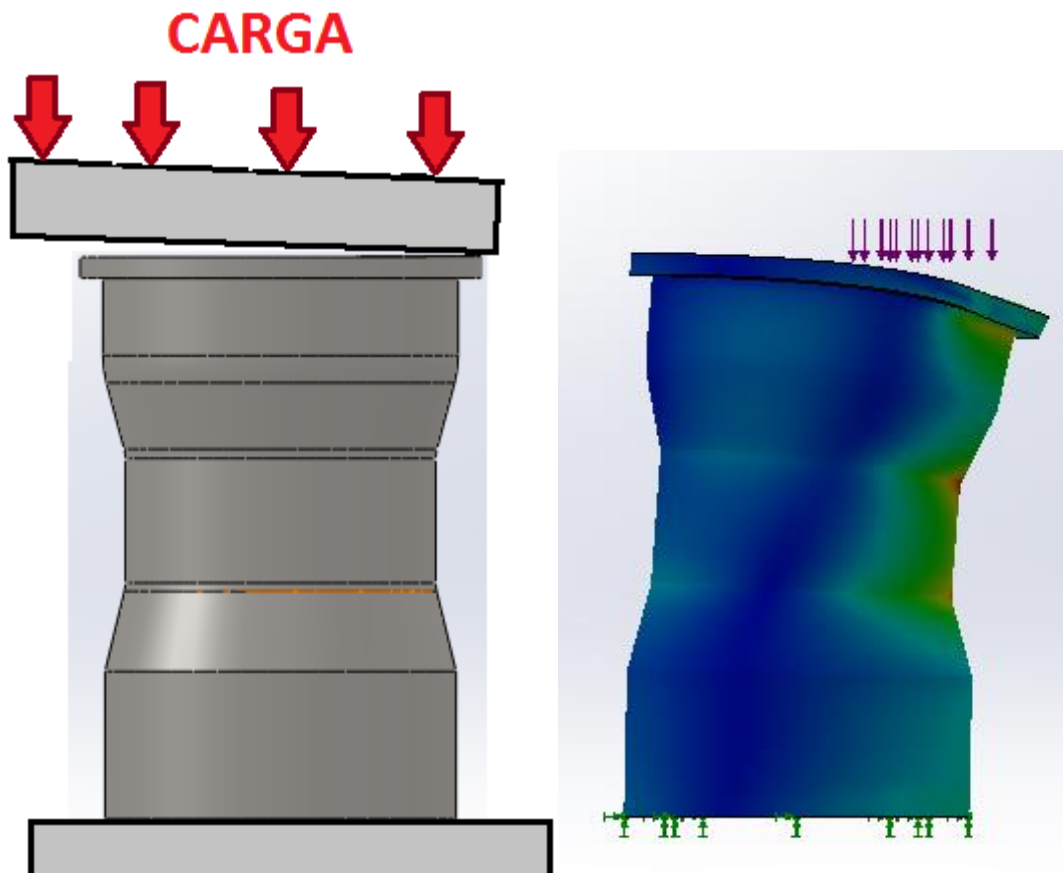


Fuente: Autores

3.6 DISEÑO DE ANILLOS

Según la geometría de la celda de carga, Figura 32 esta está diseñada para que la carga se aplique de manera concéntrica, de modo que toda el área de la estricción de la celda soporte la carga; de no ser así, el área efectiva de la celda de carga sería mucho menor y por tanto haría que esta falle a una carga mucho menor a la que fue diseñada Figura 43.

Figura 43. Aplicación de una carga Excéntrica

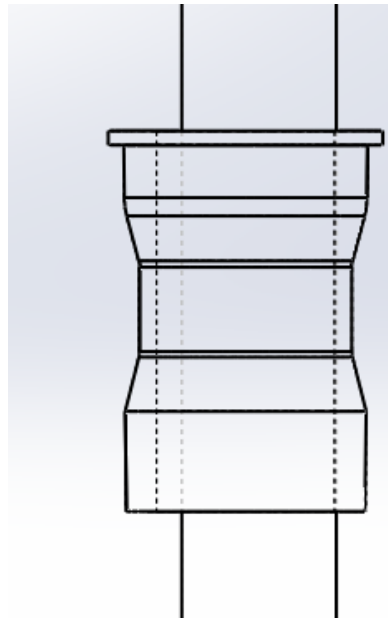


Fuente: Autores

En lugar del montaje de la celda no hay superficies totalmente niveladas, las superficies de la grapa y la brida, lugar donde ira montada la celda de carga, siempre generarán una superficie con inclinaciones que aunque no muy grandes (menores a 3°) provocaran cargas no uniformes en toda el área de la sección transversal de la celda de carga, por tal razón se hace necesaria la corrección de dichas superficie. Con esto en mente se optó por una solución mecánica que permitía corregir el problema en el momento en que se presente dicha desnivelación; permitiendo cierto grado de giro a las bases desniveladas de la celda hasta que debido a la misma magnitud de la carga estas se ubicaran de tal modo que los esfuerzos se distribuyan igualmente en toda la superficie de la celda. Dicho elemento mecánico corresponde a un par de anillos niveladores.

Otro problema presente en el lugar de montaje y que va de la mano con las superficies desniveladas, es la concetricidad de la celda de carga con la barra pulida figura 44.

Figura 44. **Celda de carga en rozamiento con la barra pulida**



Fuente: Autores

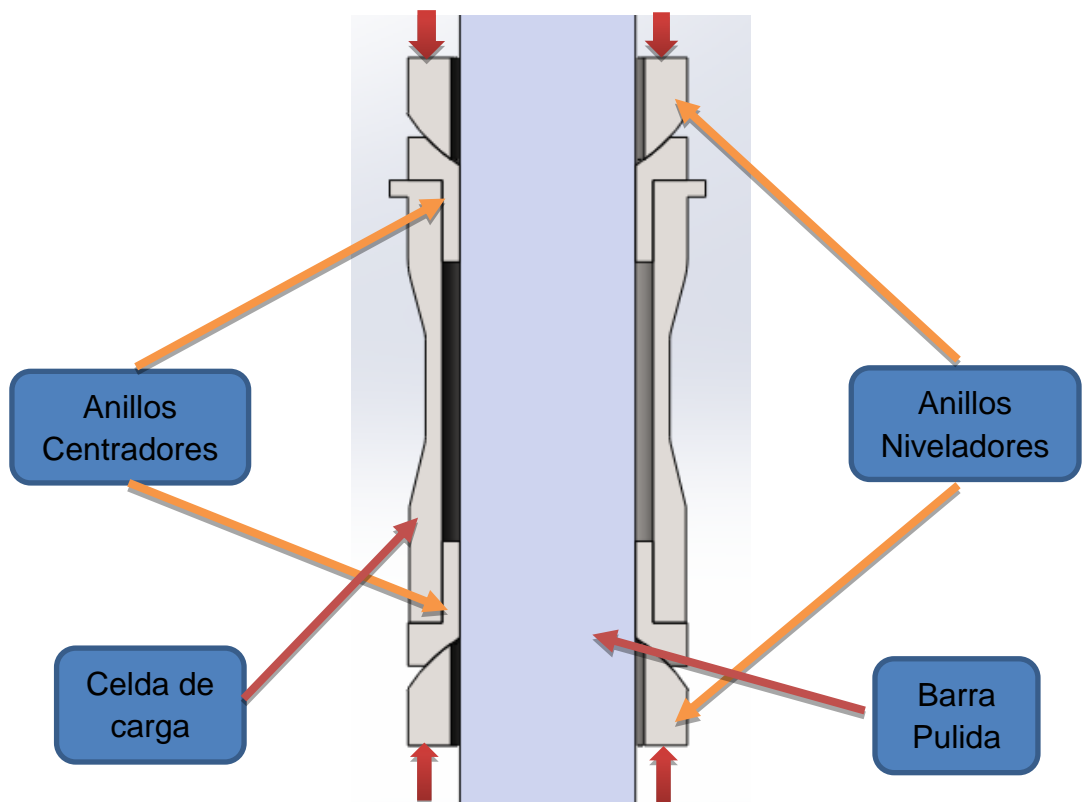
Si la celda de carga y la barra pulida no están totalmente concéntricas, podría pasar que la superficie interna de la celda entre en contacto con la barra pulida y ocurra fricción, ocasionando una lectura errónea en el sensor. Además de combinarse con el problema de la nivelación generando aún un error más grande en la concentración de esfuerzos en la superficie a medir en la celda de carga.

Para corregir estos problemas se diseñaron dos pares de anillo.

- Anillos centradores
- Anillos Niveladores

La geometría de los anillos niveladores

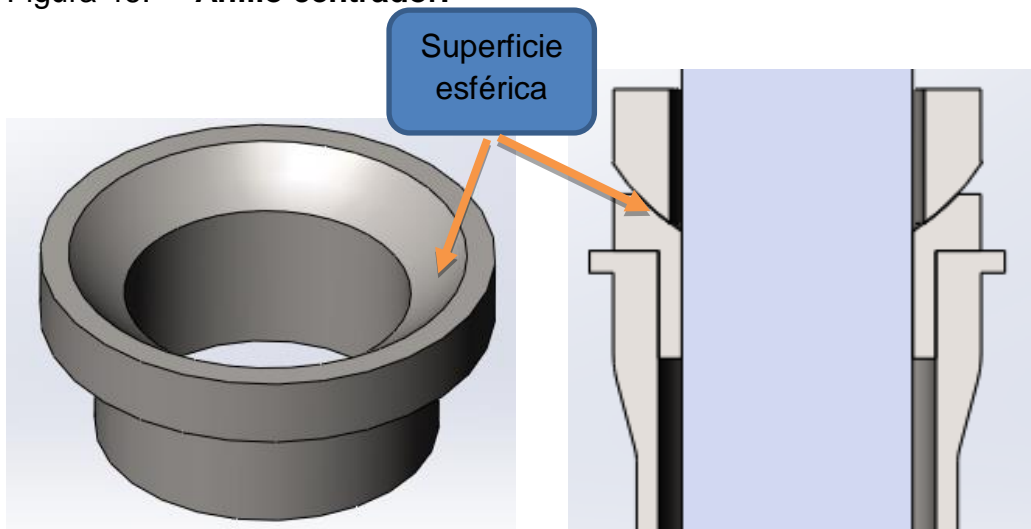
Figura 45. **Ensamble Celda con anillos niveladores y centradores**



Fuente: Autores

3.6.1 Anillos centradores. Estos anillos como su nombre lo dice son los encargados de centrar la celda respecto a la barra pulida; Estos al igual que la celda de carga están expuestos a la corrosión por tal razón fueron fabricados en acero inoxidable figura 46.

Figura 46. **Anillo centrador.**



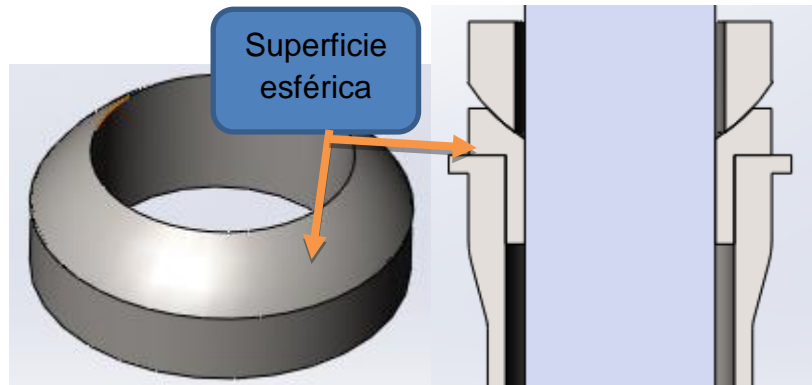
Fuente: Autores

En los anillos centradores su diámetro interior se ajusta al diámetro de la barra pulida, y el diámetro externo con el diámetro interno de la celda de carga con el propósito de que la celda de carga quede lo más concéntrica posible respecto a la barra pulida.

También los anillos centradores poseen una superficie esférica como lo muestra la figura 46, esta superficie se encarga en encajar los anillos niveladores y así juntos hacer la función de rotula.

3.6.2 Anillos Niveladores. Estos anillos tienen la función de nivelar la superficie que aplica la carga y transmitir la misma de forma concéntrica a la celda de carga, manteniendo constante toda el área efectiva.

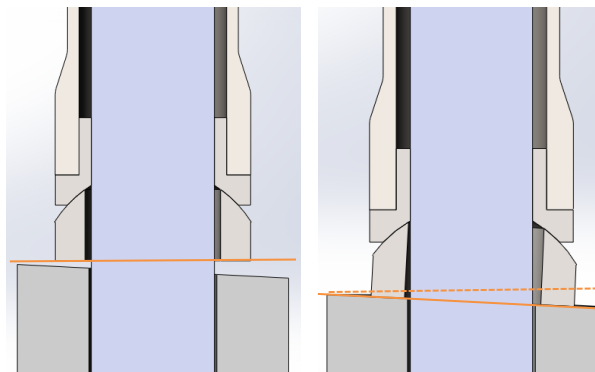
Figura 47. **Anillo nivelador**



Fuente: Autores

Los anillos niveladores tienen la capacidad de rotar hasta que se adapten a la superficie desnivelada gracias a su superficie esférica, como se ve en la figura 48.

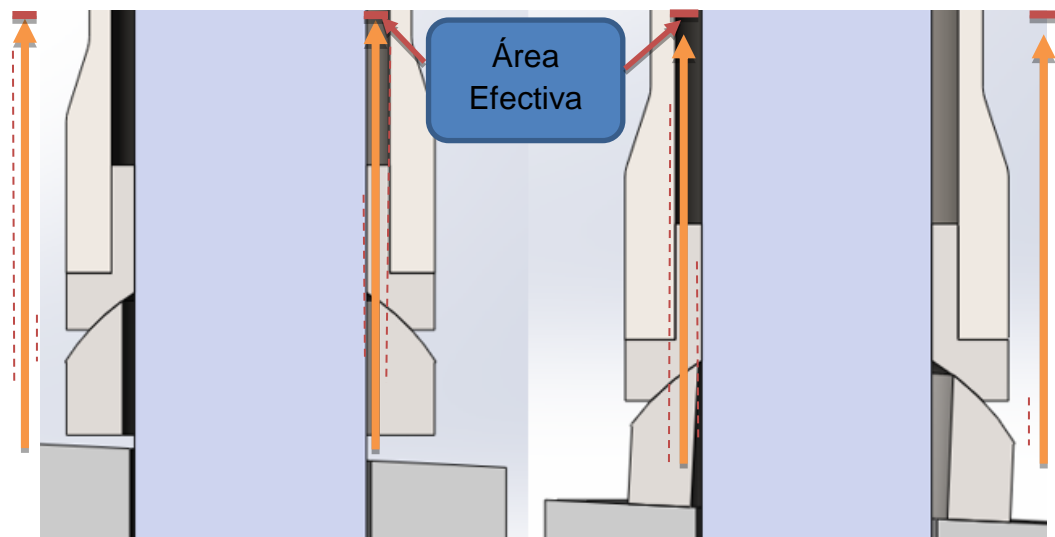
Figura 48. **Adaptación del anillo nivelador a superficies inclinadas**



Fuente: Autores

El proceso de diseño de estos anillos niveladores se realizó gráficamente; como se ve en la figura 49, las condiciones de diseño son dadas por las dimensiones de la celda de carga, la barra pulida y el anillo centrador. Dando como resultado un ángulo de 3.28° de desnivel.

Figura 49. **Transmisión de la fuerza a través de Anillos niveladores**



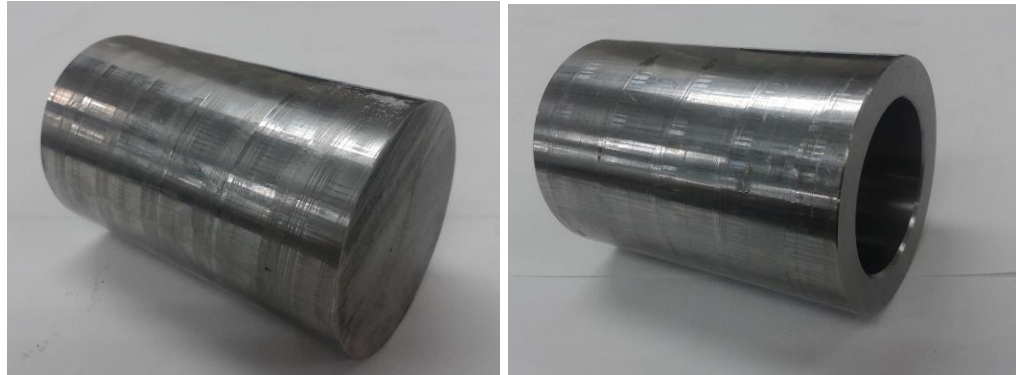
Fuente: Autores.

3.7 CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DE CARGA

El proceso de construcción de la celda de carga empieza desde la adquisición del material, en un principio se debieron comprar las 4 diferentes clases de materiales que se nombraron en el capítulo 3.2 para hacer las respectivas pruebas y llegar a las conclusiones del material óptimo para la celda.

Después de diseñada la celda de carga, se procede a diseñar los procesos de mecanizados para la celda. Por comodidad, la parte hueca se realizó en un torno convencional, mientras que la parte externa por su complejidad se realizó en el torno CNC.

Figura 50. **Parte de mecanizado en torno convencional de la celda.**



Fuente: Autores

Con el material perforado como lo muestra la figura 50, se procedió a hacer el código para su correcto mecanizado en el torno CNC de la parte externa de la celda, dicho programa se realizó en mastercam, software especializado en programación de máquina herramienta CNC.

El material de construcción de la celda de carga es algo caro, además el diseño de la celda es corto y hueco, cosa que no es tan fácil montar en el torno, para solucionar este problema se diseñó una pieza (manguito), figura 51.

Figura 51. **Manguito para montaje de celda en torno CNC**



Fuente: Autores

Este manguito consta de un eje en el cual se monta la celda de carga y como muestra la figura 51, esta se asegura con una tuerca en uno de sus extremos; montada la celda en el manguito se procede a hacer el montaje en el torno CNC para su correcto mecanizado.

Figura 52. **Mecanizado de celda de carga en torno CNC**



Fuente: Autores

4. LOCELL SOFT - SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE CELDA DE CARGA.

Para determinar la geometría óptima evitando que falle por fatiga, cumpliendo con las restricciones del diseño por carga estática y conservando los requerimientos de funcionamiento de las galgas de condesó todo el cálculo en un software desarrollado en Matlab.

El programa incluye todo el procedimiento de cálculo para carga estática y fatiga descrito en la sección 3, este fue diseñado inicialmente de tal forma que se pudiera calcular las dimensiones de la celda de carga para que esta no fallara por carga estática, posteriormente fue editado para lograr el cálculo del límite de resistencia a la fatiga, para tal fin se dejaron las dimensiones de la celda como dato de entrada.

Esta combinación de cálculo para carga estática, el cual se refiere básicamente a evitar que el material sobrepase la zona elástica de deformación, y fatiga, la cual busca obtener un límite de resistencia a la fatiga para vida infinita, se dan resultados tan necesarios como un factor de seguridad global respecto a todos los cálculos realizados, además de un botón que permite recalcular la vida de la celda de carga a partir de un nuevo límite de resistencia a la fatiga dentro del rango seguro (obviamente debe ser menor al que sugiere el programa, ya que este es calculado para 10^6 ciclos, donde se obtiene un régimen de vida infinita a la fatiga). En la figura 53 se muestra la imagen principal del programa en la cual se encuentran tanto la información de entrada como la de salida, además de gráficas que muestran información sobre las dimensiones de la celda, diagramas de información sobre fatiga en el estado en que se encuentra la celda a determinadas condiciones.

Se explicará en detalle el funcionamiento de cada sección del software a continuación.

Figura 53. Software para cálculo de celda de carga

The software interface is titled "Celda de carga" and is divided into several functional areas:

- Datos de Entrada (Input Data):** Includes fields for "Prop. Material" (set to 1), "Material" (AS350N), "Acabado Superficial" (Maqueado), "Rango Temperatura de Operación" (20 to 35), and "Certificabilidad" (99%). A "Gráfica celdas" graph shows a step function representing the load cell geometry.
- Lista de Materiales (Material List):** A table with columns for "Esfuerzo Carga [psi]", "Esfuerzo Min [psi]", "Límite Fluencia [psi]", "Área Estricción [in²]", "Carga Pandeo [lb]", "Módulo Elasticidad [psi]", "Deformación Máx [in]", "Deformación Carga Axial [in]", "MicroStrain", and "Deformación Carga Radial [in]".
- RESULTADOS ESTRICCIÓN (Striction Results):** A table with columns for "Esfuerzo Carga [psi]", "Esfuerzo Min [psi]", "Límite Fluencia [psi]", "Área Estricción [in²]", "Carga Pandeo [lb]", "Módulo Elasticidad [psi]", "Deformación Máx [in]", "Deformación Carga Axial [in]", "MicroStrain", and "Deformación Carga Radial [in]".
- RESULTADOS BASE (Base Results):** A table with columns for "Esfuerzo Carga [psi]", "Área Base [in²]", "Carga Pandeo [lb]", "Deformación Máx [in]", and "Deformación Carga [in]".
- RESULTADOS REDUCCIÓN (Reduction Results):** A table with columns for "Deformación Carga [in]", "Ángulo", and "Deformación Total".
- RESULTADOS FATIGA (Fatigue Results):** A table with columns for "Límite de Resistencia a la Fatiga [psi]", "Límite Resistencia S_e [psi]", "Ciclos de Vida", "Años de Vida", and "Factor de Seguridad".
- Factor de Seguridad:** A field showing the calculated safety factor.
- Gráficas:**
 - Fig. 1 Dimensiones:** A 3D model of the load cell with dimensions: 16, 12, 19, 12, 21, 41.5, 5, 49.9, and 38.1.
 - Fig. 2 Dibujo proporcionado de la celda:** A 2D cross-section drawing of the load cell.
 - Fig. 3 Esfuerzo medio - Esfuerzo alterno:** A graph showing the relationship between average stress (sigma_m) and alternating stress (sigma_a).
 - Fig. 4 Resistencia a la fatiga - Ciclos de vida:** A graph showing the relationship between stress (Esfuerzo [psi]) and cycles to failure (Ciclos 10⁶).
- Botón de CÁLCULO:** A button labeled "CALCULAR" with a sub-label "RECALCULAR para el nuevo S_e".
- Resultados fatiga:** A box containing the calculated fatigue life and safety factor.
- Límite de Resistencia a la fatiga:** A box containing the calculated fatigue limit.
- Diámetro Externo en la estricción, único a variar para conseguir más de 100 μ ε:** A box containing the calculated diameter at the necking point.

Fuente:

Autores

4.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

En la figura 53 se encuentra una descripción de algunos de los componentes del software. Son algunos de los datos más importantes para el diseño de la celda de carga a pesar que todos son necesarios.

El software está dividido en recuadros de información, bien sea de salida o de entrada, y están etiquetados en la parte superior izquierda del recuadro, de igual forma con las gráficas.

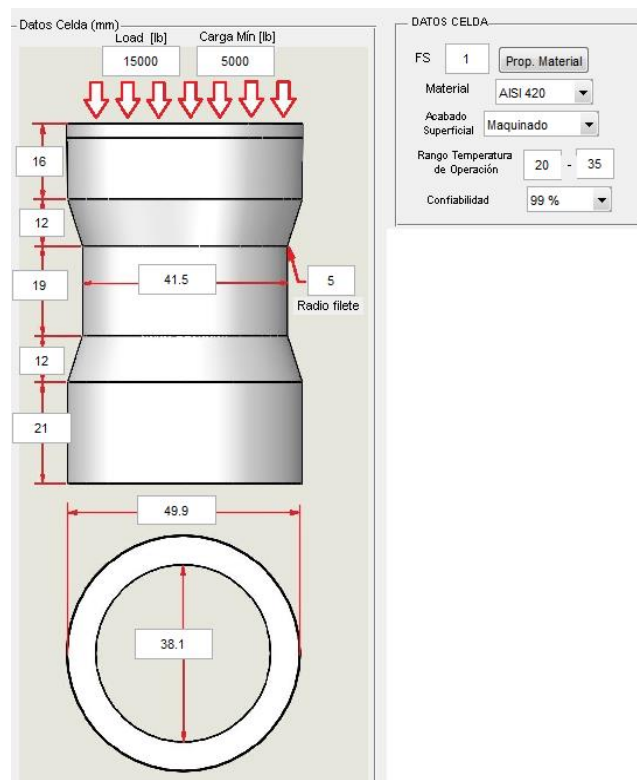
Los recuadros de información son los Datos de la celda, Resultados a fatiga, Resultados Estricción, Resultados Base, Resultados reducción; por otra parte se encuentran las gráficas donde la figura 1 muestra un plano con las cotas de la celda en su geometría de columna y la figura 2 muestra el dibujo proporcionado de la celda, en la figura 3 se muestra la Gráfica S_{medio} (Esfuerzo medio) y $S_{alterno}$ (Esfuerzo alterno) la cual representa, en síntesis, un área segura para el diseño de la celda de carga y por último la figura 4 que muestra la Gráfica S-N (Esfuerzo-Ciclos de vida).

4.1.1 Datos de la Celda. En esta sección se tiene como datos de entrada al programa todas las dimensiones de la celda de carga, cabe resaltar que se puede definir cualquier dimensión estando dentro de las más importantes D_{int} y D_{ext} que corresponden al diámetro interior de la celda, el cual está limitado por el diámetro de la barra pulida, y el diámetro exterior el cual está directamente relacionado con la deformación esperada para que las galgas extensiométricas funcionen de la forma adecuada (1500 MicroStrain), además de otras funciones como el espacio necesario para instalar las galgas, el límite de fluencia del material, la resistencia al fatiga, entre otras. Incluyendo otras dimensiones como el radio de los cambios de sección transversal el cual es muy importante para el cálculo de concentradores de esfuerzo.

Además de incluir las dimensiones de la celda hay otros valores como son la carga máxima (Load en el programa), que corresponde al sistema totalmente cargado, y la carga mínima (carga mínima), que corresponde a la carga de la sarta de varillas y a la bomba (sin crudo), todas en libras.

Otro valor importante a definir desde un principio es el factor de seguridad, aunque este estará directamente relacionado con el valor de la carga máxima incluida anteriormente, existe otro valor de factor de seguridad que se da en el recuadro de Resultados a Fatiga como un factor de seguridad global con respecto a cualquier tipo falla que pudiese presentarse en la celda, como se ve en la figura 54.

Figura 54. Datos de entrada de la Celda de Carga.



Fuente: Autores.

La figura 54 muestra además un menú desplegable para seleccionar diferentes tipos de materiales para la fabricación de la celda de carga. Los materiales en la lista fueron incluidos para probar la mejor combinación de resultados entre deformación en MicroStrain, límite de resistencia a la fatiga, límite de fluencia, dimensiones, etc.

La lista de los materiales que se encuentran en el programa va desde aceros de alta resistencia hasta aceros inoxidable con tratamientos térmicos de endurecimiento. Cabe resaltar que algunos de estos materiales no son fáciles de conseguir, aunque el material final para la celda se obtuvo de Compañía General de Aceros. A continuación se muestra la lista.

- ✓ SAE 1020
- ✓ SAE 1045
- ✓ SAE 4340
- ✓ SAE 8620
- ✓ ALUMOLD 500
- ✓ AISI 201
- ✓ AISI 304
- ✓ AISI 410
- ✓ AISI 420
- ✓ AISI 430
- ✓ AISI 439
- ✓ 15H-5PH(H900)
- ✓ 17-4H (H900)
- ✓ 17-4PH (A)
- ✓ 17-7PH (H900)

Para los 11 primeros materiales listados se obtuvieron las propiedades directamente del fabricante, Compañía General de Aceros, y para el resto que

corresponden a Aceros Inoxidables con un tratamiento térmico llamado Endurecimiento por Precipitación, el cual mejora propiedades del acero las propiedades se obtuvieron de otro fabricante encontrado llamado Aksteel.

NOTA: Las principales propiedades mecánicas necesarias para obtener 1500 microstrain son: el límite de fluencia (Yield Stress: YS en el data sheet) que debería ser lo más alto posible, Módulo de elasticidad (Modulus of Elasticity) que debería ser lo más bajo posible y la resistencia última a la tracción que debería ser lo más alta posible (UTS en el data sheet). Eso en condiciones ideales, pero realmente aumentar el límite de fluencia de un material conlleva a aumentar el módulo de elasticidad.

Además de la lista de materiales, se incluyó un botón que permitiera la visualización de las propiedades físicas del material seleccionado usadas para el diseño de la celda.

Se encuentra otro menú desplegable en el cual se puede seleccionar el acabado superficial que tiene la celda después de ser manufacturada. Esto en busca de acercarse a la realidad el diseño de la celda de carga.

El siguiente recuadro se refiere al rango de temperatura en el que trabajará la celda de carga, es de notar que este rango de temperatura afectará directamente el comportamiento a la fatiga.

Por último se incluye un menú desplegable en el cual se puede seleccionar un porcentaje de confiabilidad, este valor tiene que ver con la desviación estándar generada en la información de las propiedades físicas en las pruebas de laboratorio.

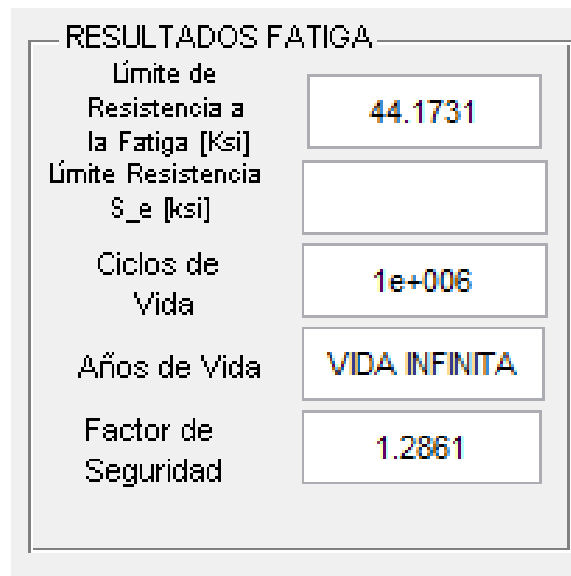
Por defecto el programa pone 99%.

4.1.2 Resultados a fatiga. Este recuadro muestra los resultados obtenidos de los cálculos a fatiga, los cuales están encaminados al diseño de la celda para vida

infinita de tal forma que el primer valor que se muestra en el recuadro es el límite de resistencia a la fatiga el cual está en ksi, tal como se muestra en la figura 55.

El siguiente valor que se muestra es un valor de entrada, está ligado al botón “Recalcular para el nuevo S_e”, con el que se busca darle al programa un valor de S_e por debajo del límite de resistencia a la fatiga que se obtuvo como resultado en el recuadro anterior, esto garantiza que el número de ciclos aumente dejando así a la elección de un valor óptimo para el diseño, es necesario resaltar que el programa está pensado para que la celda se diseñe a vida infinita, sin embargo se deja este botón para cerciorar el resultado.

Figura 55. **Resultados del diseño a fatiga.**



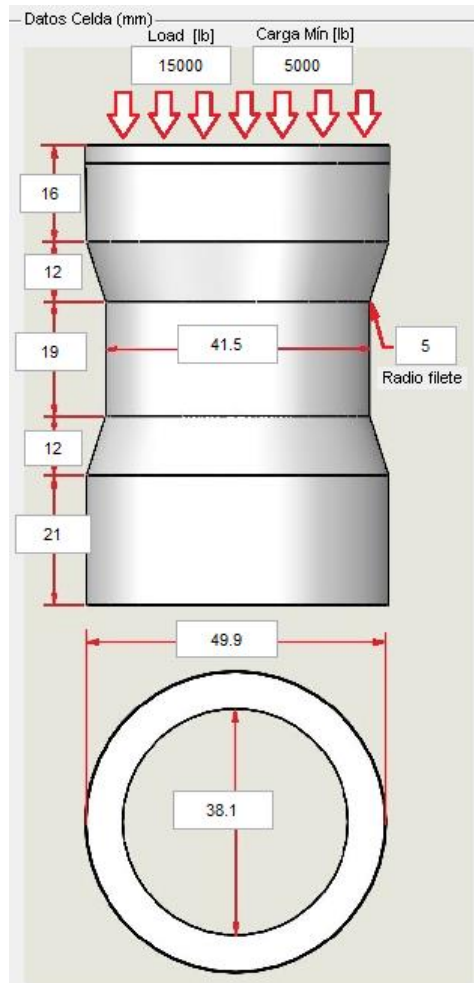
Fuente: Autores.

El siguiente recuadro en la figura 55 corresponde a los ciclos de vida, aunque este valor corresponde a 10^6 , se resalta de nuevo que la celda está diseñada para vida infinita.

Por último se muestra el valor del factor de seguridad global que se obtiene de todos los cálculos realizados.

4.1.3 Plano. Dimensiones de la Celda de Carga. Esta imagen muestra las dimensiones especificadas para la celda de carga, las dimensiones están ubicadas en el sitio de cada cota para facilitar su identificación a la hora de variar sus magnitudes, tal como se muestra en la figura 56.

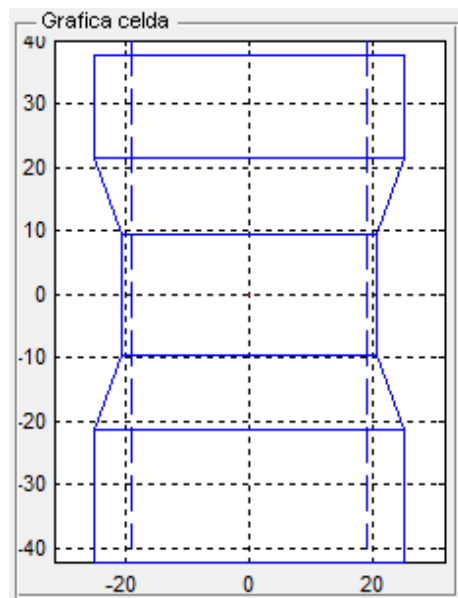
Figura 56. Dimensiones de la Celda.



Fuente: Autores.

4.1.4 Dibujo proporcionado de la Celda de Carga. En esta gráfica se muestra la figura que realmente tendrá la celda de carga manufacturada con las dimensiones especificadas en el recuadro de Datos de la Celda de Carga. Esto se puede comprobar en la figura 57.

Figura 57. **Dibujo Proporcionado de la Celda.**



Fuente: Autores.

4.1.5 Resultados Estricción. Este recuadro mostrado en la figura 58 ofrece resultados a carga estática donde se encuentran resultados como el esfuerzo producido por la carga en psi además del valor del esfuerzo real al ser multiplicado por el concentrador de esfuerzo dinámico. Del mismo modo se encuentra en seguida el valor del esfuerzo mínimo producido por la carga mínima.

También se reproducen algunas de las propiedades físicas del material seleccionado como el límite de fluencia y más adelante el módulo de elasticidad.

Uno de los valores importantes que se genera al dimensionar la celda de carga es el área de la sección transversal que se someterá al esfuerzo producido durante el funcionamiento de la celda, es de notar que esta área corresponde a la estricción, la sección en donde irán instaladas las galgas, esto quiere decir que será el punto de medición de deformaciones y esfuerzos.

En el momento de diseñar una columna a compresión se debe tener en cuenta otro tipo de falla que se podría producir en la celda, el pandeo, por tal razón se calculó la carga máxima a la cual se puede someter la celda antes de que se pandee, es de notar que por las dimensiones especificadas la mayoría de las celdas son columnas cortas, eso hace que la carga para que se pandee sea extremadamente alta.

Figura 58. **Resultados Estricción.**

RESULTADOS ESTRICCIÓN			
Esfuerzo Carga [psi]	45528.1	*K _f =	72431.4
Esfuerzo Mín [psi]	15176		
Límite Fluencia [psi]	94274.5		
Área Estricción [in ²]	0.329467		
Carga Pandeo [lb]	7.13442e+006		
Modulo Elasticidad [psi]	3e+007		
Deformación Máx [in]	0.00235067	[mm]	0.059707
Deformación Carga Axial [in]	0.00113521	[mm]	0.0288344
MicroStrain	1517.6		
Deformación Carga Radial [in]	0.000669476	[mm]	0.0170047

Fuente: Autores.

Como se ve en la figura 58 el siguiente valor mostrado es la deformación máxima que puede tener la celda antes de sobrepasar la zona elástica, se da tanto en pulgadas (in) como en milímetros (mm).

El siguiente valor, que se encuentra resaltado, muestra la deformación provocada por la celda de carga, de igual manera en las dos unidades, pulgadas (in) y en milímetros (mm). Esta es una de las formas de comprobar que la celda no fallará, obviamente se espera que la deformación producida por la carga no supere la deformación máxima, la otra forma es comparando el límite de fluencia con el esfuerzo producido por la carga, de nuevo se espera que el esfuerzo producido por la carga no supere el límite de fluencia.

El siguiente recuadro muestra uno de los factores fundamentales para el correcto funcionamiento de la celda de carga, este es la deformación unitaria, que en el programa aparece como MicroStrain, si este valor corresponde a un rango de 1000 a 1500 MicroStrain a carga nominal, es decir a más o menos la carga promedio; donde la galga extensiométrica podrá generar el suficiente valor de voltaje para que cualquier instrumento convencional pueda leerla.

En última instancia se encuentra el valor de la deformación radial, otro valor importante para la medición de esfuerzos por parte de las galgas extensiométricas, pues en el momento de ser cargada la celda, esta producirá una deformación tanto axial como radial, esta deformación radial está ligada al módulo de Poisson del material usado (VER ANEXO C), las galgas estarán sometidas a dichas deformaciones, esto hará que la galga en la dirección axial mida de forma errónea el esfuerzo producido por la carga, por tal razón la galga seleccionada es bidireccional, esto para obtener una medición axial y otra radial de la deformación.

4.1.6 Resultados base. En este recuadro se obtiene los resultados de la base (véase la figura 11 para ver las partes de la celda), donde básicamente se obtiene

los mismos resultados descritos para la estricción, estos cálculos eran necesarios para comprobar que la celda de carga no fallaría por sus bases antes que por la estricción. La imagen de los resultados de la base en el programa corresponde a la mostrad en la figura 59.

Figura 59. **Resultados Base.**

RESULTADOS BASE			
Esfuerzo Carga [psi]	11866.1		
Área Base [in ²]	1.26411		
Carga Pandeo [lb]	8.49881e+008		
Deformación Máx [in]	0.00197951	[mm]	0.0502796
Deformación Carga [in]	0.000249155	[mm]	0.00632855

Fuente: Autores.

4.1.7 Resultados Reducción. Como se ven en la figura 60, los resultados de la reducción está limitados a la deformación, pues se espera que esta no supere la deformación máxima, haciendo que se supere el límite de fluencia del material, es decir se comprueba de nuevo que la celda de carga no falle en la reducción. Otro dato que se presenta es el ángulo con respecto a la vertical de la reducción que se genera de acuerdo a las dimensiones dadas.

Figura 60. **Resultados Reducción**

RESULTADOS REDUCCIÓN		
Deformación Carga [in]	0.000419606	[mm] 0.010658
Ángulo	73.8461	
Deformación Total	0.00180397	

Fuente: autores.

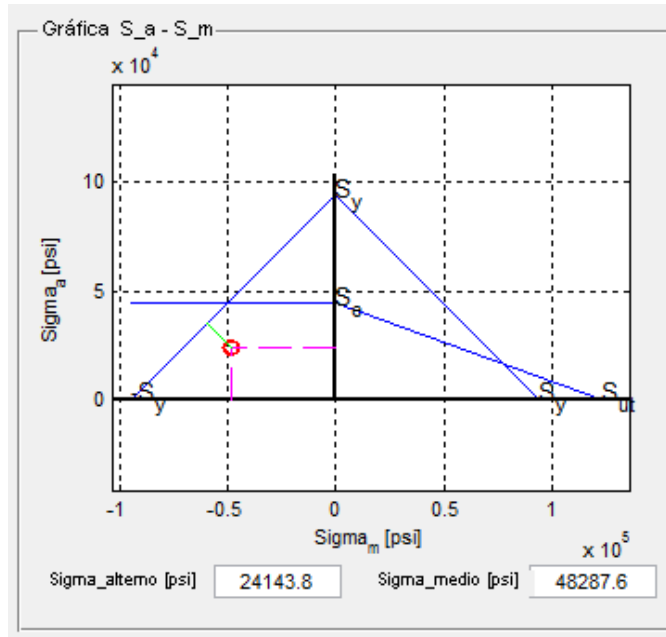
4.1.8 Gráfica esfuerzo alterno-esfuerzo medio ($\sigma_{alterno}-\sigma_{medio}$). Esta gráfica muestra el área segura en la que debe aparecer el punto con coordenadas esfuerzo alternante y esfuerzo medio, el área está representada por la línea de fluencia a compresión, la línea de falla por fatiga con esfuerzos medios a compresión y los ejes [x] negativo (esfuerzo medio) y [y] positivo (esfuerzo alternante).

Cualquier combinación de esfuerzos medio y alternante que toque alguna línea del área segura representa la falla o que quede por fuera del área segura representa la falla.

La línea de falla por fatiga con esfuerzos medios a compresión está definida por el límite de resistencia a la fatiga (el valor representado muestra el límite que genera vida infinita: 10^6 ciclos), mientras que la línea de fluencia a compresión está definida por el límite de fluencia del material.

Los valores de los esfuerzo alterno y esfuerzo medio graficados son mostrados en la parte inferior de la gráfica.

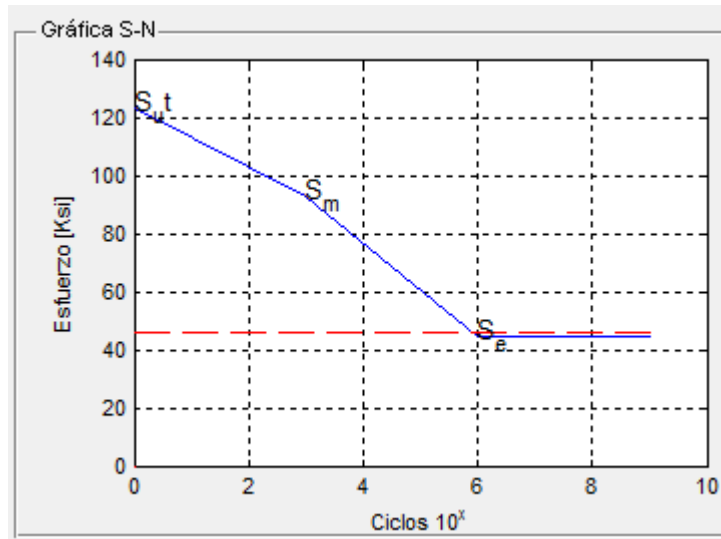
Figura 61. Gráfica Esfuerzo alterno-Esfuerzo medio



Fuente: Autores.

4.1.9 Resistencia a fatiga – ciclos de vida. Esta gráfica representa la vida de la celda en ciclos contra el esfuerzo de resistencia a la fatiga. Los materiales como los aceros tienen una gráfica como la presentada en el programa en la figura 62 con un codo aproximadamente en 10^6 ciclos, este codo hace que la línea que representa el esfuerzo a determinados ciclos sea vuelva horizontal a los 10^6 ciclos, por tanto se dice que el material no fallará por fatiga y a este valor S_e se le llama *límite de resistencia a la fatiga* el cual es un indicativo de vida infinita. Por otra parte materiales como aleaciones de aluminio no presentan este tipo de codos y al punto que corta para a la curva en 10^6 ciclos se le llama *Resistencia a la fatiga*.

Figura 62. **Gráfica resistencia a fatiga –ciclos de vida.**



Fuente: Autores.

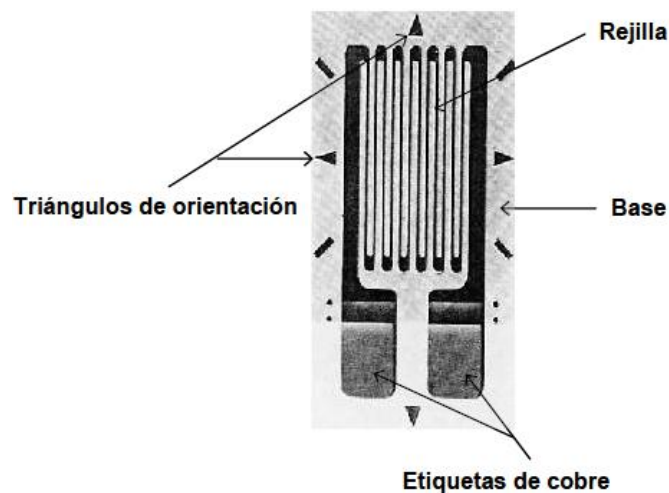
Tal como se ve en la figura 62, la gráfica muestra una línea punteada roja que se cruza con la línea azul exactamente en el punto en que esta se vuelve horizontal, esta línea representa el límite de resistencia a la fatiga calculada, es el estado en que se entiende que la celda tendrá vida infinita a la fatiga.

5. GALGAS EXTENSIOMETRICAS

La galga extensiométrica es un sensor que varía su resistencia en función de la deformación que sufre la superficie sobre la cual está pegada. La galga está constituida por una base muy delgada de un material aislante, sobre la cual se adhiere un patrón metálico en forma de hilo muy fino. La resistencia eléctrica del hilo es directamente proporcional a su longitud, de tal manera que la resistencia aumenta cuando se alarga y disminuye cuando se comprime el hilo, este efecto se usa para hacer la medición de diferentes parámetros, como son: Vibración, torsión, flexión, compresión, tensión, pesos, etc.

Debido a su bajo costo, linealidad, amplio rango de temperatura y condiciones de operación, las galgas se emplean en los sectores industrial y comercial. En este capítulo se explicarán los principales parámetros de selección de las galgas, características de desempeño, partes, materiales y pegamentos.

Figura 63. Partes que componen la galga.



Fuente: www.vishay.com/

5.1 COMPONENTES DE UNA GALGA EXTENSIOMÉTRICA

Una galga extensiométrica se constituye básicamente por tres cosas, la rejilla, la base y las etiquetas de cobre figura 63

La rejilla de la galga es la parte metálica que cambia su resistencia en función de la compresión o tensión, la base es el soporte portador de la rejilla y es fabricada de diferentes materiales aislantes, por último, las etiquetas de la galga sirven para conectar la galga extensiométrica con el circuito acondicionador de señal.

5.2 FACTOR DE GALGA.

El factor de galga es la manera usada para especificar la sensibilidad de la galga, (*GF*, *gage factor*). Es un parámetro adimensional definido como la unidad de cambio de la resistencia por unidad de cambio de longitud, mostrado en la ecuación.

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}}$$

Donde:

GF = Factor de la galga.

R = Resistencia nominal de la galga [Ω].

ΔR = Cambio en la resistencia de la galga [Ω].

l = Longitud inicial del objeto [m].

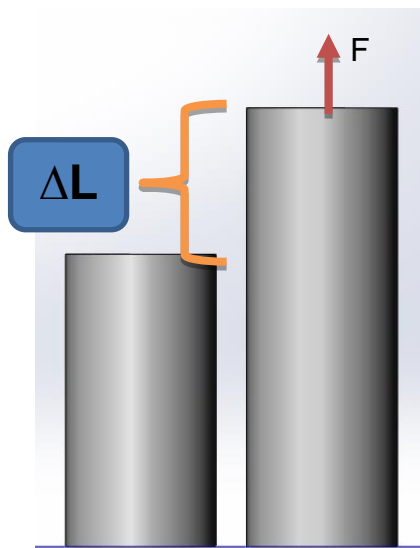
Δl = Cambio en la longitud del objeto [m].

Un factor de galga alto significa un cambio mayor de resistencia, ante un cambio pequeño de longitud, el cual es más fácil de medir que un cambio pequeño de resistencia. Por tal razón, para aplicaciones en medición de tensión o cargas mecánicas es preferible una alta sensibilidad.

5.3 GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS ADHERIDAS A MATERIALES.

Las barras cargadas axialmente se alargan bajo carga de tensión y se acortan bajo cargas de compresión. En la figura 64 se muestra el efecto del alargamiento (Δl) que experimenta una barra cuando es sometida a una tensión (F).

Figura 64. **Alargamiento de una barra en tensión.**



Fuente: autores

La deformación que experimenta una barra está dada por la ecuación siguiente:

$$\Delta l = \frac{PL}{EA}$$

Donde:

Δl = Alargamiento del metal [m].

P = Tensión, fuerza, peso, carga [N].

E = Módulo de elasticidad del material [N/m²].

A = Área transversal de la estructura [m²].

L = Longitud inicial sin tensión [m].

Donde se puede ver que la tensión es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional al módulo de elasticidad por el área, expresado en la ecuación

Combinando las ecuaciones de Δl y GF se obtiene la siguiente ecuación,

$$\Delta R = \frac{GF * R * P}{EA}$$

Donde:

ΔR = Variación de resistencia de la galga [Ω].

GF = Factor de la galga.

R = Resistencia de la galga [Ω].

P = Tensión, fuerza, peso, carga [N].

E = Módulo de elasticidad del material [N/m²].

A = Área transversal de la estructura [m²].

Ecuación que determina el cambio de resistencia en función de la tensión mecánica aplicada a una columna circular.

5.4 COMPENSACIÓN DE EFECTOS TÉRMICOS.

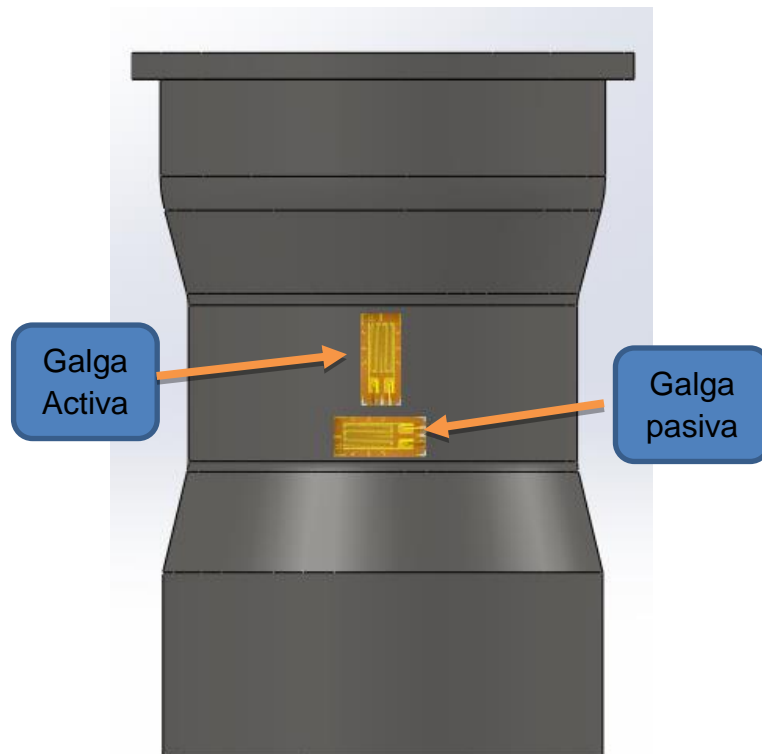
Cuando la galga se instala sobre una superficie de un objeto metálico; éste se expande o contrae en función de la temperatura, lo cual se transfiere a la galga y puede causar mediciones erróneas de tensión.

Para compensar los efectos térmicos en la galga debido a las variaciones de temperatura en el entorno de trabajo, se instala una galga adicional llamada *galga pasiva*. Esta galga se coloca en dirección perpendicular a la dirección de la fuerza

aplicada. De esta manera únicamente se tienen cambios de resistencia en la galga en función de las variaciones de temperatura existentes en el ambiente. La galga que detecta la fuerza axial es llamada *galga activa*, ésta también varía su resistencia con la temperatura, pero al conectarse al módulo de acondicionamiento, estas variaciones son compensadas por la galga pasiva.

En la figura 65 se muestra la forma en la cual se colocan las dos galgas. La galga activa varía en función de la fuerza y la pasiva sólo en función de la temperatura. Cuando el sensor va a operar en un ambiente controlado, no se requiere instalarle la galga pasiva por que los cambios de temperatura no son considerables.

Figura 65. **Sensor de tensión con galgas extensiométricas.**

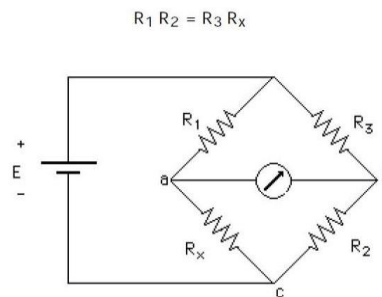


Fuente: Autores

5.5 ACONDICIONAMIENTO DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS FUENTE DE WHEATSTONE.

Las galgas extensiométricas miden deformaciones que no se pueden observar a simple vista, estas dan una pequeña variación de resistencia para la cual el circuito ha de ser muy sensible. Para el acondicionamiento de las galgas el circuito utilizado por excelencia es el circuito puente de Wheatstone, que debido a sus características se convierte en el circuito ideal para estos casos.

Figura 66. **Puente de Wheatstone.**

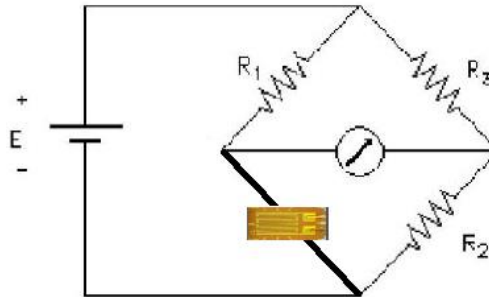


Fuente: <http://www.electricasas.com/wp-content/uploads/2009/01/puentwhea5.jpg>

Existen tres tipos de montajes básicos: Con una, dos y cuatro galgas.

5.5.1 puente de 1 galga. Los puentes montados de una sola galga poseen una baja sensibilidad, y no están no se puede hacer compensación por temperatura ya que solo hay una galga.

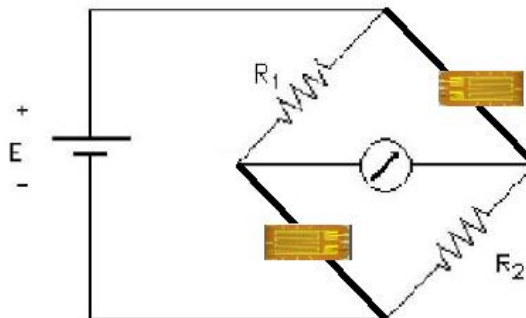
Figura 67. **Puente de Wheatstone; una galga.**



Fuente: Autores

5.5.2 Puente de 2 galgas. Debido a la utilización de dos galgas se consigue duplicar la sensibilidad del puente respecto al de una galga. Esto permite que para una misma deformación se tenga una mayor señal de salida para una tensión de alimentación dada. La disposición de dos galgas permite la compensación en temperatura.

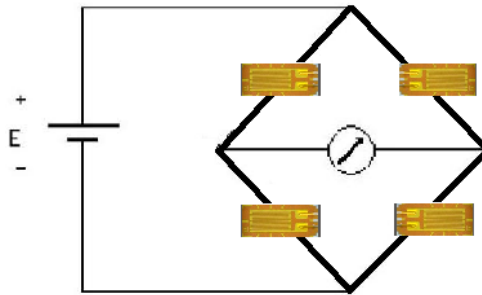
Figura 68. **Puente de Wheatstone; dos galgas.**



Fuente: Autores

5.5.3 Puente de 4 Galgas. La utilización de cuatro galgas cuadruplica la sensibilidad del puente respecto al puente de una sola galga. De igual forma que en el caso anterior, las galgas están compensadas en temperatura.

Figura 69. **Puente de Wheatstone; cuatro galgas.**

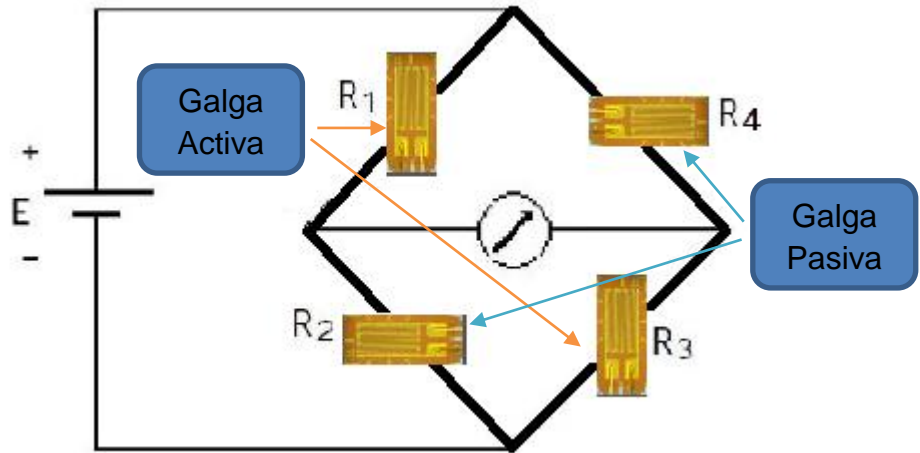


Fuente: Autores

La medida se realiza midiendo la diferencia de tensión existente entre los terminales de salida del sensor. Las principales diferencias de estos montajes se encuentran en la sensibilidad y la capacidad de compensación del efecto de temperatura. Cuando las galgas de iguales características coinciden Los efectos de la temperatura se anulan ya que las afectan a todos por igual; sabiendo esto se decidió hacer uso del puente de 4 galgas.

5.5.4 Galgas en el puente. Seleccionado el tipo de puente, por sus características de sensibilidad y compensación, se procede a la ubicación de las galgas extensiométricas teniendo en cuenta que la relación de resistencias de una brazo, sean iguales a la relación de resistencias del otro, por tal razón el circuito final es el que se muestra en la figura 70.

Figura 70. Puente de Wheatstone; cuatro galgas.



Fuente: Autores

Donde en estado de no carga se cumple la siguiente relación:

$$R1/R2 = R4/R3$$

5.6 SELECCIÓN DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

Existen varias empresas proveedoras de strains gages, una de ellas es Micro-Measurements de Vishay, la cual por su calidad, alta variedad en productos electrónicos, soporte, fácil contacto, se seleccionó para realizar la compra.

La selección de una galga no es un proceso complicado pero si de mucho cuidado, una selección racional y cuidadosa de las características y parámetros del strain gage puede ser muy importante en lo que respecta a la optimización del rendimiento del strain gage para condiciones de operación, a la obtención de una medida de esfuerzo confiable y precisa, a la facilidad de instalación, a la minimización del costo de instalación del strain gage, entre otros.

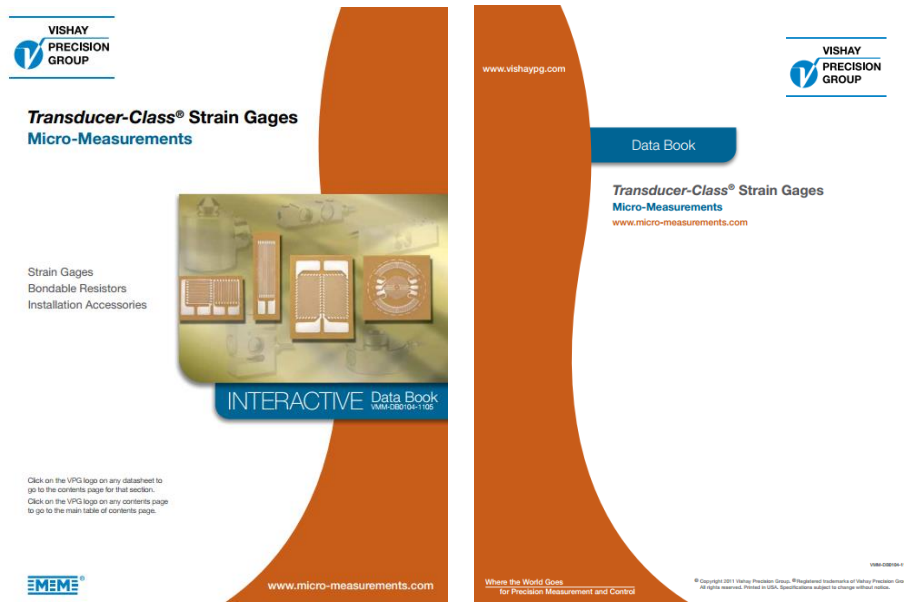
Para la celda de carga se siguió paso a paso el siguiente proceso de selección:

1. Tipo de aplicación de la galga.
2. Tipo de transductor (transductor tipo columna).
3. Tipo de galgas bidireccionales- unidireccionales.
4. Tamaño de la galga.
5. Serie de la galga.
6. Opciones de encapsulación de la galga.
7. Resistencia.
8. Numero STC.

5.6.1 Tipo de aplicación de la galga. Como primera instancia en la selección de una galga extensiométrica es tener muy en cuenta la aplicación en la cual será usada; en el mercado se encuentran muchos tipos de galgas ya sean de una sola rejilla, dos rejillas o más, galgas para transductores, pruebas de laboratorio, para torque, para carga axial, en fin son muchos los tipos para elegir.

Como lo que se va a diseñar es una celda de carga, el tipo de galgas a seleccionar son galgas para transductor, siendo estas especiales y de alta gama; Hay varios tipos de galga para transductor, hay galgas simples, duales, de 90°, 45°, rosetas, puentes de Wheatstone ya armados en una sola galga, galgas circulares, rectangulares etc. Todas ellas se encuentran en el catálogo de transducer-class Strain Gages, de vishay, véase figura 71.

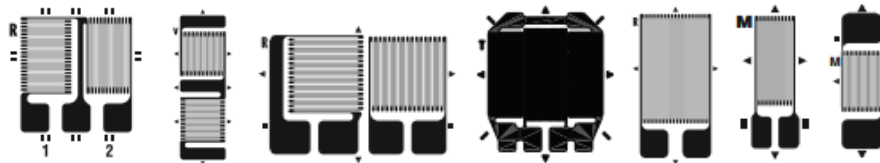
Figura 71. Catálogo transducer-class Strain Gages, de vishay.



Fuente: <http://www.vishaypg.com/docs/50000/tcsg.pdf>

5.6.2 Tipo de transductor (transductor tipo columna). En el catálogo de transducer-class Strain Gages de vishay se encuentra galgas para diferentes tipos de transductores, ya sean celdas de carga tipo columna, tipo vigas, tipo S o tipo Z, tipo anillo, entre otros, las galgas seleccionadas para este proyecto son obviamente galgas para transductor tipo columna.

Figura 72. Ejemplos de Strain gages para transductores tipo Columna.



Fuente: <http://www.vishaypg.com/docs/50000/tcsg.pdf>

5.6.3 Tipo de galgas bidireccionales- unidireccionales. Si se parte de un puente de wheastone completo o sea cuatro galgas, y que de esas 4 galgas tenemos dos activas (en dirección a la carga) y dos pasivas (perpendiculares a la línea de acción de la carga), vishay ofrece galgas sencillas, y pares de galgas a 90° en una sola figura 73.

Figura 73. **Galgas para transductor; dobles y sencillas.**



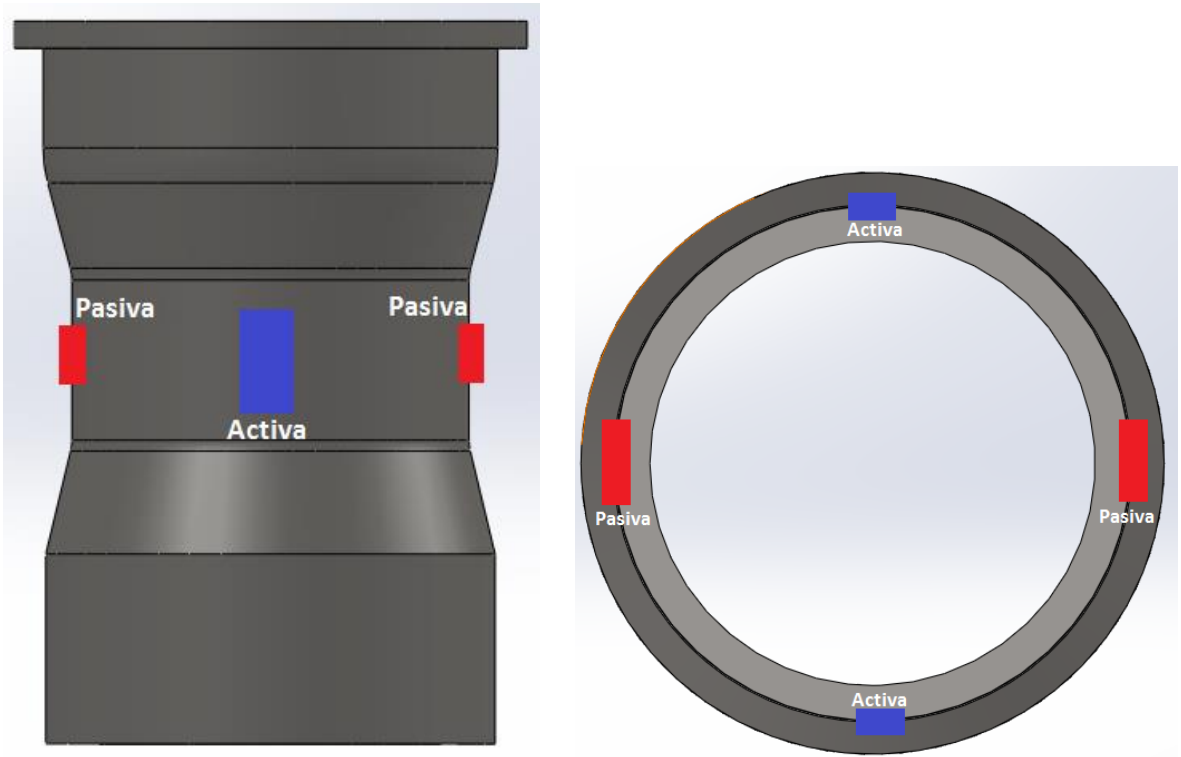
Galga Doble 90°

Galga sencilla

Fuente:<http://www.vishaypg.com/micro-measurements/transducer-class-strain-gages>

Para un montaje con galgas sencillas, y en vista de que se debe completar el puente de Wheatstone, es necesario hacer uso de cuatro galgas, tal cual como lo muestra el diseño de la figura 74.

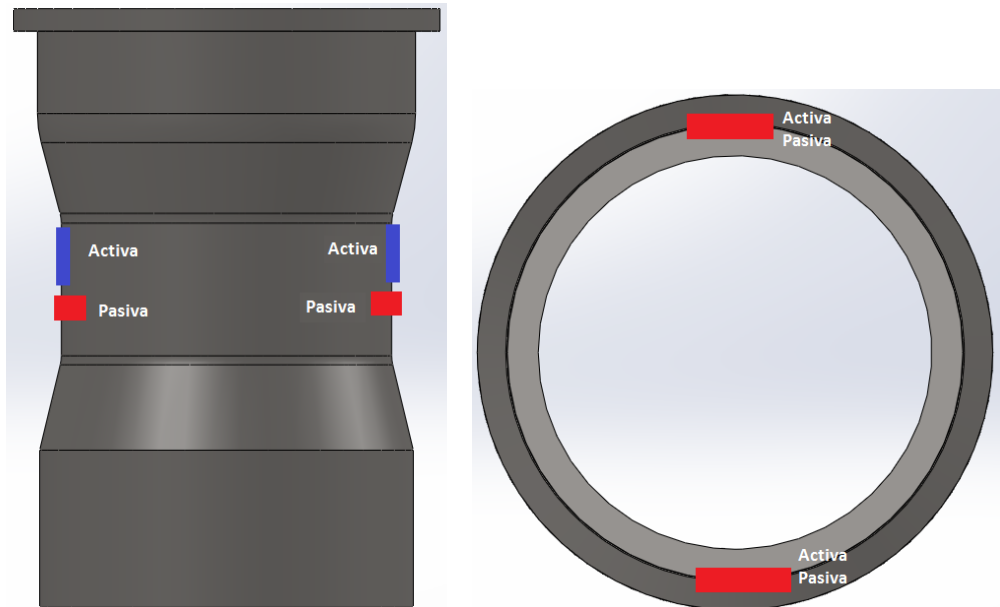
Figura 74. Celda de carga con galgas sencillas.



Fuente: Autores

Si se elige un montaje con galgas dobles a 90°, solamente se usarían dos, cada galga de estas tiene una pasiva y una activa, simplificando el sistema. En la figura 75 se muestra el diseño.

Figura 75. Celda de carga con galgas dobles a 90°.




Fuente: Autores

La hacer una comparativa en los diseños y por comodidad de pegado, sencillez en el circuito, medida de activa y pasiva en casi el mismo punto, economía en galgas se hizo selección de pares de galgas a 90°.

5.6.4 Tamaño de la galga. Con el filtrado de strain gages que se hizo en los dos numerales anteriores, en el catálogo de transducer-class Strain Gages de vishay el número de galgas a seleccionar se reduce de sesenta a nueve.

Ahora el siguiente parámetro es el tamaño de la galga, este se encuentra en la parte inferior izquierda de cada galga, tal cual lo muestra la figura 76, tomada del catálogo de vishay.

Figura 76. Datos de tamaño de la galga.



Often used on column transducers.			
GAGE LENGTH	OVERALL LENGTH	GRID WIDTH	OVERALL WIDTH
0.100	0.415	0.130	0.130
2.54	10.54	3.30	3.30
MATRIX SIZE	0.48 L x 0.19 W	12.2 L x 4.8 W	
N2K-XX-S165V-10C/DP		1000 ± 0.2%	V E2

Datos sobre el tamaño de la galga

Fuente: Autores

El tamaño de la galga es uno de los parámetros de selección más importantes, ya que cuando se diseñó la celda, se destinó un espacio donde va montada la galga; el espacio destinado para la celda en cuestión fue de 19mm de altura por una longitud radial de 130mm, como solo se van a colocar dos galgas de 90° figura 75 entonces la longitud radial no es importante, por lo tanto solo se tuvo en cuenta la altura de 19mm.

El catalogo muestra un rango de alturas que van desde 4.9mm hasta 12.2mm, las cuales todas están por debajo de la restricción de la celda de 19mm de altura, o sea todas las galgas de allí sirven.

5.6.5 Serie de la galga. Con la serie de la galga se determina la combinación entre el material del hilo metálico y el material de respaldo, Micro-Measurements presenta la siguiente variedad de aleaciones de hilos para strain gages:

Hilo metálico:

- **Aleación A:** Constantan, una aleación de cobre y nickel, autocompensado por temperatura. Esta aleación es la más antigua y aun así es la más usada, esta aleación posee una alta sensibilidad al esfuerzo y es relativamente insensible a la temperatura.
- **Aleación P:** Constantan templado, es una aleación muy usada para esfuerzos muy grandes (50000 microstrain) o más, es un material que se puede deformar bastante, pero no soporta grandes esfuerzos cíclicos.
- **Aleación D:** Aleación isoelástica de cromo y nickel. Es una aleación diseñada para una alta vida dinámica, pero esta no es muy sensible a los cambios de temperatura.
- **Aleación K:** Aleación de cromo y nickel; Karma autocompensado por temperatura. Esta aleación se caracteriza por una buena vida útil y excelente estabilidad, es la elección preferida para mediciones estáticas de esfuerzo de alta precisión durante largos periodos de tiempo (meses o años).

Material de respaldo:

La confección de strain gages se realiza mediante un grabado del hilo metálico sobre un material de respaldo o “carrier” que cumple con las siguientes funciones:

- Proveer el medio de sustento a la grilla metálica durante la instalación.
- Presentar una superficie para confinar y pegar la galga al material de prueba.
- Proveer un aislamiento eléctrico entre la grilla y el material de prueba.

Los materiales de respaldo de Micro-Measurements para sus strain gages son básicamente de dos tipos, polímeros y epoxy-fenólicos reforzados con fibra de vidrio.

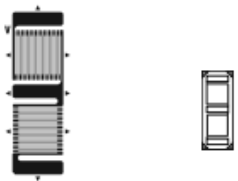
- **Polímeros:** el polímero clase E es un material de respaldo duro, extremadamente flexible y puede ser contorsionado para caber en pequeños radios, este material es idóneo para ser usado en temperaturas de -195 a 175°C, y para medidas de esfuerzo tanto dinámicas como estáticas, las series de galgas que se encuentran hechas bajo polímeros son las que están con nomenclatura EA, CEA, EP, EK, S2K, N2A y ED.
- **Epoxi-fenólicas:** Son materiales reforzados con fibra de vidrio, tienen un desempeño excepcional sobre un amplio rango de temperaturas (-269 a 290°C) tanto para cargas estáticas como para dinámicas, la máxima elongación aceptable por el material es limitada al 1% o 2%, las series de galgas con este material de respaldo corresponden a la nomenclatura WA, WK, N2K, SA, SK, WD Y SD.

Ya sabiendo las características del hilo metálico y del material de respaldo se procede a consultar la tabla Strain Gage Series and Adhesive Selection table, proporcionada por micro-measurement ver anexo D, la cual provee la serie de galga recomendada a partir de un perfil de prueba.

Según por los rangos de temperatura de trabajo (máximo 95°), características como soldabilidad, flexibilidad, alta resistencia a fatiga, bajo costo, se seleccionó la combinación N2A y N2K.

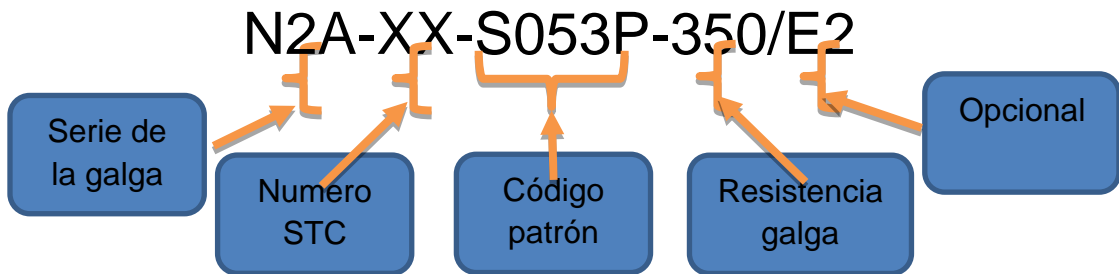
En el catálogo la serie de la galga se puede ver en la designación de la galga, en los tres primeros indicadores figura 77 y 78.

Figura 77. Designación de la galga en catálogo.

				Often used on column transducers.				
				Designación de la galga				
GAGE LENGTH	OVERALL LENGTH	GRID WIDTH	OVERALL WIDTH					
0.100	0.415	0.130	0.130					
2.54	10.54	3.30	3.30					
MATRIX SIZE	0.48 L x 0.19 W		12.2 L x 4.8 W		N2K-XX-S165V-10C/DP	1000 ± 0.2%	V	E2

Fuente: Autores

Figura 78. Designación de la galga

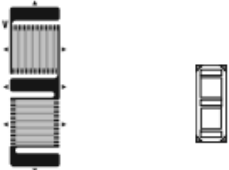



Fuente: Autores

De las nueve galgas posibles para seleccionar, el número se reduce a 8, el siguiente parámetro a mirar según Micro-Measurements son las opciones de la galga.

5.6.6 Opciones encapsulación de la galga. Si la serie de la galga tiene una opción de encapsulación de la rejilla en particular, se especifica en la parte inferior derecha del catálogo, como lo muestra la figura 79.

Figura 79. **Opción de la galga**

				Often used on column transducers.				
				<div style="border: 1px solid blue; border-radius: 10px; padding: 5px; display: inline-block;">Opción de la galga</div> 				
GAGE LENGTH	OVERALL LENGTH	GRID WIDTH	OVERALL WIDTH					
0.100	0.415	0.130	0.130					
2.54	10.54	3.30	3.30					
MATRIX SIZE	0.48 L x 0.19 W		12.2 L x 4.8 W		N2K-XX-S165V-10C/DP	1000 ± 0.2%	V	E2

Fuente: Autores

Las posibles opciones de encapsulación de la galga que se pueden encontrar para transductor son dos:

- **E2:** La rejilla está recubierta por una delgada película de polímero de 0.013mm, con los tabs para soldar descubiertos.
- **E3:** La rejilla está recubierta por una delgada película de epoxy de 0.01mm, con los tabs para soldar descubiertos.

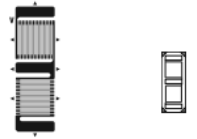
5.6.7 Resistencia. Al seleccionar la resistencia de la galga, primero que todo se debe verificar que valores de resistencia puede leer el instrumento con el cual vamos a realizar la medición.


Además se debe tener en cuenta que cuando se selecciona galgas de pequeño tamaño y altas resistencias como por ejemplo 350Ω , estas tienen poca vida útil a fatiga; considerando esto las galgas para transductor seleccionadas fueron las N2K-XX-S165V-10C/DP con una resistencia de 1000Ω y la N2A-XX-S053P-350 con resistencia de 350Ω siendo estas las galgas de mayor tamaño permisibles para el espacio diseñado en la celda de carga.

5.6.8 Numero STC. Finalmente para completar la selección del strain gage, se elige el número STC (self temperture Compensation), el cual es un número que expresa el coeficiente de expansión térmica del material del transductor, expresado en PPM/°F; Para los aceros se tiene que el STC es de 06 completando el código de designación de la siguiente forma:

- **N2A-06-S053P-350/E2**
- **N2K-06-S165V-10C/DPE2**

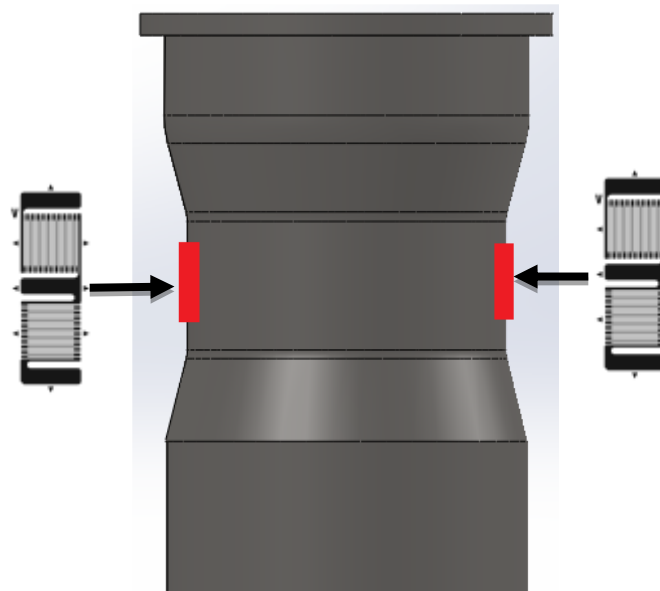
Figura 80. **Galgas seleccionadas**

				Often used on column transducers.			
GAGE LENGTH	OVERALL LENGTH	GRID WIDTH	OVERALL WIDTH				
0.100	0.415	0.130	0.130				
2.54	10.54	3.30	3.30				
MATRIX SIZE	0.48 L x 0.19 W	12.2 L x 4.8 W		N2K-XX-S165V-10C/DP	1000 ± 0.2%	V	E2

				Often used on column transducers.			
GAGE LENGTH	OVERALL LENGTH	GRID WIDTH	OVERALL WIDTH				
0.100	0.415	0.130	0.130				
2.54	10.54	3.30	3.30				
MATRIX SIZE	0.48 L x 0.19 W	12.2 L x 4.8 W		N2A-XX-S053P-350	350 ± 0.2%	P	E2

Fuente: <http://www.vishaypg.com/docs/11556/90dualgr.pdf>

Figura 81. **Celda de carga con galgas biaxiales (90°)**



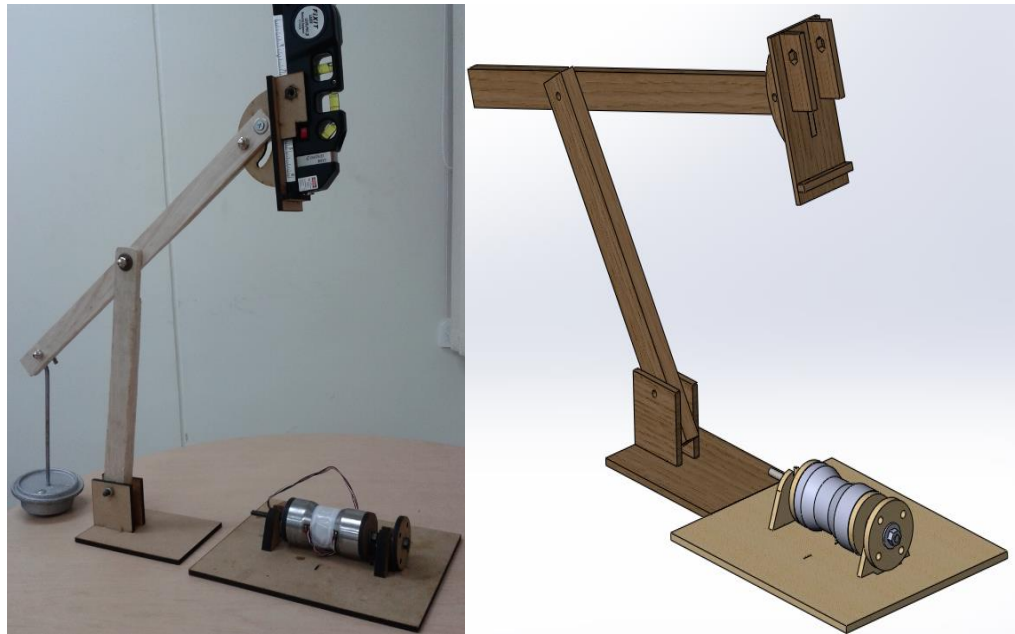
Fuente: Autores

5.7 BANCO DE PEGADO DE GALGAS.

Como se mostró anteriormente se usaron strain gages biaxiales (90°), y se ubican en la celda de carga tal cual se muestra en la figura 81. El posicionamiento de estas galgas debe ser totalmente verticales, también se debe garantizar que las dos galgas queden a la misma altura y estar ubicadas en los extremos opuestos de la celda; de no ser así los esfuerzos no se transmiten como debiera ser a la galga, proporcionando resultados erróneos.

5.7.1 banco de pegado de galgas. El pegado de galgas en superficies cilíndricas no es tan fácil como lo es en una superficie plana, para mayor comodidad se diseñó un banco de madera para soportar la celda de carga, garantizar que las galgas queden pegadas a 180° y por supuesto que queden alineadas con el eje central de la celda.

Figura 82. Banco de pegado de galgas.



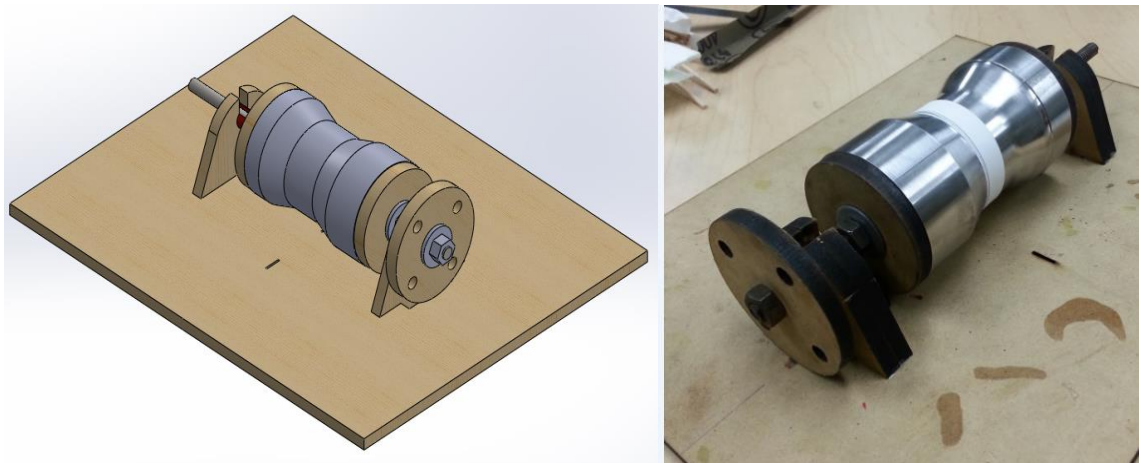
Fuente: Autores

En la figura 82 se muestra el diseño del bando de pegado de galgas, el cual consta de dos partes básicamente:

1. Sistema de montaje y medidor de ángulos de 90°
2. Sistema Laser

5.7.1.1 Sistema de montaje y medidor de ángulos de 90°. Este es el encargado de soportar la celda de carga, permite hacer giros de esta cada 90° permitiendo la correcta colocación de las galgas a 180° una de la otra; además permite hacer tareas de lijado, pegado de galgas, pegado de cables, aplicar recubrimientos entre otras acciones realizadas a la celda.

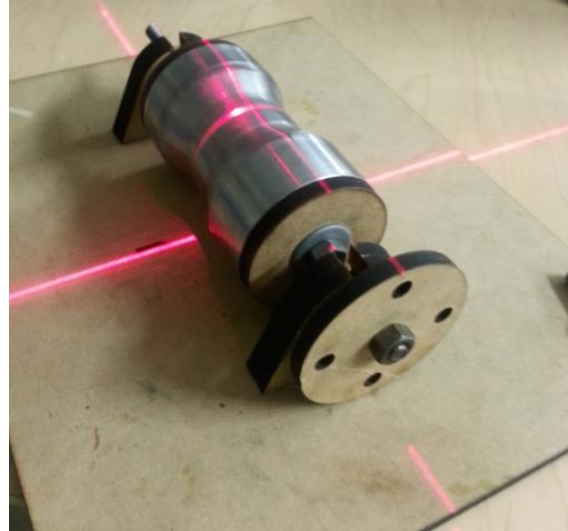
Figura 83. **Sistema de montaje y medidor de ángulos de 90°**



Fuente: Autores

5.7.1.2 Sistema Laser. Este sistema consta de un láser que proyecta dos líneas perpendiculares en forma de cruz, el láser es montado en un chasis que permite adaptación del láser para que proyecte sobre cualquier superficie.

Figura 84. **Sistema laser.**



Fuente: Autores

El sistema laser proyecta dos líneas perpendiculares que permiten orientar la galga a la hora del pegado, cumpliendo con el requisito de que estas queden totalmente verticales y a la misma altura.

5.8 KIT DE PEGADO DE STRAIN GAGES

Para el pegado de strain gages Micro-Measurement proporciona una serie de elementos los cuales son indispensables adquirirlos para así obtener óptimos resultados y tener comodidad a la hora del pegado de galgas.

Elementos mínimos para el pegado de strain gages.

- Solvente desengrasante CSM-1.
- Acondicionador M-Prep Conditioner A.
- Lija 400-grit silicon carbide.
- Lija 300-grit silicon carbide.
- Lija 200-grit silicon carbide
- Toallas de gasa.
- Lápiz de punta medio semidura 4H.
- Cotonetes.
- Neutralizante M-Prep Neutralizer 5A.
- Cinta adhesiva de celofán M-LINE PCT-2A.
- Adhesivo M-Bond AE 15
- Solvente M-COAT A.
- Teflón
- Grapa para elementos redondos HSC-1
- Vidrio esterilizado

Para la realización del pagado de galgas, se adquirió un kit de pegado de galgas para transductores proporcionado por Micro-Measurement, el TAK- 610 KIT. El cual contiene todo lo necesario para el pegado de strain gages para transductores.

Figura 85. **Kit de pegado de strain gages TAK-610**



Fuente: <http://www.vishaypg.com/docs/50000/tcsg.pdf>

5.9 PEGADO DE STRAIN GAGES EN CELDA DE CARGA

Partiendo de tener la celda de carga montada sobre el banco de pegado figura 85, se procede a realizar el proceso de pegado.

Figura 86. **Montaje de la celda de carga en banco de pegado.**



Fuente: Autores

Para el pegado fue necesario seguir los siguientes pasos recomendados por Micro-Measurements para lograr un pegado exitoso:

5.9.1 Preparación de la superficie.

5.9.1.1 Desengrasar la celda de carga con el desengrasante CSM-2.

Desengrasar es remover aceites, grasas, contaminantes orgánicos y residuos químicos solubles, el desengrasado se realiza mojando una gasa limpia con el desengrasante CSM-2 y luego se pasa la gasa sobre el área de pegado, una y otra vez hasta que la superficie se muestre completamente limpia.

Figura 87. **Desengrasante CSM-2**



Fuente: Autores

5.9.1.2 Lijar en seco con Lija 200-grit silicon carbide. La superficie se lija para remover cualquier cosa adherida (oxido, pintura, revestimientos, etc), después del mecanizado la superficie es muy áspera, una lija de tamaño de grano grande como la 200-grit silicon carbide, es la ideal para pulir las grandes asperezas después del mecanizado.

Figura 88. **Lija 200-grit silicon carbide**



Fuente: Autores

5.9.1.3 Aplicar Acondicionador A sobre la superficie lijada y lijar con 320 y 400-grit silicon carbide. Luego se procede a pulir la superficie con una tamaño de grano de lija más pequeño como la 320 y la 400-grit silicon carbide; humedeciendo la superficie de pegado con un poco de acondicionador A, se pasa la lija 320 hasta secar la superficie, luego se hace este proceso un par de veces, se aplica mas acondicionador A y se procede a hacer uso de la lija de 400 para un acabado final mucho más pulido, al final limpiar todo con una gasa limpia.

Figura 89. **Acondicionador A**

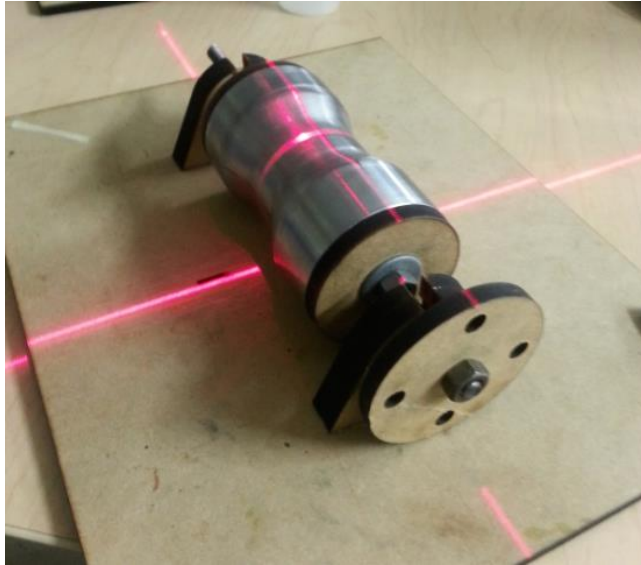


Fuente: Autores

5.9.1.4 Marcar líneas guías para el pegado de la galga con el láser. Ahora se va a marcar las líneas de orientación para la galga, este proceso se hace con el sistema laser, para tener una orientación precisa.

Las líneas de orientación se deben hacer con un lápiz de punta medio semidura 4H, ya que si se usa cualquier otro lápiz, las líneas de de orientación se borran con tan solo pasar el dedo.

Figura 90. **Marcado con sistema laser**



Fuente: Autores

5.9.1.5 Aplicar acondicionar A y limpiar con cotonete. Después de hacer las líneas de orientación se aplica a la superficie de pegado, una pequeña cantidad de Acondicionador A y con un Cotonete se retira la tinta del lápiz que esta sobre la superficie, al hacer este proceso se puede notar que las líneas de orientación quedan marcadas de forma permanente sobre el material, de ahí la importancia del lápiz de punta medio semidura 4H.

Este proceso de limpiado con el cotonete se hace una y otra vez hasta que el algodón del cotonete salga totalmente blanca con cada pasada. Este proceso debe realizarse en un área grande para garantizar que los contaminantes no sean arrastrados al área de pegado durante los procesos siguientes.

5.9.1.6 Aplicar neutralizador 5A y limpiar con cotonete. Para terminar la preparación de la superficie de pegado, se finaliza aplicando un neutralizador 5^a,

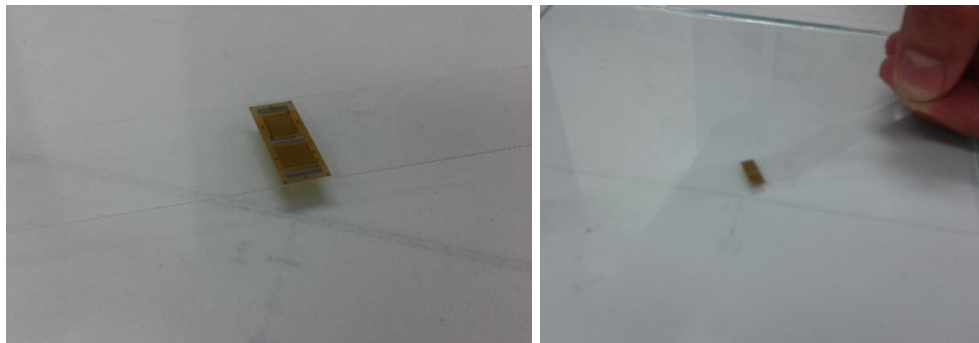
Figura 92. **Galgas en su empaque.**



Fuente: Autores

5.9.2.2 Pegar la cinta de celofán sobre la galga de tal manera que queden perpendiculares y a la vez pegar la cinta sobre el vidrio. Se coge un pedazo de cinta celofán que viene con el kit de pegado de galgas, esta cinta es pegada sobre la galga y el vidrio, de tal manera que el lado largo de la galga y el lado largo de la cinta queden totalmente perpendiculares ver figura 93.

Figura 93. **Galga pegada en la cinta sobre el vidrio.**



Fuente: Autores

5.9.2.3 Despegar la cinta con un ángulo de 45° del vidrio. Se despega la del vidrio con un ángulo de 45° de tal manera que la galga no se vaya a despegar de la cinta.

5.9.2.4 Pegar la cinta sobre la superficie preparada de la celda. Se pega la cinta sobre la superficie preparada para la galga de tal manera que las líneas guías que se hicieron en la celda queden alineadas con las líneas guías de la galga.

5.9.3 Preparado de pegante M-bond AE15 para galgas:

5.9.3.1 Preparar un recipiente limpio para hacer la mezcla del adhesivo y el agente de curado. Se busca un recipiente totalmente limpio, y del tamaño de acuerdo a la cantidad de pegamento que se vaya a mezclar.

Figura 94. **Pegante M-bond AE15**



Fuente: Autores

5.9.3.2 Mezclar sobre el recipiente 10 partes del adhesivo M-bond AE15 por 0.8 partes de agente de curado. Sobre una báscula podemos pesar 10 partes de adhesivo M-bond AE15 y 0.8 de agente de curado, para el pegado de dos galgas aproximadamente se mezcla 2.5 gramos de Adhesivo y 0.2 gramos del agente curativo,

Mezclar durante 5 minutos y aplicar sobre la superficie de la celda para el pegado de la galga.

Figura 95. **Pesaje y mezclado de los adhesivos.**



Fuente: Autores

5.9.4 Pegado de Strain Gages:

5.9.4.1 Despegado de cinta de la celda y aplicación de adhesivo. Se despega un extremo de la cinta de la celda de carga con un ángulo de 45 grados, y se dobla hacia atrás y se pega encima del otro extremo de la cinta, dejando al descubierto la superficie de pegado de la galga, luego aplicar el adhesivo de manera uniforme, sin dejar espacio y que sea la cantidad de adhesivo justamente necesario, procurar no excederse en la cantidad.

Figura 96. **Aplicación del adhesivo para el pegado de la galga.**



Fuente: Autores

Luego volver a pegar la cinta sobre la celda de manera que quede bien templada la misma.

5.9.4.2 Recubrir las galgas con la cinta teflón. Con la cinta de teflón se recubren las galgas y las cintas, luego se monta la grapa para elementos redondos, esta hace presión sobre las galgas para que queden bien pegadas a la celda de carga.

Figura 97. **Celda de carga preparada para el curado**



Fuente: Autores

5.9.5 Curado de la celda de carga: Después de realizados los pasos anteriores, el paso a seguir es el curado del pegado de la galga en la celda, donde en un horno eléctrico se le proporciona calor a 95°C durante un tiempo de 1 hora aproximadamente.

Figura 98. **Celdas de carga en horno eléctrico**



Fuente: Autores

Una hora después retirar las celdas de carga y dejar enfriar a temperatura ambiente.

Luego se procede a retirar la grapa HSC-1, el teflón y la cinta dejando las galgas en la celda al descubierto y totalmente pegadas.

5.9.6 Armado de puente Wheatstone y Soldado de cables.

5.9.6.1 Montar nuevamente la celda de carga en el banco para pegado de galgas. Se vuelve a montar la celda de carga en el banco de pegado de galgas y con cinta de enmascarar se recubre la rejilla de cada galga, dejando solo al descubierto el pad donde se soldaran los cables para el armado del puente de Wheatstone.

Figura 99. **Celda lista para Soldar armado de puente de Wheatstone.**



Fuente: Autores

5.9.6.2 Armado del puente de Wheatstone y recubrimiento de las galgas. Se arma el puente de Wheatstone con cable 134-AWP, el cual viene con el kit TAK 610 de pegado de galgas; los brazos del puente deben quedar con cables de igual longitud para que las pérdidas por resistencia en cada lado del brazo sea aproximadamente la misma.

Figura 100. **Armado de puente de Wheatstone en celda de carga.**



Fuente: autores

Después de soldados los cables a las galgas y armado el puente de wheatstone, se procede a aplicar una protección contra el medio ambiente y contra posibles daños mecánicos a los que puede estar expuesta.

M-COAT A, es un solvente que viene con el kit de pegado de galgas y tiene como función proteger el adhesivo de las galgas y así aumentar la capacidad de transmisión de la carga, brindar protección física para la delicada galga y conexión de alambres, prevenir tensiones provocadas por agentes químicos, si no se aplica esta protección se pueden tener mediciones falsas.

Después de este proceso se soldán los cables de alimentación V+, V- y los cables de sensado S+ y S-, se recubre la celda con teflón y queda lista para su introducción en la carcasa y posteriormente su trabajo para el cual fue diseñada.

Figura 101. Celda de carga terminada.

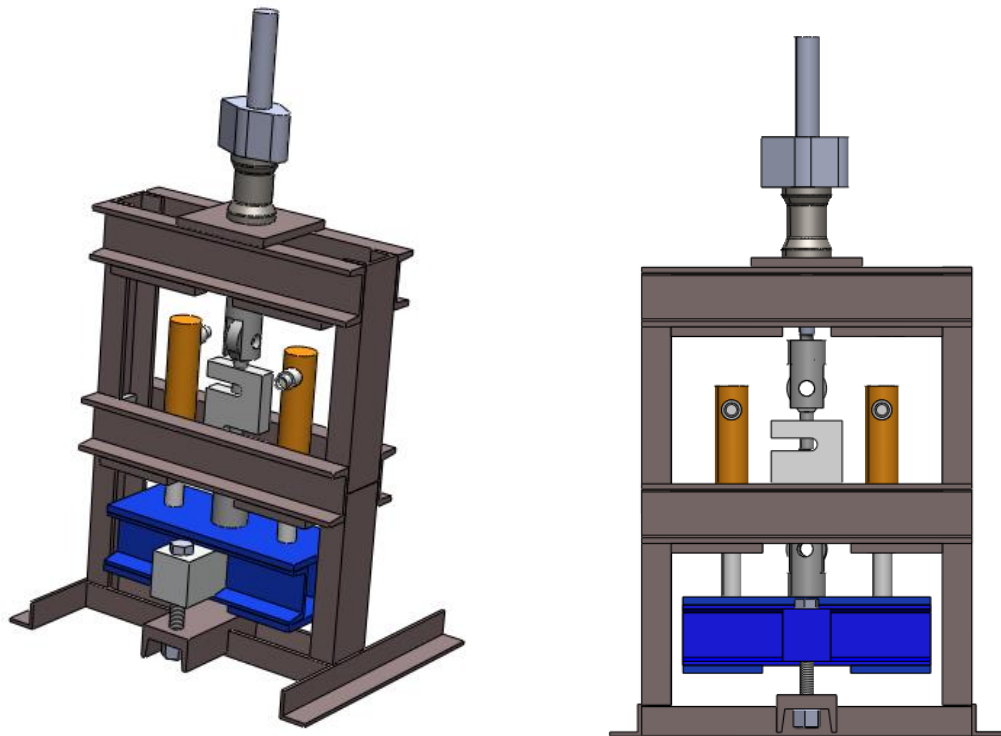


Fuente: Autores

6. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS ESTÁTICO DE 10.000 LB

El banco de pruebas estático de 10.000 lb fue construido en busca de probar el correcto funcionamiento de la celda después de su fabricación, además de la correcta caracterización del sensor.

Figura 102. Banco de Pruebas Estático.



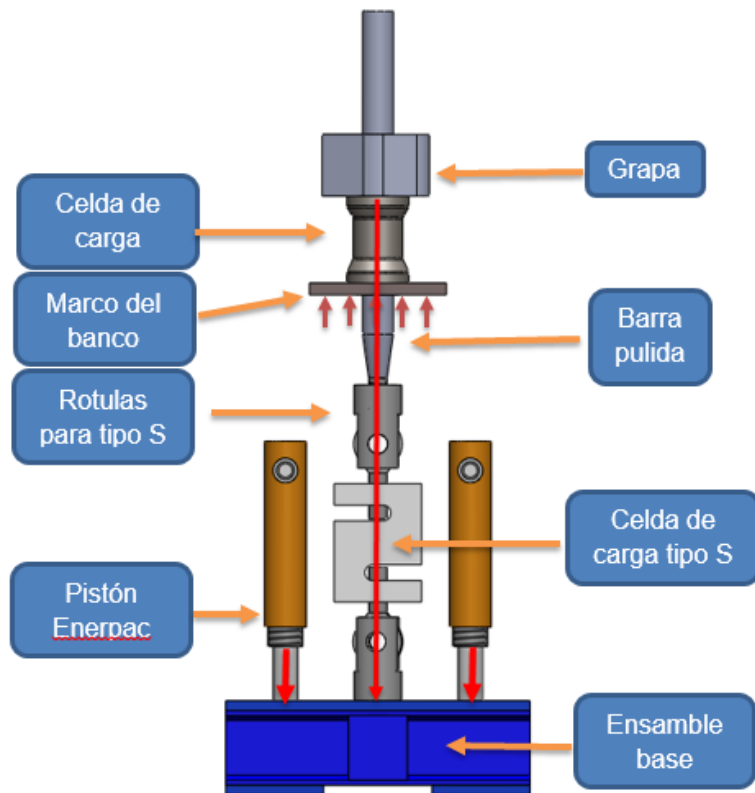
Fuente: Autores.

El diseño del banco está enfocado básicamente a proporcionar la fuerza que experimentaría la celda de carga en el campo de operación, esta fuerza es proporcionada por un sistema hidráulico de bombeo manual, y es sensada por una

celda de carga Tipo S, para empezar con el diseño del banco, es necesario que la carga sensada por la celda tipo S y la celda a evaluar sea la misma, por eso las dos celdas de carga se colocaron en serie figura 103.

La carga proporcionada por los cilindros hidráulicos Enerpac es transmitida a las celdas de carga a través del ensamble base, este ensamble está conectado en serie con la celda de carga tipo S la cual está conectada a la barra pulida y a sí mismo a la celda de prueba, La celda de prueba está montada y apoyada sobre el marco del banco y a través de ella pasa la barra pulida, la grapa esta aferrada a la barra pulida ejerciendo compresión junto con el marco del banco a la celda de carga de prueba.

Figura 103. Principio de funcionamiento del banco de pruebas.

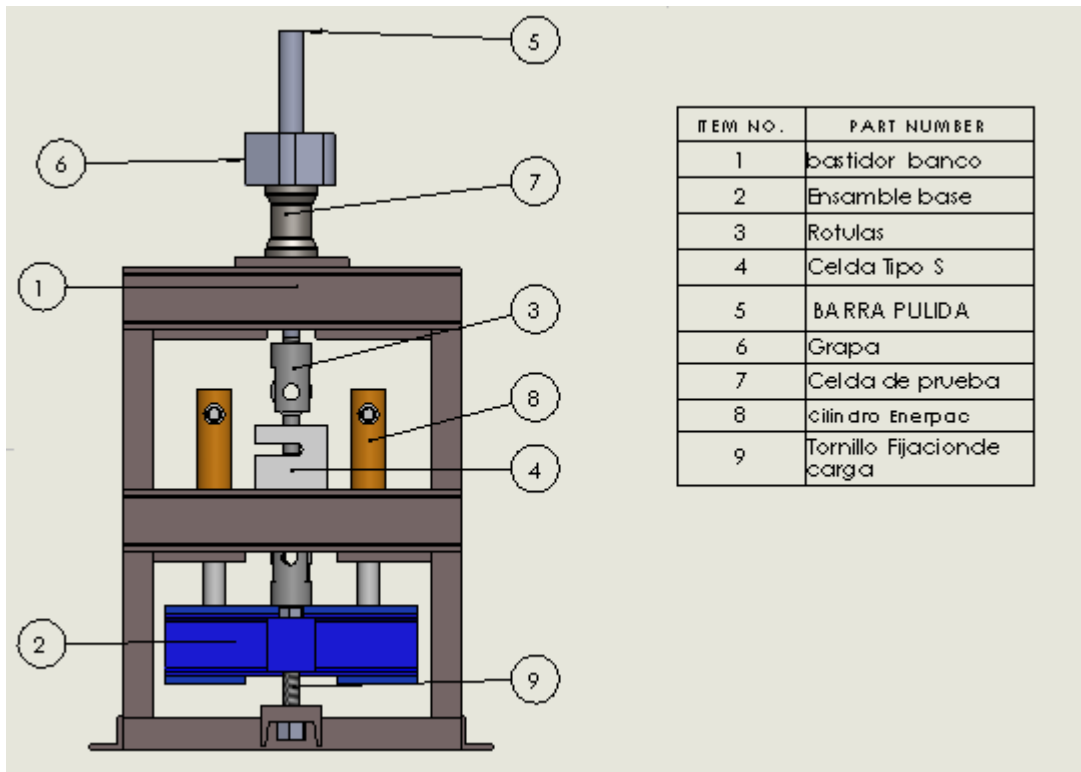


Fuente: Autores

6.1 PARTES DEL BANCO DE PRUEBAS, PARTE ESTRUCTURAL

El banco de pruebas se compone básicamente de nueve piezas y un sistema de adquisición de datos para las celdas de carga que se hablara en el capítulo 7 Sistema de adquisición de datos.

Figura 104. Partes Banco de Pruebas.



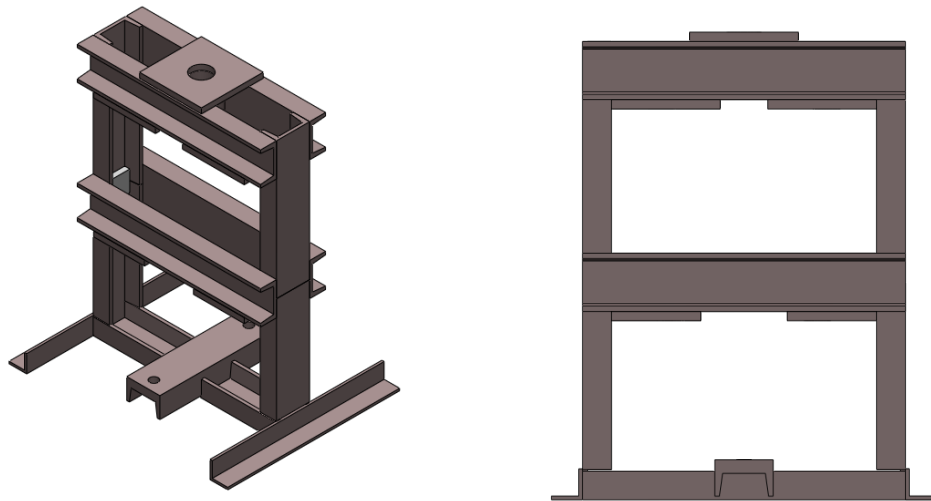
Fuente: Autores.

En la figura 104 se tiene una vista frontal del banco de pruebas junto con el etiquetado de cada uno de sus componentes, a continuación se describirá cada uno de ellos y la función que cumplen en el banco.

6.1.1 Bastidor del banco. El bastidor del banco está fabricado en hierro, y este contiene la geometría necesaria para que los cilindros hidráulicos del Enerpac se

adapten al él, unas roscas para que encajen, además hará las veces de soporte para la celda de carga, simulando la brida, en este punto la placa superior tiene un orificio para permitir el paso de la barra pulida a través del banco. En la parte inferior del banco se encuentran los apoyos para mantener los tornillos de sujeción que irán unidos al ensamble base y que suplirán la función de mantener la carga de los Enerpac fija.

Figura 105. **Marco del banco de pruebas.**



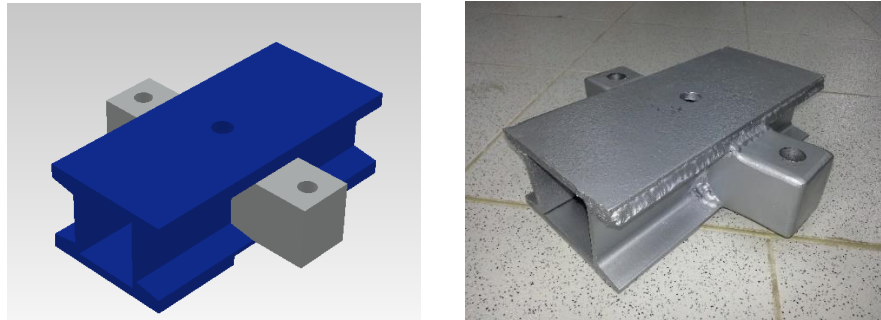
Fuente: Autores.

6.1.2 Ensamble base. Este ensamble consta de dos perfiles de hierro unido por una palca superior y dos inferiores, además de dos apoyos para los tornillos de sujeción. Esta forma del ensamble aporta la suficiente inercia para que los cilindros Enerpac distribuyan su fuerza sin que se deforme el mismo.

La placa superior aporta el apoyo para la celda de carga tipo S a través un tornillo, Además de esto se incluyeron dos apoyos en los extremos para fijar los tornillos

de sujeción, los cuales permiten desactivar los cilindros Enerpac después de ser cargados para mantener la carga en el sistema.

Figura 106. **Ensamble de celda tipo S**



Fuente: Autores.

6.1.3 Rotulas. Las rotulas juegan un papel importante en la instalación de una celda de carga, en este caso para la tipo S, las rotulas permiten que la fuerza sea totalmente axial sobre celda de carga, de lo contrario

6.1.4 Celda de Carga Tipo S. Esta es una celda de carga de tensión que tiene una capacidad de 10.000 lb, en la tabla 10 se muestran las características de ella.

Tabla 10. Característica de la celda tipo S.

Marca	Sensotronics
Capacidad	10.000 lbs
Tipo	Tensión
Referencia	60001 ^a 10
Salida a plena escala	2,995

Fuente: Catalogo Sensotronics

Esta celda de carga es la encargada de sensar la carga impuesta por el sistema hidráulico, y a su vez es el patrón de medida para caracterizar el transductor que se está evaluando; la señal emitida por la celda es obtenida a través de un módulo para celdas de carga de National instruments y mostrada en Labview. En el capítulo 7 se hablara en detalle sobre la captura de datos y los dispositivos usados.

Figura 107. **Celda de carga tipo S.**



Fuente: Autores.

Para tener fiabilidad sobre los datos obtenidos de la celda de carga tipo S, se sometió la celda de carga a una prueba de tensión en la máquina de ensayos universal MTS 810, donde se comparó el valor sensado con la tipo S y el valor dado por la MTS 810.

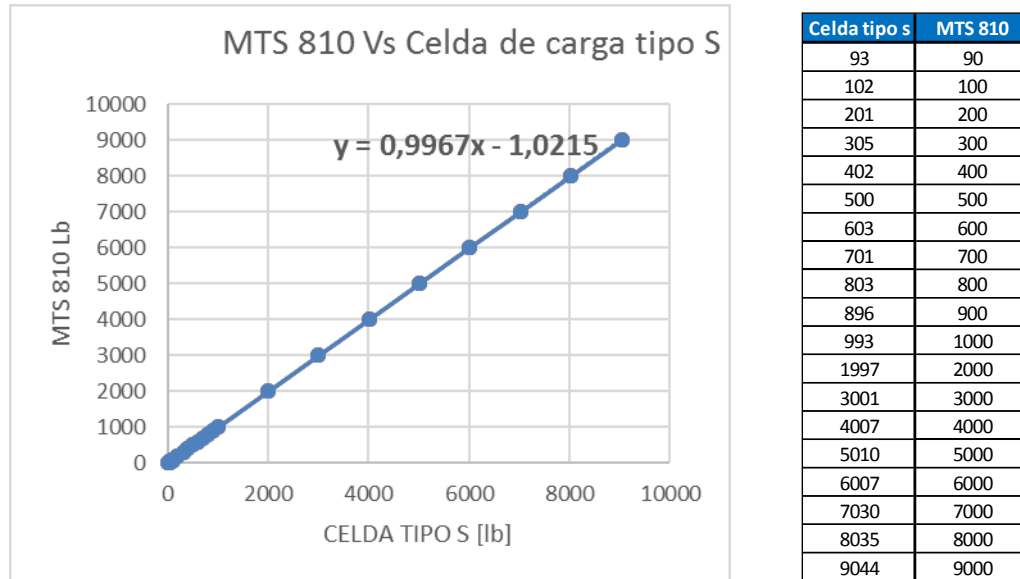
Figura 108. Celda de carga montada en MTS 810.



Fuente: Autores.

Al obtener los datos de la MTS 810 y de la celda tipo S, se verifica que tan confiable son los valores de la tipo S y según los datos que se observan en la figura 109 la variación de unos datos respecto a los otros, considerando las altas cargas que se sensaron, no es tan considerable, por los tanto se establece que la celda de carga tipo S, es un sensor muy fiable.

Figura 109. **Comparación valores de carga MTS 810 vs Tipo S**



Fuente: Autores

6.1.5 Barra Pulida. Este elemento del banco de pruebas es una barra de 1 ¼ in que permite unir la celda de carga en uno de sus extremos y en el otro será instalada la grapa.

El material usado para fabricar la barra pulida es acero SAE 1045, se eligió este material ya que proporciona condiciones de estabilidad, muy poca deformación para las cargas a las que será sometido y costos bajos.

La barra, que simula la barra pulida de un sistema de bombeo mecánico, fue dotada con una rosca en uno de sus extremos para permitir conectar la celda de carga tipo S, tal como se ve en la figura 110.

Figura 110. **Barra pulida.**



Fuente: Autores.

6.1.6 Grapa. La grapa es una abrazadera que permite fijar la posición de la sarta de varillas y de la bomba que están conectadas a ella, de tal forma que cuando la grapa se fija a la barra pulida esta se apoya en el porta barras para producir el movimiento que le proporciona el cabezal del sistema de bombeo.

Figura 111. **Grapa**

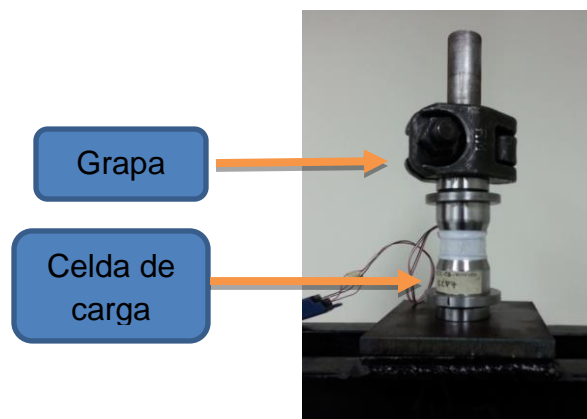


Fuente: Autores.

6.1.7 Celda de carga a compresión. Del mismo modo que se instalaría la celda de carga en el sistema de bombeo mecánico se instala la celda de carga de compresión en el banco de pruebas, se requeriría mantener el peso que soporta la barra pulida, que en el caso real sería la sarta de varillas y la bomba, y en el banco de pruebas la celda de carga tipo S unida al ensamble de la celda que permite la sujeción de la carga, retirar la grapa e introducir la celda de carga en la barra pulida hasta que quede apoyada en el porta barras, que en el banco de pruebas corresponde al marco del banco, y de nuevo instalar la grapa, asegurarla y reiniciar su funcionamiento, en el banco de pruebas la celda de carga necesitará conectarse al sistema de adquisición de datos para poder leer su medición.

Buscando una innovación desde el proyecto de pozo y campo inteligente la celda de carga tendría que ser inalámbrica de tal modo que no habrá cables que conecten a la celda de carga, bien sea para adquisición de datos o para alimentación eléctrica. Los alcances de este proyecto llegan hasta la construcción de la celda de carga y la preparación de esta para que el sistema de adquisición de datos, proporcionado por otro proyecto de grado, pueda ser instalado y funcionar de manera inmediata.

Figura 112. **Montaje de Celda de carga de compresión y grapa**



Fuente: Autores.

6.1.8 Cilindros hidráulicos Enerpac. Estos cilindros son los dispositivos que tendrán como función generar la carga que se transmitirá a la celda de carga, son cilindros hidráulicos que a través de una bomba mecánica manual se generará el flujo del fluido que proporcionará presión a los cilindros.

En la tabla 11 se presentan algunas características del sistema Enerpac.

Tabla 11. Características Sistema Hidráulico Enerpac.

Marca	Enerpac
Capacidad	10.000 psi
Tipo	Hidráulico
Referencia	P-39
Vol Aceite por embolada [in ³]	0,16

Fuente: Autores.

La figura 113 muestra la bomba hidráulica manual que tiene el sistema Enerpac, esta es la encargada de generar el flujo de fluido que va hasta los cilindros hidráulicos que, tiene incluido en su sistema un manómetro para controlar la presión ejercida en el sistema, además de tener una válvula de alivio que permite el retroceso de los cilindros después de ser cargados.

Figura 113. Bomba manual sistema Enerpac.



Fuente: Autores.

Los cilindros Enerpac son cilindros de simple efecto, estos tiene una capacidad de 10.000 psi cada uno, de igual forma que la bomba, esto conforme a la capacidad de la celda de carga de tensión tanto como la de compresión. El diámetro de los cilindros del pistón es de 1 in. La figura 114 muestra los cilindros Enerpac.

Figura 114. **Cilindros Enerpac.**

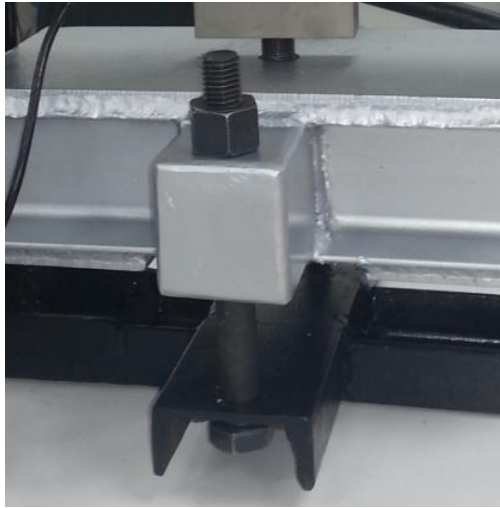


Fuente: Autores.

6.1.9 Tornillos de sujeción. Estos tornillos permiten anclar el sistema después de estar ejerciendo toda la carga sobre las celdas, este sistema fue necesario incluirlo debido a que los cilindros Enerpac después de un tiempo cedían cambiando la carga aplicada a la celda.

Estos tiene incluidos unas tuercas en la parte inferior para cumplir con la sujeción necesaria, para facilitar la sujeción de ellos el marco dispone de una sujeción que permite apoyar las tuercas sin que se giren. Los tornillos y las tuercas montadas en el banco se pueden ver en la figura 115.

Figura 115. Tornillos de sujeción.



Fuente: Autores

6.2 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE BANCO DE 10.000 LB

El sistema de adquisición de datos del banco para pruebas de 10.000lb de capacidad está constituido por un módulo para celdas de carga con referencia NI9237 y un chasis de referencia NI CDAQ-9174 de la marca National Instruments, esta instrumentación está especialmente diseñada para la lectura de celdas de carga y para puentes de Wheastone de galgas extensiométricas.

6.2.1 Chassis NI cDAQ-9147. El chassis tiene capacidad para soportar 4 módulos de diferentes tipos, permite la medida de entradas y salidas digitales en el mismo chassis. Los módulos están disponibles para una variedad de medidas de sensores incluyendo termopares, RTD, galgas extensiométricas, transductores de carga y presión, celdas de torsión, acelerómetros, medidores de flujo, y los micrófonos. Los sistemas NI CompactDAQ combinan medidas de sensores con tensión, corriente y señales digitales para crear sistemas personalizados de

medidas mixtas con un solo cable, simple USB a la PC, para la medición de las galgas se usó solo uno, el NI9237 un módulo de puente de cuatro canales.

Figura 116. **Chassis NI cDAQ-9174**



Fuente. Autores.

6.2.2 Módulo NI9237. El módulo permite la conectividad con RJ50. La versión RJ50, también conocida como 10P10C, ofrece conexión del sensor rápido porque se puede utilizar para la conexión del puente de wheastone montado en la celda de carga. El módulo se muestra en la figura ##.

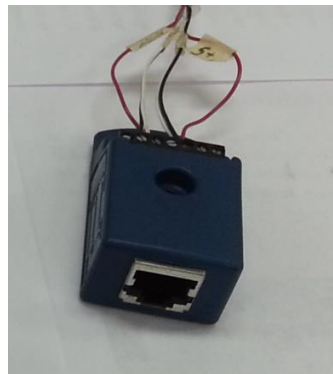
Figura 117. **Módulo NI9237**



Fuente. Autores.

La celda de carga tipo S también es conectada al módulo por medio de un adaptador que se muestra en la figura 118 este mismo adaptador es usado para conectar la celda de carga diseñada. Esta capacidad de conectar al tiempo las dos celdas permite comparar en tiempo real la lectura de la celda de carga tipo S con la celda de carga diseñada, las dos señales transmitidas son leídas desde un VI programado en Labview que se muestra en la figura 117.

Figura 118. **Adaptador**



Fuente: Autores.

6.2.1 Programa de adquisición de datos Labview. La programación del módulo cuenta con bloques especiales para la medición del puente de wheastone como lo es el DAQ Assistant, este bloque permite configurar entre opciones como:

- ✓ El puente de Wheastone que se tiene conectado en la celda de carga. Para el caso configurado en la celda de carga tipo columna el puente de Wheastone es completo, se usan las cuatro galgas.
- ✓ El voltaje de excitación de las galgas, el voltaje recomendado por el fabricante de las galgas es de 5 volts, aunque el módulo permite usar 10 volts.
- ✓ Los valores de resistencia de las galgas.
- ✓ El factor de la galga, propiedad de la galga.

La señal de salida del puente de Wheastone tiene magnitudes de los milivoltios, haciendo que no cualquier instrumento sea capaz de leer dichas magnitudes, esta misma razón genera problemas en cuanto a ruidos filtrados en la señal leída, en este caso y gracias a la instrumentación usada de National Instruments, dentro de la programación del software de adquisición de datos se incluyó un filtro pasabajas para acondicionar la señal de tal forma que permite una lectura más limpia del voltaje, sin embargo un aspecto importante en el que influye este problema es en la definición del intervalo de medidas que es capaz de generar la celda. En otras palabras dicho intervalo no estaría siendo limitado por la capacidad de las galgas de leer valores pequeños de carga si no por la capacidad del instrumento para medir dichos resultados por parte de la galga. En el capítulo 8 análisis de resultados, se detalla el intervalo de medición obtenido por la instrumentación de National instruments).

De manera general la mayoría de las aplicaciones con galgas extensiométricas involucra las partes que se muestran en el diagrama de bloque de la figura 119.

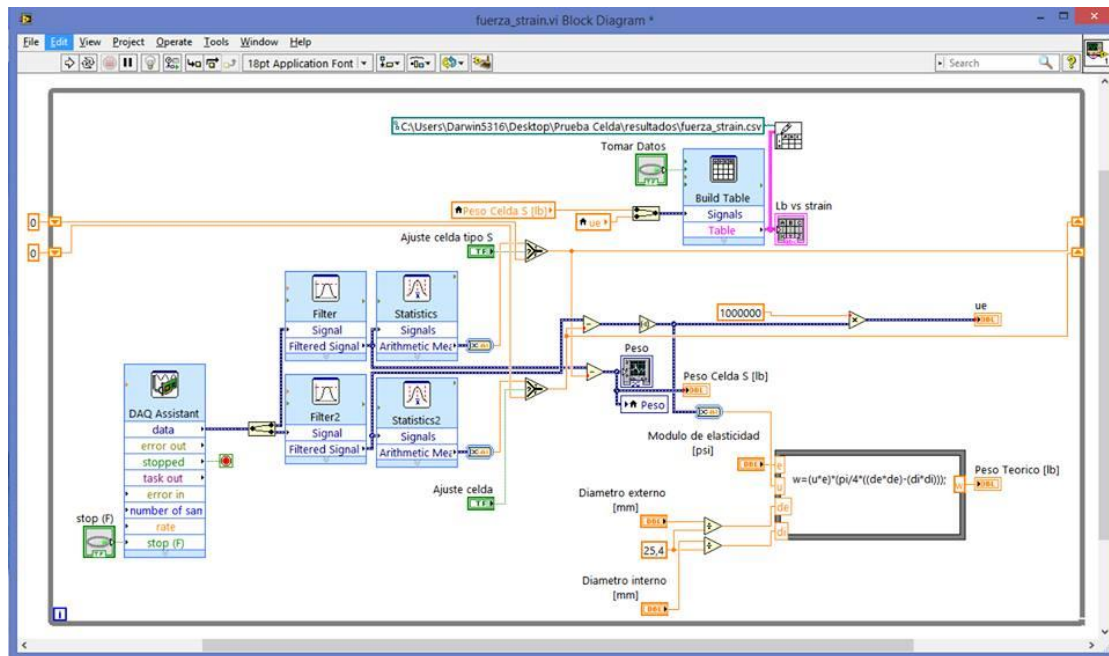
Figura 119. Diagrama de bloques de programación.



Fuente: Autores.

Del diagrama de bloques se entiende que la Magnitud Física estaría representada por la fuerza aplicada por los cilindros hidráulicos Enerpac, el sensor correspondería a la celda de carga tipo S y la tipo columna diseñada. El módulo de acondicionamiento es digital ofrecido por el filtro pasabajos y amplificador. Antes de ello se encuentra el sistema de adquisición de datos que corresponde al módulo de National Instruments que permite leer la deformación de las galgas traducido en voltaje y por último el computador que hace de interfaz.

Figura 120. Programación sistema de adquisición de datos labview.



Fuente: Autores

La figura 121 muestra la interfaz gráfica del programa de adquisición de datos, el cual permite adquirir la información y exportarla a Excel para su tratamiento y análisis.

6.2.4 Interfaz Gráfica del programa Labview. En la interfaz se incluyeron las imágenes de la celda de carga tipo s y la tipo column y junto a ellas un cuadro de texto para cada una en el cual se muestra, para la celda tipo s el valor de la carga que se le aplica y al mismo tiempo para la celda tipo column el valor del voltaje de salida del puente conectado. De esta manera es que se caracterizó cada una de las celdas de carga fabricadas, este paso es de vital importancia ya que será la entrega que se le realizará a los ingenieros electrónicos que desarrollarán el sistema de adquisición de datos propio de la celda de carga diseñada, estos resultados serán mostrados en el capítulo 8.

El programa diseñado para leer voltaje de salida del puente de Wheastone permitió corroborar una de las condiciones del diseño de la celda de carga, este es la compatibilidad del material usado para la celda de carga con la aleación usada para la fabricación de las galgas, es decir corroborar el código creep propio de cada galga; para el diseño se tiene dos opciones de tipo de aleación en las galgas como se mostró en el capítulo 4.

Otra de las partes de la interfaz gráfica muestra dos columnas en las que se muestra toda la información que se va almacenado para cada prueba realizada; la toma de información puede ser iniciada y finalizada en el momento que se desee por medio de un botón programado para dicha función.

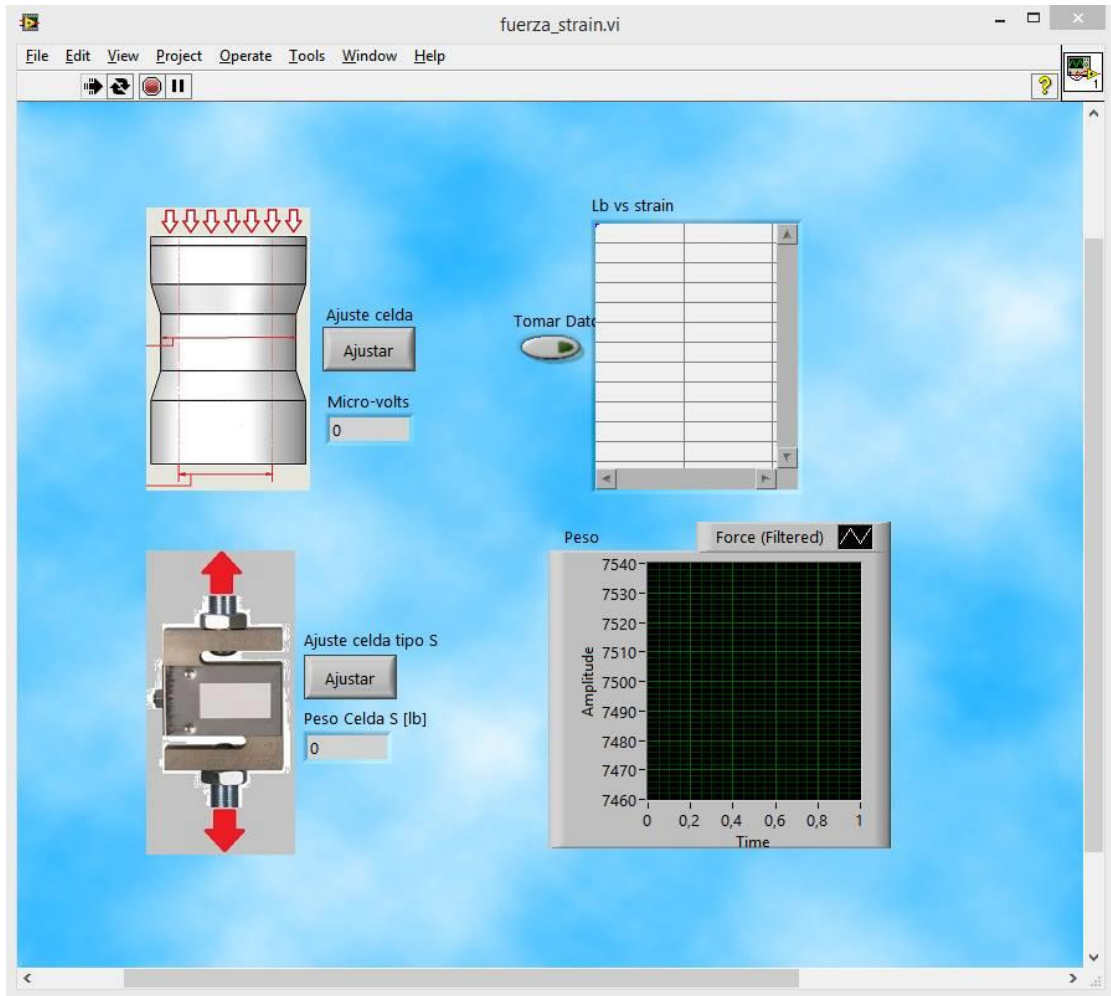
Un aspecto importante en el sistema de adquisición de datos, tanto para el usado para las pruebas National Instruments, como para el sistema que se diseñará específicamente para la celda de carga es que este permita tarar la celda de cara

en un cero, pues por diversas razones ninguna celda de carga está en cero desde el momento en que se empieza a usar, estos son:

- ✓ En el momento de pegar las galgas se puede producir un esfuerzo en las mismas, sea con el pegante instantáneo o con el pegante de curado a temperatura.
- ✓ El mismo peso de la celda produce variaciones en la resistencia de la celda de carga que se ven reflejadas en cambios en el voltaje de salida del puente de Wheastone.
- ✓ La longitud del cableado usado para conectar cada galga dentro del puente de Wheastone se comporta como resistencia al paso de la corriente, el problema podría engrandecer la variación del cero por tener longitudes diferentes en el cableado.
- ✓ Por seguridad en las conexiones del cableado interno del puente, este debe ser conectado a los cables de alimentación y de señal a través de unos pads especiales para la aplicación, estas soldaduras también representan resistencias en el circuito hacia el módulo de adquisición de datos.

Por tales razones fue necesario incluir un botón para ajustar la lectura inicial, tanto de la celda tipo s como de la celda tipo columna diseñada, y tener un cero desde el cual empezar las diferentes pruebas.

Figura 121. Interfaz gráfica de programa de adquisición de datos.

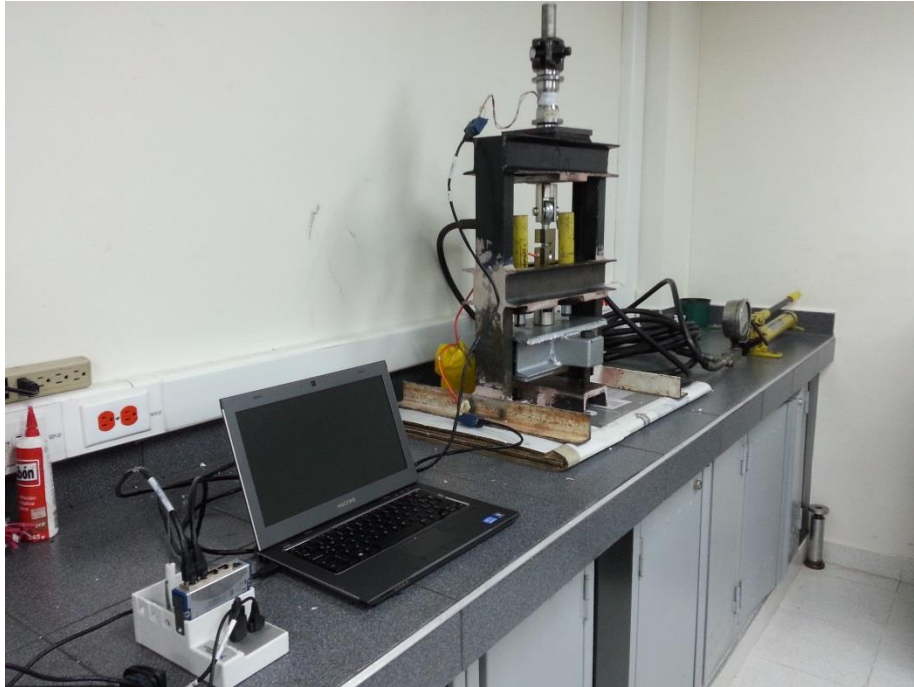


Fuente: Autores.

Por último se tiene una gráfica en la cual se muestra la amplitud de la señal leída en la celda de carga tipo columna, en razón de ver gráficamente la variación de su magnitud.

La figura 122 muestra el sistema de adquisición de datos de National Instruments conectado a la celda de carga de columna y la celda de carga tipo S montadas en el banco de pruebas diseñado y construido específicamente para el diseño de la celda de carga tipo columna.

Figura 122. **Sistema de Adquisición de datos y banco de pruebas.**



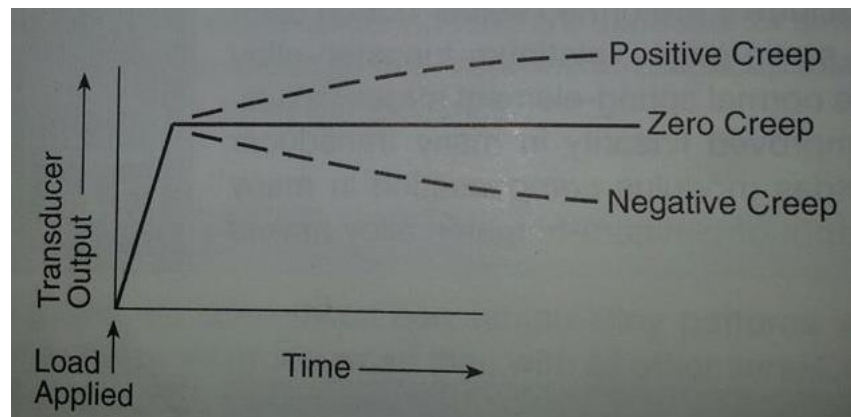
Fuente: Autores.

6.2.5 Adquisición de datos. La adquisición de datos empieza con una parte fundamental para el diseño de la celda que corresponde a la corroboración del creep code propio de cada galga. El creep code es una característica propia de cada galga, tanto así que viene especificado en cada empaque en el que se encuentra cada galga.

6.2.6 CREEP. Todos los transductores comerciales traen especificado un creep, esto se refiere directamente en su traducción a fluencia, y esta fluencia está directamente relacionada con la galga y el material de la galga usada. Físicamente las implicaciones que se tienen están reflejadas en el momento en que la galga está deformada debido a un esfuerzo y esta busca la formada estabilizar los esfuerzos producidos en ella deformándose bien sea de forma positiva o negativa,

de ahí que lo ideal es que este tenga las variaciones más pequeñas posibles, pues esto representaría un problema en las mediciones reales, así se debe encontrar el creep característico para cada material usado, en el caso del diseño de la celda de carga se tienen dos códigos creep, dos galgas diferentes seleccionadas, y es necesario probar cada una de ellas en el mismo material para corroborar dicha condición de diseño.

Figura 123. **Creep**



Fuente: Transducer –Class Strain Gages.

La figura 123 muestra un ejemplo de las variaciones posibles que se tendrían, positiva cuando la salida del puente aumenta y negativa cuando la salida disminuye a lo largo del tiempo.

Debido a que el creep code de cada transductor depende de muchas variables como el material de la celda de carga, los tratamientos térmicos, el campo del esfuerzo al que se someterá la galga y el tipo de adhesivo es imposible predecir la selección de una galga con la compensación adecuada para lograr el mejor resultado de creep.

El fabricante de las galgas recomienda probar varias galgas con diferentes creep compensation en razón de encontrar experimentalmente el mejor resultado; con eso en mente se realizaron diferentes pruebas con los dos tipos de galgas seleccionados para transductores de la clase de la celda de carga tipo columna diseñada. Estas son la serie N2A y la serie N2K.

6.2.7 Pruebas Creep Compensation

En la figura 124 se muestra la prueba realizada a cuatro especímenes, dentro de ellas está la celda de carga tipo s, una segunda celda de carga de Acero inoxidable AISI 420 con galgas de la serie N2A, la tercera celda de carga de Acero inoxidable con galgas de la serie N2K y por último una celda de carga de Alumold 500 con galgas de la serie N2A. El fabricante recomienda realizar las pruebas durante un periodo de 20 minutos a carga constante, para el diseño de la celda la cara constante será en reposo.

Es importante resaltar que cada par de celdas de carga tienen las mismas dimensiones y el mismo tipo de puente conectado, de igual importancia es de resaltar que estas dimensiones corresponden al diseño final de la celda de carga para el Acero AISI 420.

A pesar de tener más especímenes de cada celda de carga solo se realizaron pruebas de 4 en 4 celdas debido al módulo NI9237, solo se cuenta con uno de ellos (cada uno cuenta con 4 conexiones).

Se denominaron las celdas de carga como se muestra a continuación para tener un control sobre los datos tomados y poder comparar resultados.

N2A-4G-INOX420-2:

- ✓ N2A: Denotando la serie
- ✓ 4G: Para definir el puente de Wheastone completo.

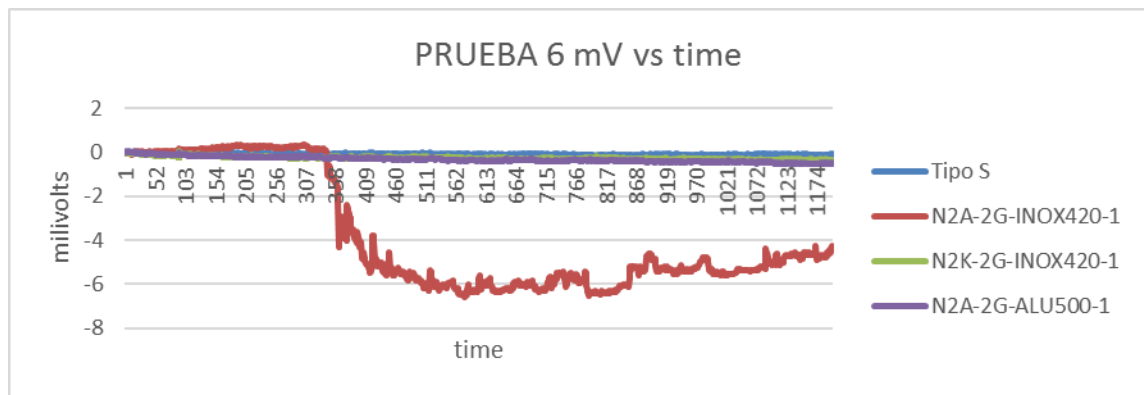
- ✓ INOX420: Para definir el material usado (Para el caso AISI 420)
- ✓ 2: Para el segundo prototipo de este tipo de celda.

PRUEBA 1.

En la figura 124 se analizaron las siguientes celdas de carga:

1. Celda de carga tipo S
2. N2A-4G-INOX420-1
3. N2K-4G-INOX420-1
4. N2A-4G-ALU00-1

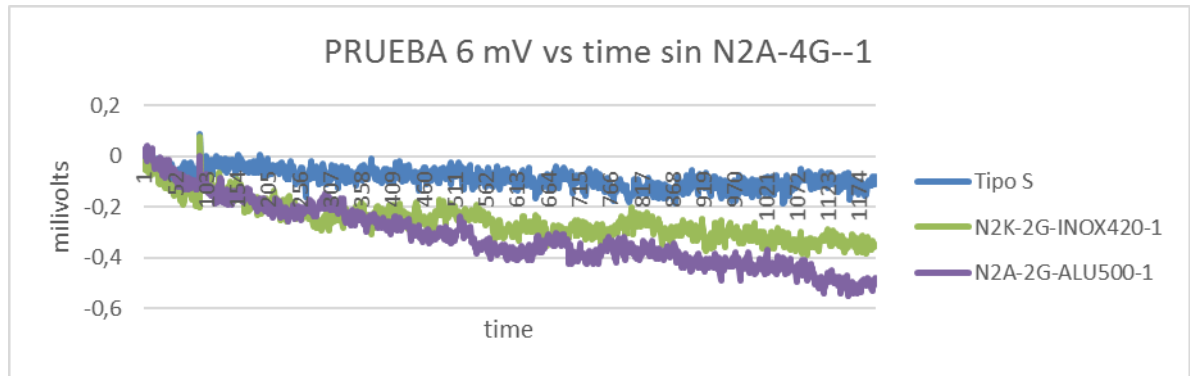
Figura 124. **Prueba 6 mV-tiempo**



Fuente: Autores.

La gráfica de la figura 124 y la figura 125 son idénticas, la diferencia se encuentra en que en la 125 se omitió la gráfica de la celda de carga N2A-4G-INOX420-1 debido a que tenía variaciones muy grandes que no dejaban apreciar las variaciones más pequeñas de las otras celdas.

Figura 125. Prueba 6 mV-tiempo 13 sep 3 celdas



Fuente: Autores.

De la figura 124 se puede ver claramente cómo se comporta cada una de las celdas en el tiempo frente a una carga constante, en este caso la carga es 0, para el caso de la celda N2A-4g-INOX420-1 se ven variaciones muy grandes que determinan que este serie de galga no es compatible con este material, pues las variaciones en el voltaje son negativas llegando hasta -7 mV.

La celda de carga tipo S, al ser una celda de un fabricante con experiencia en el mercado, se ve que es la más estable, confirmándola como un buen patrón para corroborar el diseño de la celda de carga tipo columna, sus variaciones no superan 0,05 mV.

El mismo tipo de galga usado en el material Alumold 500 muestra unas variaciones más grandes llegando hasta aproximadamente 0.55 mV, comprobando que el material no es tan compatible con este tipo de galga. Es importante resaltar que las dimensiones de la celda de carga de Alumold 500 son obviamente diferentes a las de acero AISI 420, esto debido a que las propiedades mecánicas de cada uno son diferentes.

Por último y la mejor opción en esta gráfica para el diseño de la celda corresponde a la celda de carga de acero inoxidable AISI 420 que tiene un puente de

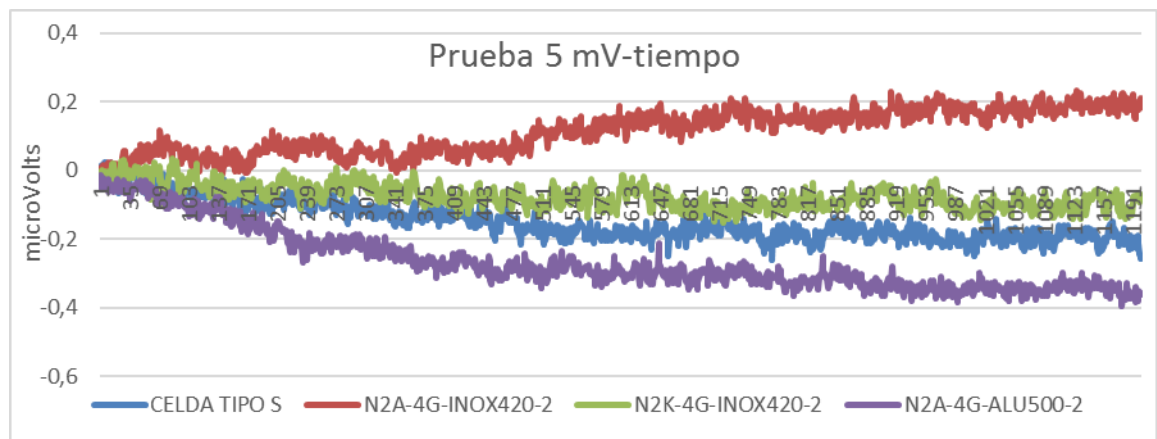
Wheastone conformado por galgas de la serie N2K y que muestra variaciones en su lectura de aproximadamente 0,38 mV.

PRUEBA 2.

En la figura 126 se analizaron las siguientes celdas de carga: (corresponden a las mismas configuraciones y materiales de la prueba 1 pero esta vez para una segunda celda de cada una)

1. Celda de carga tipo S
2. N2A-4G-INOX420-2
3. N2K-4G-INXO420-2
4. N2A-4G-ALU00-2

Figura 126. **Prueba 5 mV-tiempo**



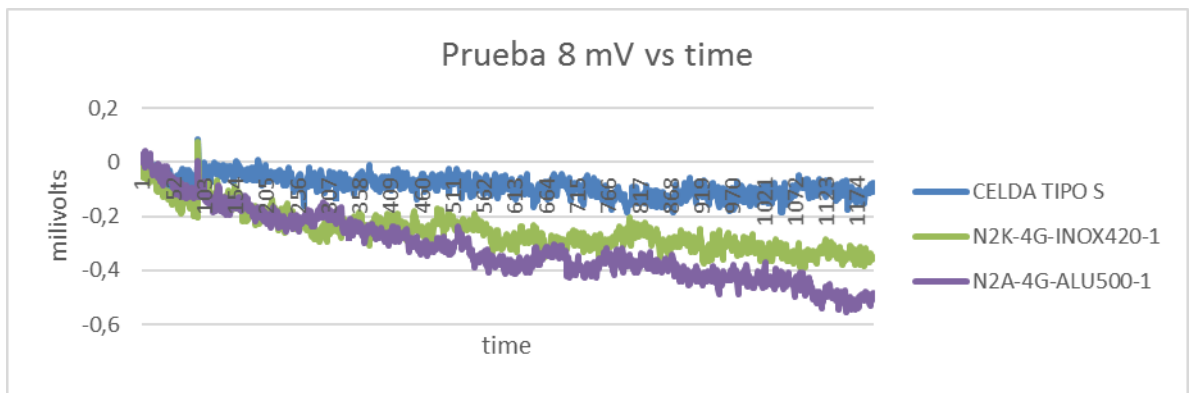
Fuente: Autores.

En la prueba 2 de nuevo se presenta la celda de carga tipo S como una de las más estables con variaciones negativas máximas de aproximadamente 0.25 mV. Sin embargo la celda de carga inoxidable AISI 420 muestra esta vez un resultado más cercano al cero con una variación máxima de aproximadamente 0,15 mV.

En la misma gráfica de nuevo se ve la incompatibilidad del acero inoxidable AISI 420 con las galgas de la serio N2A al tener variaciones positivas de más de 0.2 mV.

Mientras que el Alumold 500 también demuestra variaciones de casi 0,4 mV dejándola en la cola en la selección del material final de la celda de carga.

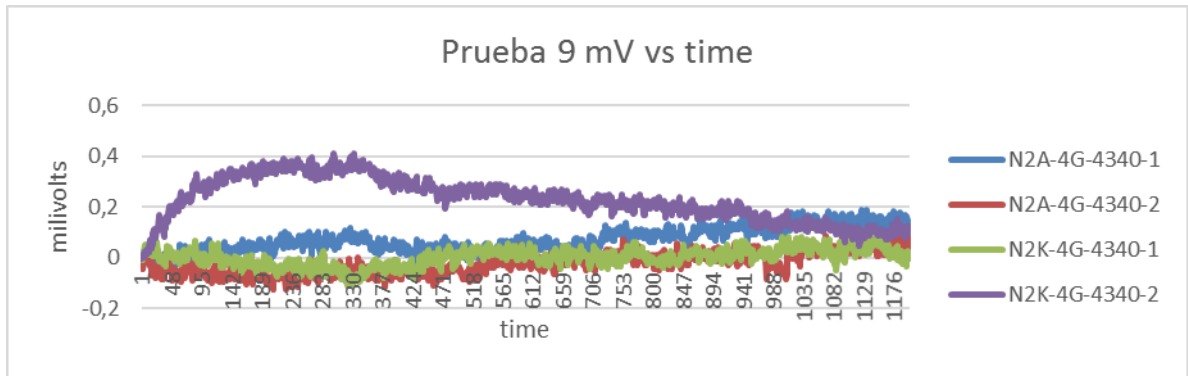
Figura 127. **Prueba 8 mV-tiempo 12 septiembre**



Fuente: Autores.

En la figura 127 se ve de nuevo la necesidad de quitar de la gráfica la celda de carga inoxidable con galgas N2A por su incompatibilidad y mostrando de nuevo a la celda con el mismo material pero con las galgas de la serie N2K como las mejores en cuanto a variación de voltaje en el tiempo.

Figura 128. Prueba mV-tiempo



Fuente: Autores.

En la figura 128 se muestra la prueba realizada para las 4 celdas idénticas fabricadas en acero 4340, dos de ellas con galgas N2A y dos con N2K, las cuales demuestran una incompatibilidad de las galgas de la serie N2A con el material debido a variaciones de hasta 0,4 mV. Sin embargo presentan un buen comportamiento con la serie N2K, pues las variaciones no superan 0,1 mV.

Aunque es una variación más pequeña que la que presenta las celdas de acero inoxidable AISI 420, esta es rechazada por no cumplir con la condición de soportar las condiciones ambientales a las que estará sometida la celda en el pozo de Campo Escuela Colorado, exactamente con la oxidación que presentaría.

Por tal razón la mejor elección del material para la celda de carga es el acero inoxidable AISI 420, el cual cumple con las condiciones de diseño: Soportar las condiciones ambientales del pozo (oxidación), cumplir con los requerimientos de carga para los que será diseñado, generar la deformación necesaria para que las galgas funcionen de manera adecuada (1500 MicroStrain) y corroborar el creep compensation o la compatibilidad con las galgas usadas.

7. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos propio para la celda de carga es diseñado en otro proyecto de grado por ingenieros electrónicos, en el cual su objetivo es obtener un dispositivo electrónico que permita obtener las señales de aceleración y giro sobre el machín, además de la señal de esfuerzo y estar ser transmitidas a diferentes dispositivos en los cuales se hará el debido tratamiento de la información y con esto tener a la mano dicha información completa y en tiempo real.

El diseño de la tarjeta de adquisición de datos se muestra en la figura 129, la cual tiene determinada y fue acordada de acuerdo a las especificaciones de tamaño de la celda de carga y la carcasa diseñada para esta, esto representó un reto para ellos debido al tamaño que se destinó en la carcasa de la celda de carga. (Capítulo 3.5 diseño de la carcasa).

El diseño de la tarjeta que se colocará sobre el machín contará con los siguientes dispositivos electrónicos:

- ✓ Acelerómetro MMA8451Q
- ✓ Giróscopo L3G4200D
- ✓ Microcontrolador MCF51AC256A
- ✓ XBEE PRO
- ✓ ADS1232

Donde cada uno de los componentes tiene una función vital para el sistema de adquisición de datos, así el Microcontrolador MCF51AC256 tiene la función de adquirir las señales de los sensores, de aceleración y giro.

La combinación del acelerómetro y el giroscopio permiten determinar la posición de la bomba durante su recorrido e identificar el punto en que la boba llega a la

parte superior de su recorrido descargando todo el crudo extraído y comienza su carrera ascendente de nuevo.

La transmisión inalámbrica de los datos se da gracias a la XBEE PRO. Los módulos Xbee pro ofrecen un alcance en línea de vista directa de hasta 1 Km, propiedad que se puede usar fácilmente para transmitir los datos hasta una posición cerca al pozo.

El convertidor ADS1232 es un conversor análogo-digital de 24 bits, resulta bastante adecuado en aplicaciones donde se necesitan sensar cambios pequeños de tensión en celdas de carga a partir de un puente Wheatstone que es el sistema usado en la celda de carga tipo columna diseñada.

Figura 129. **Tarjeta de adquisición de datos**



Fuente: Medición del esfuerzo mecánico y distancia de recorrido sobre una barra pulida- Cristian Sanchez, Juan Camilo Santana.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pruebas realizadas en el banco de pruebas para 10.000 lb consistían en comparar los resultados ofrecidos por el patrón, que para el caso es la celda de carga tipo S, la cual fue corroborada con la máquina de ensayos universales MTS 810; por medio de la celda tipo S se comparó el resultado de la salida en voltaje de la celda tipo columna diseñada con la carga medida en la tipo S.

Al tener el diseño de la celda basado en el diseño estático y dinámico de la celda (capítulos 3.3 y 3.4 respectivamente) se espera que la celda trabaje siempre en el rango de deformación elástico, garantizando el comportamiento lineal de su deformación, esto hace que se espere por parte de la lectura de las galgas un comportamiento lineal también, esto será demostrado en la caracterización de la celda.

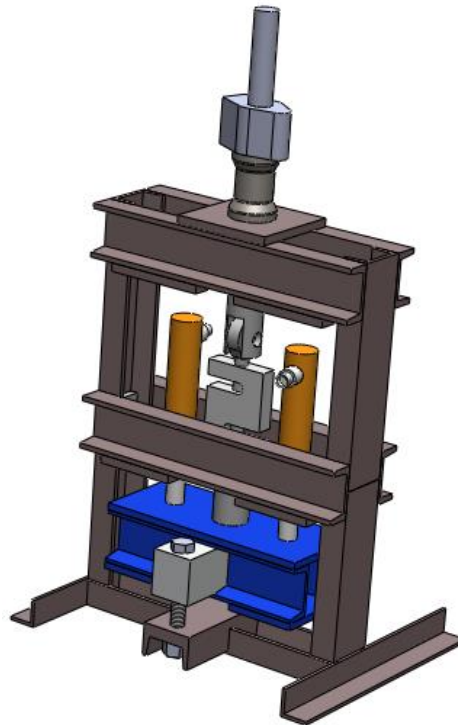
A continuación se caracterizará un grupo de 19 pruebas realizadas a la celda para después a partir de datos encontrados de dicha prueba se analice el número de pruebas necesario para garantizar la confiabilidad del resultado obtenido de la caracterización final de la celda de carga y como ya se demostró, el material seleccionado y el diseño generado corresponden al acero inoxidable AISI 420.

8.1 CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA DE CARGA

Cómo se nombraba anteriormente se espera una ecuación lineal; las pruebas realizadas muestran comportamientos como el mostrado en la figura 131, esta gráfica muestra la ecuación linealizada para un paquete de 40 pruebas; cada prueba se llevaba a cabo cargando la celda hasta 10.000 lb y descargándola de nuevo. Este gráfico tiene el eje y el voltaje medido en la celda de carga tipo columna a través del módulo de National Instruments (NI) y en el eje x el valor de

la carga correspondiente a dicho voltaje; se garantiza la correspondencia de las dos lecturas debido a la disposición de la celda de carga tipo S y la celda de carga tipo columna en el banco de pruebas de 10.000 lb y obviamente por estar conectados al módulos de NI. El montaje es mostrado en la figura 130.

Figura 130. **Montaje de celda de carga tipo s y tipo columna.**

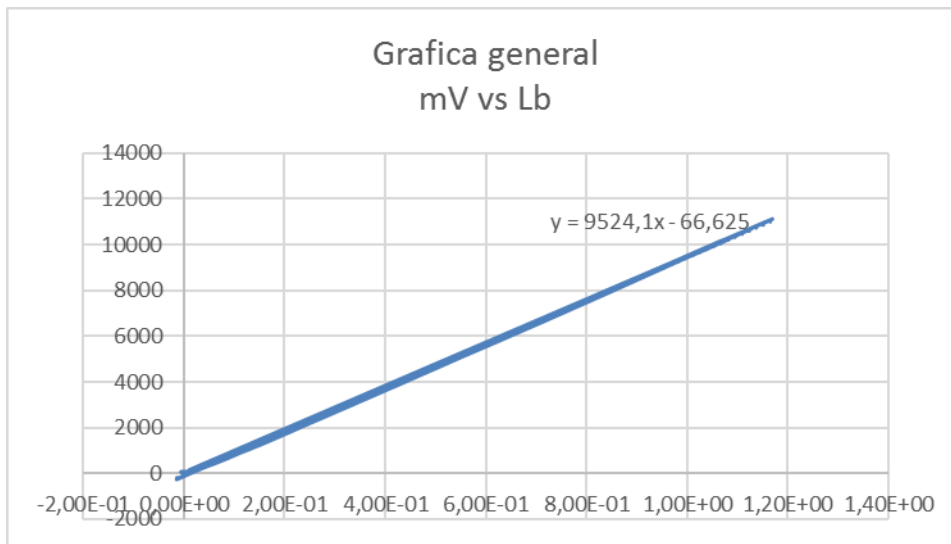


Fuente: Autores.

En la gráfica de la figura 131 se ve el comportamiento lineal que se espera en la celda de carga, pero cuando se va al detalle para comparar los resultados de la curva caracterizada con los valores reales se encuentran diferencias bastante grandes en el primer trayecto de la curva, esto se presenta debido a que la linealidad no se conserva al principio de la carga. Este efecto es producido directamente por las galgas extensiométricas. En un estimado y de acuerdo a las

pruebas hechos este rango varía desde 0 hasta aproximadamente 3700 lb. Los resultados se pueden ver en la tabla 12.

Figura 131. **Gráfica mV- Carga**



Fuente: Autores

La ecuación caracterizada que se usa es lineal, obviamente debido a la característica lineal de la deformación de la celda, que se produce en el rango elástico, pero al analizar los resultados se obtienen resultados que superan el 0,72 % de error, aunque no es mucho comparado con esta prueba, si se usa dicha ecuación para comparar los resultados con las demás pruebas se encuentran errores de hasta de 1,5 % que está representado en aproximadamente 150 lb por tal razón es necesario reducir el error visto en la ecuación.

Tabla 12. Comparación curva caracterizada

Voltaje [mV]	Carga leída [lb]	Carga calculada [lb]	Diferencia[lb]	% error
0,002096	-0,536161	-72,37	-71,83	-0,72
0,002147	-0,281108	-71,88	-71,60	-0,72
0,005217	22,480434	-42,64	-20,16	-0,20
0,03832	278,144236	272,71	5,44	0,05
0,106504	880,558327	922,24	-41,68	-0,42
0,148268	1276,07927	1320,09	-44,02	-0,44
0,1892	1665,94869	1710,02	-44,07	-0,44
0,285597	2596,22541	2628,32	-32,09	-0,32
0,284356	2583,17133	2616,50	-33,32	-0,33
0,38547	3556,91732	3579,73	-22,81	-0,23
0,399529	3693,53458	3713,66	-20,12	-0,20
0,493193	4589,25164	4605,92	-16,67	-0,17
0,537006	5010,55961	5023,29	-12,73	-0,13
0,602554	5635,47206	5647,71	-12,24	-0,12
0,657845	6166,25068	6174,43	-8,18	-0,08
0,711179	6673,36986	6682,50	-9,13	-0,09
0,733153	6886,385	6891,83	-5,44	-0,05
0,818852	7705,92142	7708,21	-2,29	-0,02
0,817402	7689,87929	7694,40	-4,52	-0,05
0,922153	8700,67738	8692,28	8,40	0,08
0,921639	8693,02011	8687,38	5,64	0,06
0,951669	8983,00156	8973,45	9,55	0,10
1,024171	9683,82761	9664,12	19,71	0,20
1,022586	9670,49033	9649,02	21,47	0,21
1,10177	10433,7381	10403,35	30,39	0,30

Fuente: Autores.

Tal solución consiste en dividir la ecuación de la gráfica en dos, de modo que una ecuación polinómica de grado 4 se adapte a la primera sección de la curva caracterizada, es decir desde 0 hasta 3700 lb aproximadamente y de 3700 lb hasta 10000 lb la ecuación lineal se adapta de mejor manera, tal como se ve en la tabla 12.

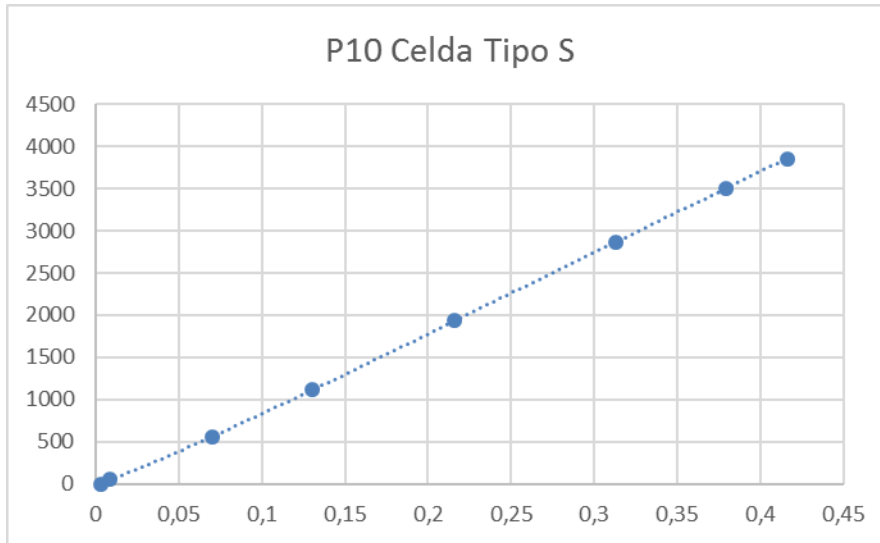
Es escogida una ecuación de grado 4 para la primera sección de la curva (ya que por limitaciones en cuanto a la instrumentación final que se diseñará para la celda por parte del proyecto MEDICIÓN DEL ESFUERZO MECÁNICO Y DISTANCIA DE RECORRIDO SOBRE UNA BARRA PULIDA), fue restringida a una ecuación polinómica de máximo grado 4, esto debido a consumo de recursos; esta ecuación de grado 4 definió el menor porcentaje de error entre los modelos cúbicos y cuadráticos posibles a elegir.

La solución propuesta es bien vista por los ingenieros electrónicos encargados del sistema de adquisición de datos, pues su sistema deberá adaptarse a las exigencias de la corrección del error.

En una de las pruebas se tomaron los datos obtenidos de voltaje de la celda tipo columna y los datos de carga obtenidos de la celda tipo S, estos están tabulados en el tabla 12.

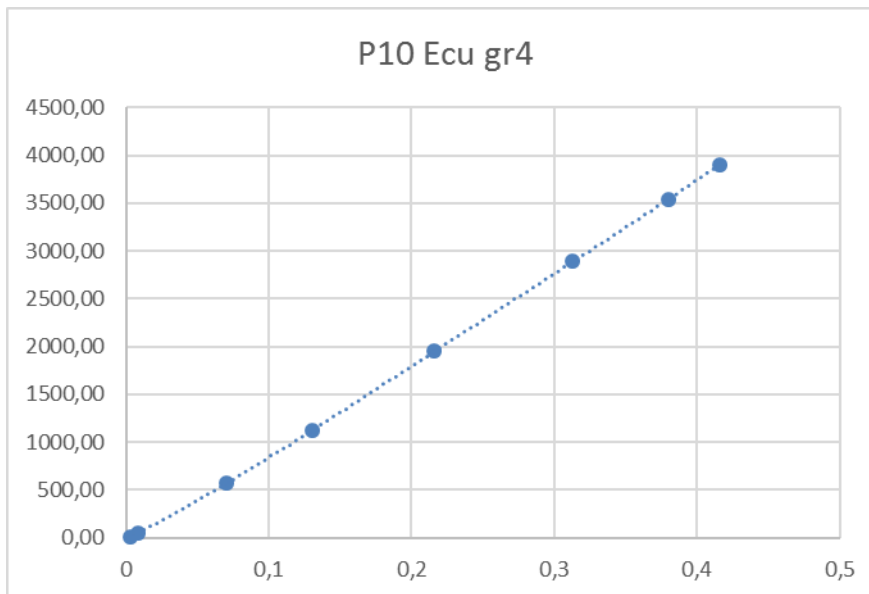
En la figura132 se muestra la curva generada por los datos obtenidos, en una de las 40 pruebas, de la celda tipo S que comparada con la figura 133, que muestra los datos obtenidos de la curva caracterizada, son prácticamente iguales.

Figura 132. **Curva de mediciones Celda tipo S.**



Fuente: Autores. Excel Resultados 1 N2K-1er-40 pruebas-AISI 420 (Prueba 10).

Figura 133. **Curva de ecuación caracterizada.**



Fuente: Autores. Excel Resultados 1 N2K-1er-40 pruebas-AISI 420 (Prueba 10).

Se determinó que la ecuación de grado 4 tenía mejores resultados obteniendo un error máximo de 0,12 % es decir aproximadamente 12 lb. Esto verificado a una de las celdas de acero inoxidable AISI 420 con el puente de Wheastone completo con galgas de la serie N2K.

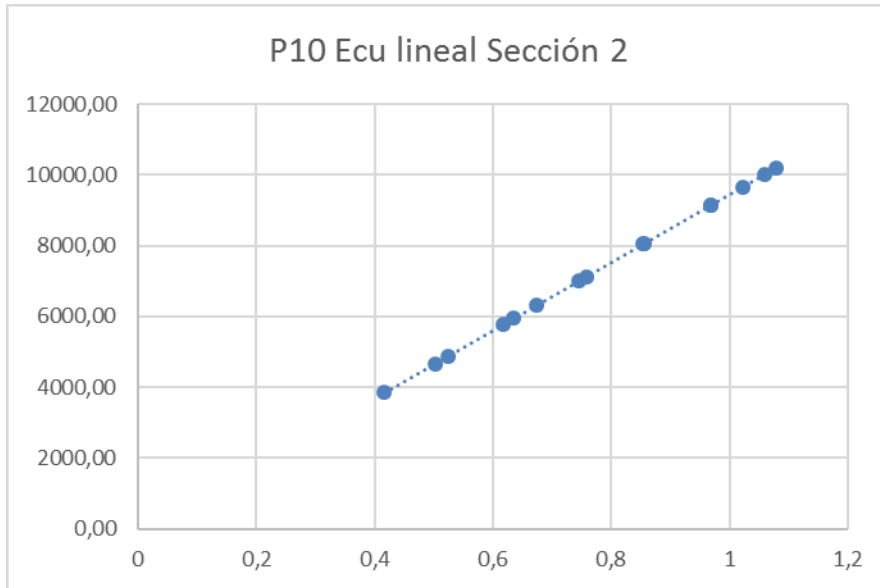
Las figuras 134 y 135 muestran la comparación entre la ecuación generada por la celda de carga tipo s y la ecuación lineal caracterizada en la sección 2 de la prueba (3700 lb a 10.000 lb) donde el comportamiento es más lineal. Son tan parecidas que debieron colocarse por aparte ya que en una misma gráfica no se apreciaría más que una sola línea.

Figura 134. **Línea recta de sección 2**



Fuente: Autores. Excel Resultados 1 N2K-1er-40 pruebas-AISI 420 (Prueba 10).

Figura 135. Ecuación de Línea caracterizada- sección 2



Fuete: Autores. Excel Resultados 1 N2K-1er-40 pruebas-AISI 420 (Prueba 10).

Del mismo modo la ecuación lineal generada presenta errores cerca del 0,32 % con respecto a los resultados de la celda tipo S.

Existe una solución alternativa para corregir dichos errores generados por la no linealidad de la curva caracterizada que se refiere a utilizar cierto tipo de resistencias conectadas en el puente de Wheastone que permitirán equilibrar y ajustar la curva a una línea más recta que la que se presenta en este momento, pero esta solución será implementada en la segunda fase del proyecto DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE POZO INTELIGENTE PARA CAMPO ESCUELA COLORADO- 8586 – FINANCIADO POR LA VICERECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO.

8.2 NÚMERO DE PRUEBAS Y CONFIABILIDAD.

Siendo uno de los valores más importantes dentro del análisis de una ecuación caracterizada se tiene que la desviación estándar o la llamada también varianza representa la variación de determinados datos con respecto al promedio de los datos. Con eso en mente el análisis estadístico estuvo enfocado en torno a la desviación que presentaba cada una de las ecuaciones generada en cada prueba.

De acuerdo a la teoría de estadística, se recomienda un intervalo de confianza del 95% de las muestras tomadas para garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos y para garantizar los coeficientes de la ecuación característica es necesario identificarlas con un valor para poder realizar el análisis estadístico.

A partir de una muestra de 20 pruebas realizadas y como se nombró anteriormente las pruebas deberán caracterizar una ecuación lineal que relacione el voltaje de salida y la carga correspondiente, se espera un error en la desviación promedio de no más de 0.37, este error corresponde a un error en la medida de no as de 5 lb, de acuerdo a esto el número de pruebas estima como sigue:

$$n = \left(\frac{Z_{\frac{\alpha}{2}} * \sigma}{E} \right)^2$$

Donde:

n = Número de pruebas.

$Z_{\frac{\alpha}{2}}$ = Punto de corte en la campana de gauss para determinado intervalo de confianza.

σ = Desviación estándar de los datos de las pruebas.

E = Error esperado respecto del promedio de los datos.

De acuerdo a las tablas de distribución normal para un 95% de confiabilidad en el intervalo de confianza se tiene que $Z_{\frac{\alpha}{2}} = 1,96$. Para la tabla de distribución normal mostrada en la figura ## se tiene que para un 95%

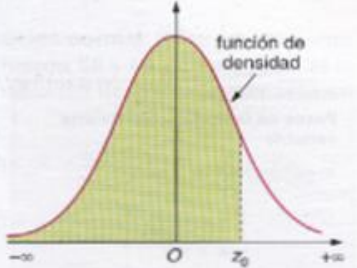
$$\frac{1 + 0,95}{2} = 0,975$$

Entrando a la tabla con 0,975 se tiene que el valor correspondiente a $Z_{\frac{\alpha}{2}} = 1,96$.

Tabla 13. Tabla de distribución normal.

TABLA DE LA DISTRIBUCIÓN NORMAL $N(0, 1)$

$P(Z \leq z_0) = \left\{ \begin{array}{l} \text{área del recinto} \\ \text{coloreado} \end{array} \right\}$



z_0	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	.5000	.5040	.5080	.5120	.5160	.5199	.5239	.5279	.5319	.5359
0.1	.5398	.5438	.5478	.5517	.5557	.5596	.5636	.5675	.5714	.5753
0.2	.5793	.5832	.5871	.5910	.5948	.5987	.6026	.6064	.6103	.6141
0.3	.6179	.6217	.6255	.6293	.6331	.6368	.6406	.6443	.6480	.6517
0.4	.6554	.6591	.6628	.6664	.6700	.6736	.6772	.6808	.6844	.6879
0.5	.6915	.6950	.6985	.7019	.7054	.7088	.7123	.7157	.7190	.7224
0.6	.7257	.7291	.7324	.7357	.7389	.7422	.7454	.7486	.7517	.7549
0.7	.7580	.7611	.7642	.7673	.7704	.7734	.7764	.7794	.7823	.7852
0.8	.7881	.7910	.7939	.7967	.7995	.8023	.8051	.8078	.8106	.8133
0.9	.8159	.8186	.8212	.8238	.8264	.8289	.8315	.8340	.8365	.8389
1.0	.8413	.8438	.8461	.8485	.8508	.8531	.8554	.8577	.8599	.8621
1.1	.8643	.8665	.8686	.8708	.8729	.8749	.8770	.8790	.8810	.8830
1.2	.8849	.8869	.8888	.8907	.8925	.8944	.8962	.8980	.8997	.9015
1.3	.9032	.9049	.9066	.9082	.9099	.9115	.9131	.9147	.9162	.9177
1.4	.9192	.9207	.9222	.9236	.9251	.9265	.9279	.9292	.9306	.9319
1.5	.9332	.9345	.9357	.9370	.9382	.9394	.9406	.9418	.9429	.9441
1.6	.9452	.9463	.9474	.9484	.9495	.9505	.9515	.9525	.9535	.9545
1.7	.9554	.9564	.9573	.9582	.9591	.9599	.9608	.9616	.9625	.9633
1.8	.9641	.9646	.9656	.9664	.9671	.9678	.9686	.9693	.9699	.9706
1.9	.9713	.9719	.9726	.9732	.9738	.9744	.9750	.9756	.9761	.9767

Fuente: http://www.ieszaframagon.com/matematicas/estadistica/var_aleatoria/tema_5_5.html

Al no tener un dato claro de la desviación estándar que presentará la celda esta se tomó a partir de una prueba en la que se realizaron 20 tomas de datos cargando la celda desde 0 hasta 10.000 lb y descargando de nuevo.

Las desviaciones estándar obtenidas de cada ecuación planteada a partir de cada prueba está mostradas en la tabla 13 Es de notar que aparecen dos desviaciones estándar debido a la optimización planteada en el numeral 9.1.1, una para cada ecuación.

Tabla 14. Desviación Estándar de 20 pruebas.

# de Ecuación	Desviación Estandar ecu GR4	Máxima diferencia [lb]	Desviación Estandar Ecu Lineal
1	9,133412552	38,36226848	7,40480542
2	2,825769424	8,02	7,00370936
3	2,839565608	8,34	6,64198609
4	3,279313352	11,52	6,27674169
5	1,490404587	4,36	7,66697194
6	2,356132688	5,42	5,71950866
7	1,312291117	2,82	4,49560626
8	3,153348919	8,9	5,09252788
9	4,71612528	16,23	4,04021934
10	0,858667629	2,5	5,98668263
11	1,70100368	3,85	4,12180989
12	3,002725607	10,50	4,61815406
13	0,522997201	1,37	4,04228301
14	0,440025468	1,27	6,32972479
15	1,319933325	2,79	5,63706131
16	0,734012545	2,15	4,53788862
17	1,525791618	3,86	5,32186406
18	2,417348432	1,63	7,35664959
19	0,70540569	1,4	6,86152387
Des. Estan.	1,180920341	Des. Estan.	1,21815396
Media	2,33338288	Media	5,74503781

Fuente: Autores.

Así para la primera parte de la curva, la ecuación de grado 4 presenta una desviación estándar de 1,181 mientras que para la ecuación lineal es de 1,218.

Con estos estimados el número de pruebas necesario para tener la seguridad que las ecuaciones estarán ajustadas a la medida real en un 95% de confiabilidad.

Para la ecuación de grado 4:

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} * \sigma}{E} \right)^2 = \left(\frac{1,96 * 1,181}{0,37} \right)^2 = 39,13 = 40 \text{ Pruebas}$$

Para la ecuación lineal:

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} * \sigma}{E} \right)^2 = \left(\frac{1,96 * 1,218}{0,37} \right)^2 = 46,04 = 46 \text{ Pruebas}$$

De este modo se realizaron 40 pruebas para cada una de las dos celdas de acero inoxidable AISI 420, con un puente de Wheastone completo de galgas de la serie N2K.

8.3 SELECCIÓN DE LAS ECUACIONES CARCATERIZADAS DE LA CELDA DE CARGA.

Al tener en cuenta las 40 pruebas sugeridas desde la sección 9.2 se debe ahora seleccionar el par de ecuaciones que se incluirán en el sistema de adquisición de datos propio de la celda. Para definir la mejor ecuación de las 40 obtenidas se procede a probar cada una de ellas comparando el resultado obtenido por cada ecuación y la lectura de la celda tipo S.

El criterio de selección está basado en la prueba y el error, esto se refiere a probar con cada una de las 40 ecuaciones los resultados que darían y compararlos con el valor real y desde ese punto seleccionar aquella que presente menos error. Para tal fin se organizó los datos leídos de la celda tipo S (carga [lb]) y la celda tipo

Para analizar el error producido en cada ecuación con respecto a la celda parton, (Tipo S), las ecuaciones se evaluaron a partir de datos como el promedio de los errores, la desviación estándar de los errores, y el error máximo producido.

En la figura ## se ve seleccionada la ecuación 16, ya que haciendo la comparación dicha esta tiene un promedio de errores de 10,92, una desviación estándar de 8,08 y un error máximo de 40,18. Esta ecuación presentó los valores más pequeños evaluados, corroborando así que era la ecuación que menos incurría en errores.

Las ecuaciones que corresponden a la prueba 16 son:

Ecuación 1er sección. Polinomio de grado 4:

$$y = 35097x^4 - 35745x^3 + 13296x^2 + 7480,9x - 14,858$$

Ecuación 2da sección. Ecuación Lineal:

$$y = 9618,2x - 144,69$$

De este modo la variable dependiente y corresponde a la carga en [lb] mientras la variable independiente x corresponde al voltaje en [mVolts].

Se debe resaltar que este par de ecuaciones es propio de cada celda, por tal razón para cada celda fabricada se debe realizar el mismo procedimiento de caracterización y selección de la mejor ecuación.

8.4 INTERVALO DE MEDICIÓN DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN PARA LA CELDA DE CARGA TIPO COLUMNA.

Teóricamente se tiene infinitos puntos de variación que las galgas podrían entregar, debido a esto el intervalo de medición que es capaz de dar la celda de carga se ve limitado a la capacidad de la instrumentación; así el módulo de National Instruments permite una resolución de 1,63mVolts/2¹⁸ (LSB).

De donde 1.63 mVots corresponde a la sensibilidad a full escala de la celda de carga, es decir para 10.000 lb y 2^{18} es el número de divisiones digitales del conversor analógico digital. Esto quiere decir que el módulo de National Instruments puede medir variaciones de voltaje de alrededor de:

$$\frac{1,63 \text{ mV}}{2^{18}} = 6.2179 \times 10^{-6} \text{ mV}$$

Este valor corresponde a la precisión de la celda de carga con respecto a la capacidad del conversor, para reconocerlo en términos de carga se puede usar cualquiera de las ecuaciones caracterizadas de la celda, se corroboró con las dos ecuaciones como sigue:

$$\Delta x = 6.2179 \times 10^{-6} \text{ mV}$$

Este valor representa la variación que el conversor es capaz de reconocer, de modo que se puede reemplazar en cualquier punto de la gráfica, se eligió un punto medio cualquiera de cada una, aproximadamente 0,356367 mV para la 1er sección y 0,823602 mV para la segunda. Entonces se evalúan dos puntos para encontrar la diferencia en libras y cada punto sería:

$$x_1 = 0,356367000$$

$$x_2 = x_1 + \Delta x = 0,356373237$$

Ecuación 1er sección:

$$y = 35097x^4 - 35745x^3 + 13296x^2 + 7480,9x - 14,858$$

Reemplazando:

$$y_1 = 3287,96616 \text{ lb}$$

$$y_2 = 3288,02662 \text{ lb}$$

$$\Delta y = y_1 - y_2 = 0,06045235 \text{ lb}$$

Ecuación lineal 2da sección:

$$y = 9618,2x - 144,69$$

$$y_1 = 7776,87876 \text{ lb}$$

$$y_2 = 7776,93875 \text{ lb}$$

$$\Delta y = y_1 - y_2 = 0,059989 \text{ lb}$$

Como se ve la variación mínima que el módulo de National Instruments es capaz de leer sería de 0,06 lb teórica. En el momento de la medición no se ven estas variaciones debido al ruido que existe en la lectura.

Buscando experimentalmente el intervalo de medición de la celda de carga se puede corroborar que esta es capaz de medir variaciones de 1 lb, colocando pesos calibrados hasta ver dicha variación, pero de nuevo por factores como el ruido la señal no se estabiliza haciéndola variar en un rango aproximadamente 4 lb.

La celda diseñada 10000 lb genera de forma segura 1500 MircoStrain a 15.000 lb, esto hace que la variación posible de medir de 4 lb genere 3750 intervalos de verificación.

De acuerdo a la norma OIML R60 Metrological regulation for load cells se tiene que para 3750 intervalos de verificación la celda de carga tipo columna diseñada es de clase C, tal como se ve en los rangos que especifica cada clase en la tabla 16.

Tabla 16. Clase de precisión según número de intervalos de verificación.

Table 1 Maximum number of load cell verification intervals (n_{max}) according to accuracy class

	Class A	Class B	Class C	Class D
Lower limit	50 000	5 000	500	100
Upper limit	Unlimited	100 000	10 000	1 000

Fuente: OIML R60 Metrological regulation for load cells

8.5 DATOS DE LA CELDA DE CARGA TIPO COLUMNA.

A continuación se enlistan los datos y parámetros técnicos de la celda de carga tipo columna diseñada y construida.

Capacidad:	10.000 lb
Tipo De Carga:	Compresión
Clase:	C
Máx. Intervalo de Verificación:	3750
PARÁMETROS TÉCNICOS	
Sensibilidad:	1,09 mV/V
Resistencia de Entrada:	
Resistencia de Salida:	
Resistencia Galga:	1000 Ω

9. CONCLUSIONES

- ✓ El pegado de las galgas es un proceso en cual se gana experticia con la experiencia, de modo que a medida que se fabricaban celdas se mejoraba la forma de pegado de las galgas, empezando por detalles como el de preparar la cantidad de pegante adecuado para no desperdiciar y usar el necesario.
- ✓ Uno de los procesos más delicados es el de preparar la superficie de la celda de carga para pegar las galgas, ya que si no se siguen de manera rigurosa los pasos recomendados por el fabricante de las galgas muy probablemente los resultados de las mediciones no sean los esperados o como sucedió una de las galgas en uno de los prototipos quedó mal ubicada y torcida, se tuvo que despegar para volver a pegarla. Cabe resaltar también detalles como la dirección en la que se debe lijar debe ser a 90° de la dirección que se va a usar para marcar con el lápiz, de lo contrario no quedará marca al aplicar el acondicionador.
- ✓ Se fabricaron 17 celdas de carga de las cuales 2 sufrieron daños que permitieron identificar problemas como el de la nivelación y el descentre respecto a la barra pulida; la celda que proporcionó dicha información falló por carga excéntrica, es decir toda la carga se concentró en aproximadamente la mitad del área destinada (por la excentricidad a la que estaba sometida) esto hizo que la celda se deformara permanentemente, el problema se observó cuando se realizaron pruebas de medición y los datos eran incoherentes. La segunda celda falló por sobrecarga debido a una falla que presentó una prensa ubicada en el edificio Alvaro Beltrán.

- ✓ Para el proceso de fabricación se diseñó un manguito que permitió mecanizar la celda en un solo paso, disminuyendo tiempos de mecanizado y aumentando la precisión de las medidas esperadas en la celda.
- ✓ El software surgió con la necesidad de hacer varios cálculos variando diferentes parámetros y que al final determinó una evidencia que servirá para las siguientes fases del proyecto en las que se podría necesitar de nuevo calcular una nueva celda de otro material por ejemplo.
- ✓ Dentro del desarrollo de la celda de carga se tuvo en cuenta la norma OIML R60 Metrological regulation for load cells, la cual se refiere a la regulación metrológica de las celdas de carga; la certificación de esta norma se debe completar en la segunda fase del proyecto, donde los alcances llegan a evaluar características como los límites de temperatura a los cuales puede trabajar la celda y la humedad que puede soportar la celda junto con la carcasa.
- ✓ Se realizará una prueba de contraste de la celda de carga tipo columna de 10.000 lb en un banco hidráulico de mayor precisión que se construirá en la segunda fase del proyecto Desarrollo de un prototipo de pozo inteligente para Campo Escuela Colorado – FASE 1 – 8586 – Financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión.
- ✓ La linealidad de puente de Wheastone montado fue adaptado con un par de ecuaciones planteadas para mejorar dicha linealidad, sin embargo en la segunda fase del proyecto se incluirá en el circuito unas resistencias de compensación para corregir dicho problema.
- ✓ Cada celda de carga tendrá su propia ecuación característica y debe obtenerse de la misma forma que se logró en capítulo 8.1; se espera que

en la segunda fase del proyecto se use una única ecuación que debe ser lineal y con el menor error posible.

- ✓ El banco de 10.000 lb está habilitado para que a partir del sistema hidráulico Enerpac se generen hasta 20.000 lb, pero está limitado por la capacidad de la celda tipo S montada en él ya que esta tiene una capacidad de 10.000 lb. No se debe sobrepasar las 10.000 lb registradas por la celda de carga tipo S.
- ✓ La celda de carga de compresión tipo columna debe siempre montarse junto con los anillos niveladores y centradores tanto superiores como inferiores, estos se encargan de distribuir la carga uniformemente en la celda para evitar fallas por concentración de esfuerzos.
- ✓ El acabado superficial de las celdas de carga, principalmente en el área donde se pegan las galgas, debe ser lo mejor posible, con el fin de evitar lijar lo menos posible y mantener el diámetro que se definió para determinadas condiciones.

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ TORRADO SOTO, Diego Alberto; DÍAZ, Fernando; y otros; Seminario de investigación: Estudio de las variables involucradas en los sistemas de bombeo Mecánico para el diseño, Control y la Optimización de Pozos de Campo Escuela Colorado. Abril 2011, 530 p, trabajo de grado (Ingeniero Mecánico) Universidad Industrial de Santander. Facultad Físico-mecánicas.
- ✓ SHIGLEY, Joseph Edward; Diseño en Ingeniería Mecánica. 1514 p. Octava Edición, McGraw Hill.
- ✓ NORTON, Robert L..Diseño de Máquinas. 1080 p Prentice Hall, México, 1999.
- ✓ PARADA CORRALES, Alfredo. Fatiga. Fisura progresiva. Primera Edición, Bucaramanga, Colombia, 1990.
- ✓ HIBBELER, R. C. Mecánica de Materiales. Tercera Edición, México, 1997.
- ✓ BEER, Ferdinand P; E RUSSELLI, Johnston; DEWOLF, John T. Mecánica de Materiales. Tercera Edición, Mc Graw Hill, México, 2004.
- ✓ MONTGOMERY, Douglas C. Probabilidad Y Estadística para Ingeniería y Administración. Tercera Edición, Compañía Editorial Continental, México, 1996.
- ✓ AK Steel Company. Aceros inoxidables para celda de carga internacionales. [Recuperado de internet el 15 de Febrero de 2013] Disponible en línea en http://www.aksteel.com/markets_products/stainless_precipitation.aspx
- ✓ Compañía General de Aceros. Proveedores de material e información de cada acero para celdas de carga. [Recuperado de internet 4 Diciembre de 2012]

Disponible

en

línea

http://www.cga.com.co/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=41&&Itemid=186

ANEXOS

Anexo A: Galgas Extensiométricas

GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

El control de los procesos industriales depende de la capacidad de medir con exactitud y rapidez el valor de las variables que intervienen en su funcionamiento. La mejor manera de realizarlo es teniendo mediciones precisas de cada una de estas variables, lo cual se logra mediante la utilización de sensores y transductores. Para el caso de mediciones mecánicas, es preferible convertir las señales mecánicas a eléctricas

Se denomina transductor eléctrico al dispositivo que transforma cualquier parámetro físico, químico o biológico en una magnitud eléctrica. Actualmente, existen transductores eléctricos para medir casi cualquier variable física, sin importar lo confusa que sea, nosotros en nuestro caso vamos a medir la tensión o presión a través de la extensiométrica.

A través de la extensiométrica se puede medir el esfuerzo que hay en un punto cualquiera de una pieza, que está sometida a una determinada carga. La medida no se efectúa de una forma directa, esto es, no se mide el esfuerzo directamente; lo que se mide es el alargamiento que sufre la pieza a la que se le aplica la carga. Si se conoce el alargamiento en un punto, se puede conocer entonces el esfuerzo que actúa en él, ya que ambas son directamente proporcionales y están relacionadas mediante el módulo elástico del material, según la ley de Hooke

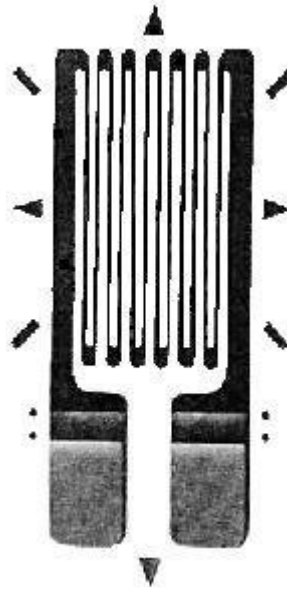
La técnica de extensiométrica es muy poderosa, ya que la medida que se obtiene es una información real de lo que está pasando en un objeto de estudio hecho de cualquier tipo de material (acero, aluminio, plástico, madera, materiales compuestos, etc.), en un momento determinado; además, de que se pueden hacer estudios tanto de fenómenos estáticos como dinámicos.

El sensor es una galga extensiométrica y el objeto de estudio en el cual se coloca, habitualmente es una pared, barra o viga de alguna estructura, considerando su material.

La galga extensiométrica es un transductor que varía su resistencia en función de la deformación que sufre la superficie sobre la cual está pegada. La galga está constituida por una base muy delgada de un material aislante, sobre la cual se adhiere un patrón metálico en forma de hilo muy fino. La resistencia eléctrica del hilo es directamente proporcional a su longitud, de tal manera que la resistencia aumenta cuando se alarga y disminuye cuando se comprime el hilo. Para realizar mediciones, este transductor se pega sobre la superficie del objeto bajo estudio (metal, madera, concreto, plástico, etc.), cuando el objeto se comprime o expande, la longitud del hilo metálico cambia en la misma proporción y con ello la resistencia de la galga. Este efecto se usa para hacer la medición de diferentes parámetros, como son: Vibración, torsión, flexión, compresión, tensión, pesos, etc.

Debido a su bajo costo, linealidad, amplio rango de temperatura y condiciones de operación, las galgas se emplean en los sectores industrial y comercial. En este capítulo se explicarán los principales parámetros de selección de las galgas, características de desempeño, materiales y pegamentos. El contenido del capítulo corresponde a las características de galgas de la firma *Vishay®*, debido a que es la empresa líder en el mercado, además de que proporciona toda la información técnica sobre sus productos.

Figura 136. Galga extensiométrica.



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

CARACTERÍSTICAS DE LAS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS.

Ancho y longitud de la galga.

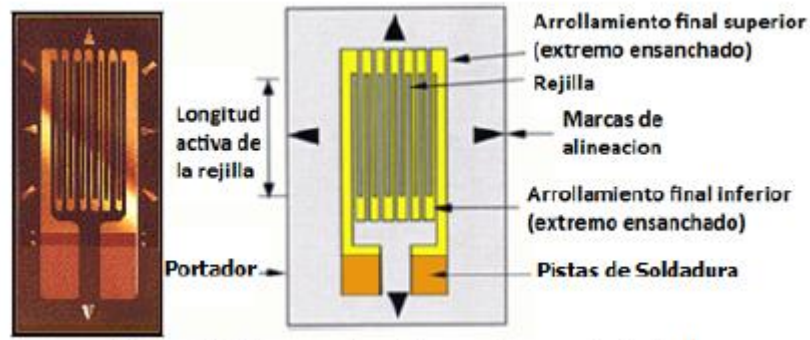
Estos dos parámetros hay que tenerlos en cuenta cuando se escoge el sensor para adherirlo al material, por tanto se debe seleccionar un tamaño de galga que esté conforme a la dimensión del material.

Resistencia de la galga.

La construcción típica de un medidor de deformación metálico figura 137, muestra un patrón de hoja metálica que se forma por el procedimiento de fotograbado de

una película que previamente ha sido montada en una base plástica de resina flexible.

Figura 137. Partes de una Galga extensiométrica.



Fuente: <http://www.omega.com/prodinfo/straingages.html>

Un medidor de deformación metálico tiene una resistencia sin deformar cuyos valores nominales son de 120Ω , 350Ω o 1000Ω , con tolerancias que oscila entre el 0.15% y el 0.8%, la deformación media por tensión del 2%, una deformación media por compresión de -1% y una temperatura máxima de operación de 150°C .

Factor de la galga.

Es una constante GF característica de cada galga, siendo el fabricante quien generalmente proporciona este factor, que se determina en función de la aleación empleada para su fabricación.

Material del elemento sensible de la galga.

Esta característica nos define el material del que está hecho el hilo conductor o el material semiconductor.

Tabla 17. Material del elemento sensible de la galga

Material	Características	Aplicaciones
Constantán	<ul style="list-style-type: none">• Medidas estáticas• Material más usado y muy barato• Autocompensación térmica	<ul style="list-style-type: none">• Grandes elongaciones (estado plástico de deformación)
Isoelastic	<ul style="list-style-type: none">• Gran relación S/N¹⁴• Precisan control de temperatura	<ul style="list-style-type: none">• Medidas dinámicas• Medidas de fatiga
Karma	<ul style="list-style-type: none">• Autocompensación térmica• La soldadura de terminales es compleja	<ul style="list-style-type: none">• Medidas a temperaturas bajas• Medidas con temperatura variable o no controlada
Aleación Pt	<ul style="list-style-type: none">• Coste alto	<ul style="list-style-type: none">• Medidas a altas temperaturas

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

Material de la matriz portadora.

Esta característica nos define el material del que está constituida la base no conductora de la galga.

Tabla 18. Material de la matriz portadora.

Material	Características	Aplicaciones
Poliamida	<ul style="list-style-type: none">• Es el soporte estándar• No soporta condiciones extremas de trabajo• Espesor habitual de 0.025mm	<ul style="list-style-type: none">• Mediciones estáticas• Aplicaciones habituales
Epoxi	<ul style="list-style-type: none">• Instalación delicada• Requiere mano de obra especializada	<ul style="list-style-type: none">• Medidas precisas
Fibra de vidrio reforzada con epoxi	<ul style="list-style-type: none">• Soporta temperaturas moderadas• Soporta muy bien el trabajo a fatiga	<ul style="list-style-type: none">• Medidas cíclicas y de fatiga

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

Fluencia.

La fluencia se caracteriza por la deformación continuada de materiales sometidos a cargas constantes. En el caso de una galga extensiométrica sometido a una carga constante ésta tiende, con el tiempo, a modificar su longitud en el sentido de “liberarse” del esfuerzo. Esto puede introducir un error en las medidas cuya magnitud depende básicamente de:

- Forma y tipo de rejilla de la galga (las galgas extensiométricas fabricadas mediante técnicas de circuito impreso presentan menos problemas, dado que las fuerzas se distribuyen en un área mayor y disminuyen los esfuerzos de cortadura en los extremos del elemento conductor de la galga).

- Material soporte del elemento conductor.
- Elemento adhesivo utilizado (tipo y espesor).
- Temperatura (las temperaturas altas favorecen a este efecto y las bajas lo disminuyen).
- Tiempo durante el cual se aplica la carga.

Este fenómeno, que puede resultar perjudicial para la medida de deformaciones, en algunos casos, como en el de las células de carga, puede contribuir a corregir problemas derivados de la fluencia en el elemento soporte de las galgas.

Deformación máxima.

El límite de deformación de las galgas (en cuanto al alargamiento se refiere) depende de las propiedades del elemento conductor, del elemento de soporte y del adhesivo utilizado, generalmente para galgas del mismo tipo la deformación máxima admisible es similar aunque sus longitudes sean diferentes.

La deformación límite viene indicada en forma porcentual y suele oscilar entre el 0.15% como valor más bajo y 5% como valor más alto, aunque también se fabrican galgas que alcanzan hasta el 20% y 25%.

Comportamiento a la fatiga.

Cuando una galga es sometida a repetidos ciclos de carga y descarga se va produciendo un deterioro progresivo en el elemento adhesivo, el respaldo o elemento portador, las conexiones y el elemento resistivo. Como resultado de esto, varía la resistencia sin carga y por ende en factor de la galga.

Las galgas extensiométricas son capaces de soportar entre unos 10⁵ y 10⁷ ciclos, y sobre todo se debe tener en cuenta que las galgas estándares deben trabajar siempre en su zona elástica.

A su vez el tamaño y la forma de las galgas influyen, teniendo mayor resistencia a la fatiga las galgas de mayor tamaño. Esta característica de las galgas debe de tenerse en cuenta, sobre todo cuando las galgas extensiométricas se utilizan en ensayos dinámicos con una frecuencia de carga y descarga elevada, por lo que se hace más aconsejable utilizar galgas elaboradas con técnicas de circuito impreso frente a las de hilo conductor para este tipo de ensayo.

Influencia de la temperatura.

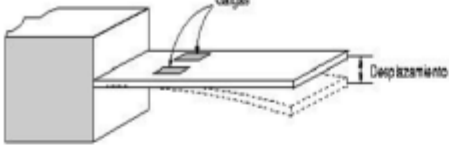
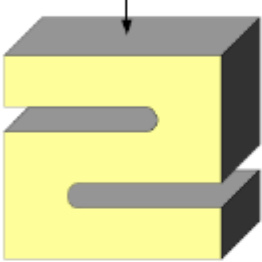
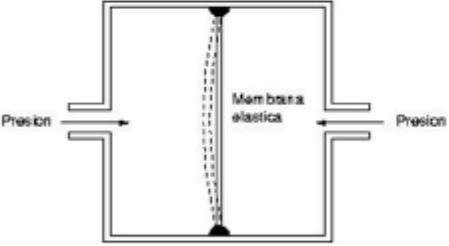
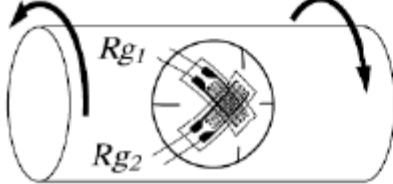
La temperatura puede afectar al funcionamiento de la galga, si esta varía durante una medida con galgas extensiométricas, la deformación real puede desviarse de la deformación medida.

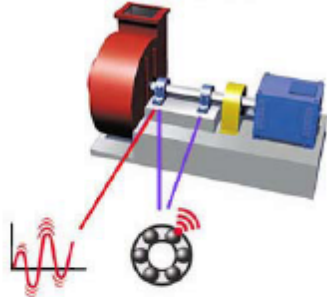
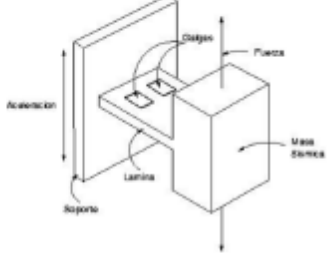
CAMPOS DE APLICACIÓN DE LAS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

El campo de acción de las galgas extensiométricas es muy extenso, aunque su mayor aplicación la encontramos en las industrias del diseño mecánico y estructural, en donde se es necesario el control riguroso de la deformación sufrida (como por ejemplo aviones, vagones de tren, puentes, grúas, columnas de hormigón armado, automóviles, edificios, entre otros).

También son muy utilizadas como sensores para monitoreo, y en sistemas de control, donde constituyen la parte activa de un transductor. Estos transductores sirven para:

Figura 138. Campos de aplicación de las galgas extensiométricas

ESQUEMA	TIPO DE MEDICIÓN
	<p>Medición de desplazamiento: colocando galgas en lugares adecuados se puede relacionar la deformación que sufre la misma con el desplazamiento de un punto específico del elemento.</p>
	<p>Medición de Fuera Axial y Peso: es uno de los transductores más utilizados en la industria, su funcionamiento se debe a que se puede relacionar la deformación que sufre la galga con la fuerza y/o el peso que causa dicha deformación.</p>
	<p>Medición de Presión: se puede medir presiones absolutas o manométricas, para lo cual este transductor consta de una cavidad en donde se encuentra colocada una membrana a la que están adheridas adecuadamente las galgas, si existiera una diferencia de presión entre ambos lados de la membrana elástica, esta se flexionara quedando una deformación en la galga que puede ser medida.</p>
	<p>Medición de torque: utilizando una galga de roseta se puede relacionar la deformación sufrida por el material con el torque que produce dicha deformación.</p>

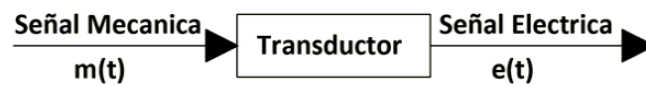
	<p>Medición de Vibraciones: cuando un elemento produce vibraciones (generalmente por desgaste mecánico), éstas se convierten en esfuerzos que también pueden ser medidos mediante galgas extensiométricas.</p>
	<p>Medición de Aceleración: la aceleración a la que está sometida el conjunto produce una fuerza sobre la masa sísmica que flexiona la lámina de unión entre soporte y masa.</p>

Fuente: Proyecto-Aplicación de galgas extensiométricas en el laboratorio de mecánica de materiales- Pablo Xavier Idrovo Urgiles, Luis Miguel Quintanilla Molina- UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, Ecuador.

Transductores

Son equipos que relacionan la señal mecánica (presión velocidad, posición) en señal eléctrica (tensión, corriente, impedancia), como se observa en la figura. Existen diferentes transductores para la medición de fenómenos físicos, entre ellos están los que trabajan con Galgas Extensiométricas.

Figura 139. Principio de funcionamiento transductor



Fuente: Autores

Celdas de carga

Las celdas de carga o transductores de fuerza son sensores de fuerza eléctricos cuya finalidad es relacionar la deformación que sufre la celda con una señal eléctrica. Estas se basan en Galgas Extensiométricas que colocadas en el transductor en diferentes arreglos relacionan la deformación sufrida por la celda con la carga que genera dicha deformación. Para mejorar la señal de medición de las celdas de carga, estas ocupan un arreglo de cuatro galgas extensiométricas o puente de Wheatstone completo en su interior.

En el mercado existen diferentes existe una gran variedad de celdas de carga, las cuales varían en forma, tamaño, material, entre otras cosas.

Anexo B. Fundamentación Teórica de Bombeo Mecánico y Dinagramas

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE BOMBEO MECÁNICO Y DINAGRAMAS

El bombeo mecánico es el método más usado en el mundo. Consiste una bomba de subsuelo de acción recíprocante. La energía es suministrada a la bomba por medio de un motor eléctrico o de combustión interna y esta es transmitida a la bomba mediante la sarta de varillas. Tiene su mayor aplicación mundial en la producción de crudos pesados y extra pesados, aunque también se utiliza en la producción de crudos medianos y livianos.

Tabla 19. Ventajas y desventajas del bombeo mecánico.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• El diseño es poco complejo.• Puede bombear flujos viscosos y a altas temperaturas.• Puede usar gas o electricidad como fuente de energía.• El sistema es eficiente, simple y fácil de operar.	<ul style="list-style-type: none">• Esta limitado a un profundidad de 16000ft.• El equipo de superficie es pesado y voluminoso.• Susceptible a bloqueo por excesivo gas en la bomba.

Fuente:http://industria-petrolera.blogspot.com/2008/01/mtodos-de-levantamientoartificial_12.html

Figura 140. El bombeo mecánico.



Fuente: www.bluebrain.ca

EL BOMBEO MECÁNICO Y SUS PARTES

El método de levantamiento artificial más común y antiguo del mundo es el bombeo mecánico. Debido a su simplicidad y robustez, es posible su aplicación en casi todos los tipos de pozos que requieren levantamiento. Sin embargo, existen límites físicos para la aplicación en cuanto a profundidad y caudales a levantar. El objetivo de un buen diseño en levantamiento artificial es lograr un sistema económicamente rentable, que logre el mayor Valor Presente Neto (VPN) considerando los costos asociados y la producción del pozo.

El yacimiento que ha de producir por bombeo mecánico tiene cierta presión, suficiente para que el petróleo alcance un cierto nivel en el pozo. Por tanto, el bombeo mecánico no es más que un procedimiento de succión y transferencia casi continúa del petróleo hasta la superficie. La función del sistema de bombeo mecánico por varillas es transmitir la potencia hasta la bomba de fondo para levantar los fluidos del yacimiento hasta la superficie. Los componentes del bombeo mecánico se pueden dividir básicamente en dos grupos:

- a) Equipo de superficie
- b) Equipo de sub-suelo.

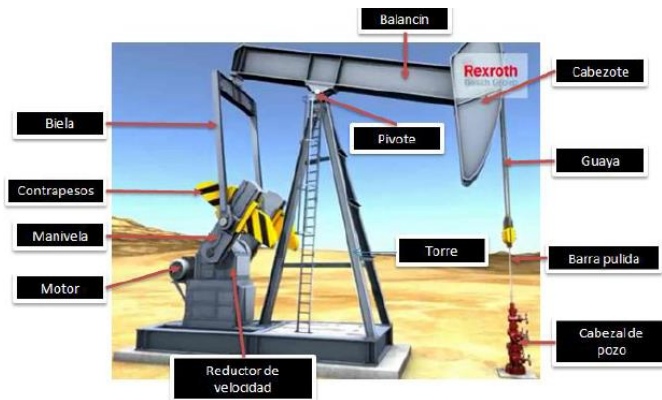
Equipo de superficie.

Su función es transmitir energía del motor a la sarta de varillas. Para hacer esto, el equipo debe cambiar el movimiento rotatorio del motor, a un movimiento reciprocante en las varillas. La velocidad del motor debe ser reducida a una velocidad de bombeo adecuada como se ve en la *figura 141b*.

La reducción de velocidad se logra en el reductor de engranajes, y al resto del equipo le concierne el cambio de movimiento rotatorio en reciprocante.

Figura 141. Equipo de superficie y cambio de movimiento.

a) Equipo de superficie.



b) Cambio de movimiento rotatorio a recíprocante.



Fuente: http://www.boschrexroth.com/country_units/europe/spain/es/index.jsp.

Unidad de bombeo.

La función de la unidad de bombeo es convertir el movimiento rotatorio del motor en movimiento ascendente y descendente de la sarta de varillas. Este movimiento es denominado recorrido. Los balancines son estructuras muy fuertes y que aguantan muy bien las duras condiciones de trabajo. Toda la estructura debe ser

colocada sobre una base de acero o concreto que asegure su estabilidad y alineamiento.

En el diseño apropiado de la unidad de bombeo, se debe tener en cuenta un tamaño apropiado de la caja reductora y de la estructura, también se debe tener una longitud de recorrido acorde con la producción de fluido que se desee.

Descripción de los componentes en la unidad de bombeo.

La Torre es el componente más fuerte ya que debe soportar las mayores cargas. Puede tener tres o cuatro patas. En el tope de la Torre está la Silla o pivote de la viga viajera (balancín). La viga debe soportar los esfuerzos de flexión que se generan en sus extremos por la carga del pozo y el empuje en los brazos. La viga es el punto de referencia para la alineación longitudinal de la unidad y la barra pulida. Si no hay una buena alineación longitudinal, la guaya (que es el elemento flexible que se encarga de mantener vertical la barra pulida, cuando el balancín realiza su movimiento), se puede ir rompiendo poco a poco con el roce de la pestaña del Cabezote y ocasionar un accidente y que el pozo se pare. Si la desalineación es muy severa, el prensa-estopas y la barra pulida se dañarán y ocasionarán derrames. La mejor forma de chequear la alineación longitudinal es colocándose a unos 20 metros detrás del balancín y observar si el centro de la viga está centralizado con la barra pulida. En el extremo de la viga del lado del pozo está el Cabezote que a través de la Guaya y Brida mueven la barra pulida. El Cabezote es curvado en su parte delantera para asegurar que solamente toque la barra pulida cuando está horizontal. Al igual que la viga, el Cabezote es la referencia para la alineación vertical de la unidad de bombeo. Esta alineación controla la distancia entre el balancín y el cabezal del pozo. Se debe poner especial atención a este punto porque si no hay una buena alineación vertical, el Cabezote puede inducir un doblamiento en la barra pulida.

Los brazos conectan la manivela con la viga mediante los pines que transforman el movimiento rotatorio de la manivela en oscilatorio en la viga. La manivela, a su vez, está conectada al eje de baja de la caja de engranajes la cual recibe, a través de un juego de correas y poleas (Engranaje y Motor) conectadas al eje de alta la energía suministrada por el motor. Al otro extremo del eje de alta se ha colocado el tambor del freno que se conecta a través de un cable flexible a la palanca situada generalmente cerca del motor.

En la manivela están las pesas o contrapesas las cuales van montadas sobre rieles para facilitar su desplazamiento para efectos del balanceo de la unidad. Las cajas de engranajes pueden ser de simple o doble reducción, siendo estas últimas las de mayor uso. La lubricación es por salpicadura y cuando la velocidad es menor de 5 SPM es recomendable instalar un set de lubricación forzada. El balancín es un mecanismo que requiere poco mantenimiento para el trabajo que realiza y como todo aparato de grandes dimensiones, hay que moverse alrededor de él con mucho cuidado y no confiar en los frenos ni en el *switch* (interruptor) del panel.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE DINAGRAMAS

El uso de levantamiento artificial se alude al incremento del flujo de líquidos, tales como el petróleo o agua, de un pozo de producción. Esto se logra mediante el uso de dispositivos mecánicos dentro del pozo (tal dispositivo es la bomba de subsuelo) o mediante el decremento de la columna hidrostática del líquido que se lleva a cabo cuando se inyecta gas a una profundidad definida del pozo. El levantamiento artificial es de vital importancia en pozos cuando la presión en la reserva es insuficiente para conducir los fluidos a la superficie, pero son usados frecuentemente en pozos donde el flujo se da naturalmente para incrementar la tasa de flujo por encima del flujo natural. El fluido producido puede ser petróleo,

agua o una mezcla de petróleo y agua, frecuentemente mezclado con un poco de gas. **DINAGRAMAS** El dinagrama es una herramienta imprescindible cuando existe bombeo mecánico como levantamiento superficial. Su función consiste en registrar ininterrumpidamente las cargas y las deformaciones que tolera el vástago pulido, mostrando dos variables, que son Carga vs. Posición, que se obtienen sabiendo la carrera perteneciente del vástago balancín y se registra en lo que se conoce como una carta dinamométrica, que posteriormente debe ser estudiada para identificar los inconvenientes que pueden existir en el fondo del pozo y así plantear soluciones pertinentes dependiendo del tipo de falla.

Hoy en día se podría decir que el método de levantamiento artificial más utilizado es el bombeo mecánico y por tal razón es importante el estudio del dinagrama, pues es un elemento del cual se puede inferir el desempeño de un sistema de bombeo mecánico y que genera una gráfica en la que se puede visualizar la carga de la varilla lisa en función de la posición. Asimismo, tal grafica se puede interpretar como el trabajo hecho en superficie por la unidad de bombeo mecánico por “stroke”.

Dinagrama de superficie

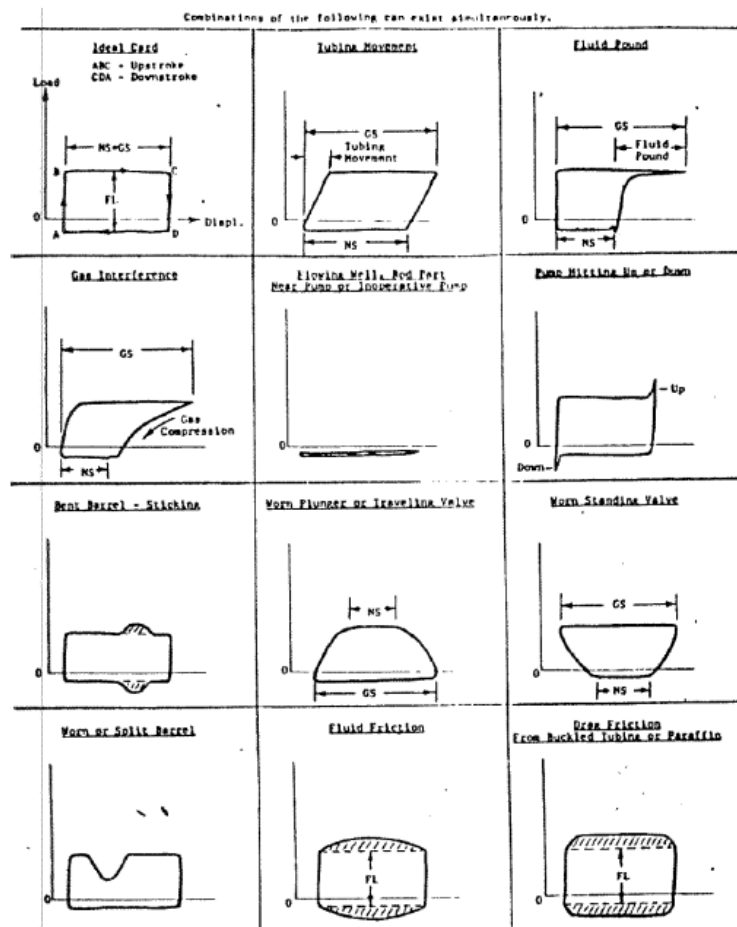
El dinagrama de superficie es la obtención de cargas que se presenta en la barra pulida para precisar en superficie el desempeño de la bomba por cada ciclo de bombeo.

Dinagrama de Fondo

El dinagrama de fondo es la representación gráfica de Carga vs. Posición de la primera varilla por encima de la bomba y se obtiene por medio de la ecuación de onda que se aplica al dinagrama de superficie. Una vez aplicada la ecuación de onda de manera correcta al dinagrama de superficie, se elabora la carta dinamométrica de fondo de la bomba y se definen la carga sobre los tramos de la varilla. **ANÁLISIS DE DINAGRAMAS** Para el análisis de los dinagramas de fondo

se conocen unas cartas de fallas que permiten reconocer las diversas fallas presentes en el pozo. A continuación se muestran algunas de estas cartas.

Figura 142. Patrones de las cartas dinamoétricas de fondo según Gibbs & Nolen



Fuente: ALMEIDA, Manuel. Geração de carta dinamoétrica de fundo para diagnóstico do bombeo mecânico em poços de petróleo.

Anexo C. Diseño Estático y Dinámico

DISEÑO ESTÁTICO Y DINÁMICO

Tanto el diseño como el análisis de una estructura dada involucran la determinación de esfuerzos y deformaciones en la situación estática, mientras que en para el diseño dinámico se tienen en cuenta factores que involucran desde la geometría de la celda de carga hasta el tiempo que se espere la celda de carga trabaje antes de fallar.

DISEÑO ESTÁTICO

Esfuerzos en un elemento

La fuerza por unidad de área, o la intensidad de las fuerzas distribuidas a través de una sección dada se llama esfuerzo sobre esa acción y se representa con la letra griega σ (sigma). El esfuerzo en un elemento con área transversal A sometido a una carga P se obtiene como sigue:

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

Ley de Hooke

En física, la ley de elasticidad de Hooke o ley de Hooke, originalmente formulada para casos del estiramiento longitudinal, establece que el alargamiento unitario que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada P :

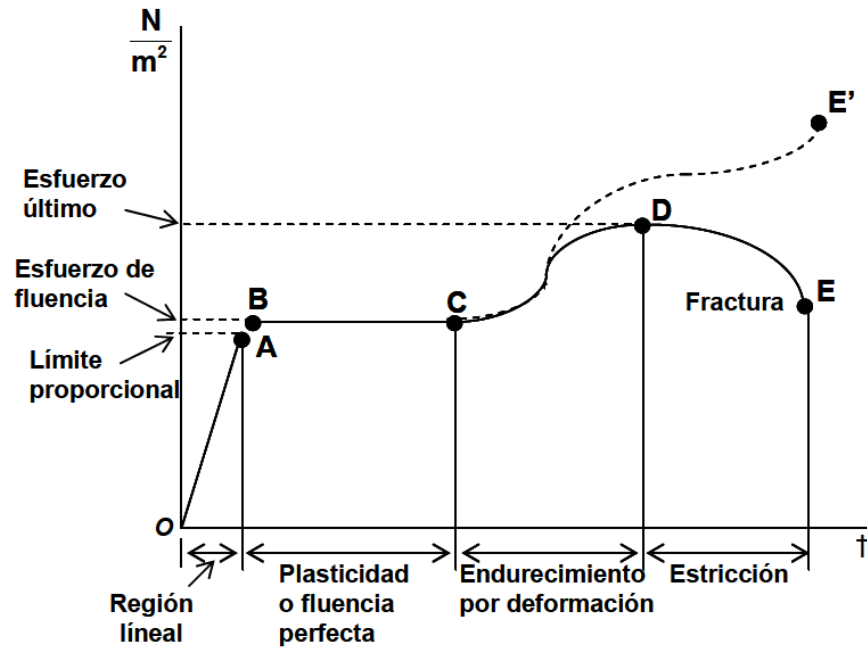
$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{P}{AE} = \frac{\sigma}{E}$$

Siendo δ el alargamiento, L la longitud original, E módulo de Young, A la sección transversal de la pieza estirada. La ley se aplica a materiales elásticos hasta un límite denominado límite elástico.

Esta ley recibe su nombre de Robert Hooke, físico británico contemporáneo de Isaac Newton. Ante el temor de que alguien se apoderara de su descubrimiento, Hooke lo publicó en forma de un famoso anagrama, revelando su contenido un par de años más tarde. El anagrama significa *Ut tensio sic vis* ("como la extensión, así la fuerza").

La siguiente figura muestra una gráfica de esfuerzo contra deformación unitaria producida en un acero con una sección transversal determinada y aplicando determinada carga; la región lineal mostrada corresponde a la zona elástica de cualquier acero, esta está determinada por las propiedades de cada material; en dicha zona el material tiene la particularidad de comportarse de manera "*elástica*", es decir, el material podrá deformarse hasta el momento que se retire la carga, entonces este regresará a sus dimensiones iniciales. La siguiente fase representa la zona de fluencia o deformación plástica donde el material cambia sus dimensiones debido a cambios termodinámicos irreversibles.

Figura 143. Gráfica de esfuerzo- deformación



Fuente: Autores.

Todo el diseño estático de la celda de carga debe ser realizado en la zona elástica del material además de estar soportado por un factor de seguridad que defina el límite de carga posible de aplicar sin llegar a la deformación plástica.

COEFICIENTE DE POISSON

El **coeficiente de Poisson** (denotado mediante la letra griega ν) es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento. El nombre de dicho coeficiente se le dio en honor al físico francés Simeon Poisson.

Materiales Isotrópicos

Si se toma un prisma mecánico fabricado en el material cuyo coeficiente de Poisson pretendemos medir y se somete este prisma a una fuerza de tracción aplicada sobre sus bases superior e inferior, el coeficiente de Poisson se puede medir como: la razón entre el alargamiento longitudinal producido dividido por el acortamiento de una longitud situada en un plano perpendicular a la dirección de la carga aplicada. Este valor coincide igualmente con el cociente de deformaciones, de hecho la fórmula usual para el Coeficiente de Poisson es:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}}$$

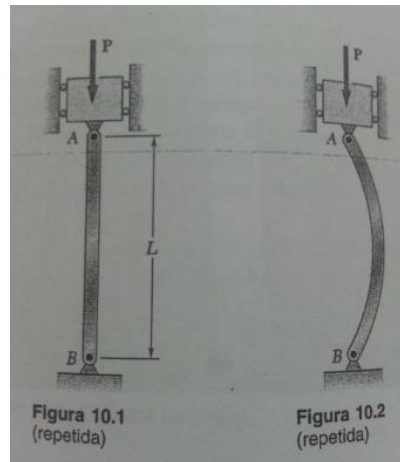
Donde ε es la deformación.

Para un material isótropo elástico perfectamente incompresible, este es igual a 0,5. La mayor parte de los materiales prácticos en la ingeniería rondan entre 0,0 y 0,5, aunque existen algunos materiales compuestos llamados materiales auxéticos que tienen coeficiente de Poisson negativo. Termodinámicamente puede probarse que todo material tiene coeficientes de Poisson en el intervalo [-1, 0,5]. Para los aceros es normalmente esta valor aproximadamente de 0,3.

COLUMNAS

El caso de la celda de carga está representado en la figura 144 de modo que para este caso el valor crítico de la carga P para la cual la posición de la figura 144 deja de ser estable. Entonces $P > P_{cr}$ la menor falta de alineación o perturbación provocará que la columna se doble como en la figura 144.

Figura 144. Efecto pandeo



Fuente: Mecánica de materiales, Beer

De este modo la carga crítica para este caso corresponde a:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * EI}{L^2}$$

Donde E es el módulo de elasticidad del material, I la inercia de la columna con respecto a su eje y L la longitud de la misma.

Esta es la fórmula de Euler, llamada así en honor del matemático suizo Leonhard Euler.

Así el esfuerzo crítico que la columna es capaz de soportar es:

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EAr^2}{AL^2}$$

Donde r es el radio de giro, E el módulo de elasticidad, A el área de la sección transversal, L la longitud de la columna.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2}$$

La cantidad L/r es la relación de esbeltez de la columna. Es de anotar que si el valor de σ_{cr} es mayor que el límite de fluencia entonces este valor no es de importancia pues la columna fluirá a compresión y dejará de ser elástica antes de curvarse.

Todos y cada uno de los factores analizados anteriormente son necesarios para determinar con seguridad el tipo de material y las dimensiones de la celda de carga.

DISEÑO DINÁMICO

Las fallas por fatiga siempre empiezan por una grieta. La grieta pudiera haber estado presente en el material desde su manufactura o haber se presentado a lo largo del tiempo, por causa de deformaciones cíclicas cerca de las concentraciones de esfuerzos.

Dentro de las consideraciones de diseño la elección de modelos de falla por fatiga para fines de diseño de máquinas depende del tipo de maquinaria que se está diseñando y cuál es su uso pretendido. La vida requerida para muchas máquinas entra dentro del rango de alto ciclaje (HCF).

Modelo esfuerzo-vida

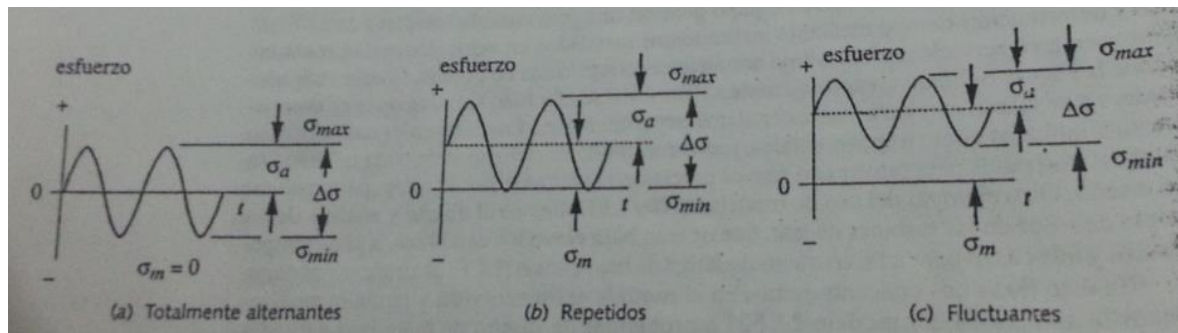
El más usado es el esfuerzo-vida, usado para alto ciclaje donde se espera que deba durar 10^3 ciclos de esfuerzos. El modelo basado en el esfuerzo busca definir una resistencia a la fatiga de modo que los esfuerzos cíclicos se puedan

mantener por debajo de este nivel y evitar que falle durante el numero de ciclos requerido.

Cargas por Fatiga.

Las cargas que se pueden experimentar en maquinaria son mostradas en manera esquemática en como ondas senoidales. EL caso totalmente alternante en a donde el valor medio es 0. El caso b del esfuerzo repetido donde la onda va desde 0 a un máximo con un valor medio igual al componente alterno y el caso más general, en que todos los valores delos componentes son diferentes de 0.

Figura 145. Cargas por fatiga.



Fuente: Diseño de máquinas Robert L. Norton

Entonces cualquiera de estas formas de onda se puede caracterizar mediante dos parámetros, sus componentes medio y alternante, sus valores máximo y mínimo o la relación entre estos.

El rango de esfuerzo se define de la forma:

$$\Delta\sigma = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}$$

El componente alternante se determina a partir de:

$$\sigma_{ait} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

El componente medio es:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

Se pueden formar dos relaciones, R la relación de esfuerzos y A la relación de amplitud.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \qquad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

Límite de Resistencia a la Fatiga:

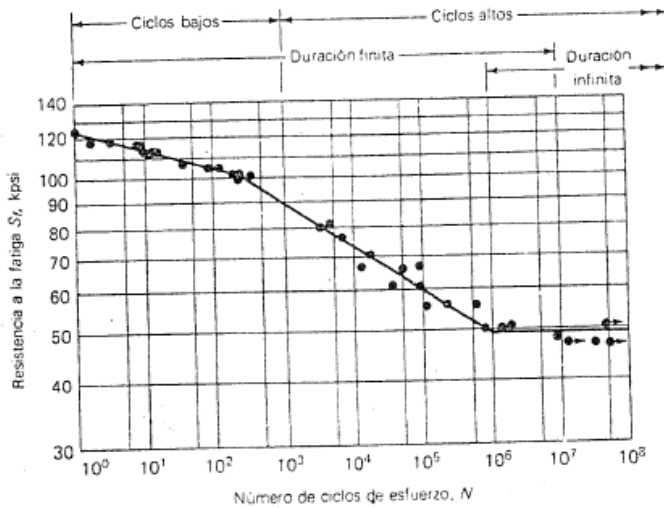
De acuerdo a pruebas experimentales 10^7 ciclos corresponden al punto de inflexión donde se puede obtener de un análisis de fatiga, vida infinita para el elemento diseñado. En este punto existe un codo el cual denominado límite de resistencia a la fatiga es posible alternar por debajo de él con vida infinita sin falla, ver figura siguiente.

Más allá del codo, en el límite inferior de la banda de dispersión, el límite aproximado de resistencia a la fatiga se puede definir de la forma:

$$\text{Para aceros: } S_{e'} = 0.5S_{ut} \quad S_{ut} < 200 \text{ ksi} \text{ ó } S_{e'} = 100 \text{ ksi} \quad S_{ut} \geq 200 \text{ ksi}$$

No todos los materiales muestran este codo, materiales como el aluminio muestran curvas S-N que al incrementar N siguen reduciéndose de modo que el término resistencia a la fatiga se debe plantear para los materiales que si lo tengan.

Figura 146. Digrama S-N



Fuente: Diseño de máquinas Robert L. Norton

El caso de la celda de carga corresponde a tener un esfuerzo medio y un esfuerzo alternante combinados, esto porque la celda de carga siempre tendrá una carga aplicada que provocará la compresión en ella.

Estimación de S_e e límite de resistencia a la fatiga.

Para la tener la mejor información sobre la resistencia a la fatiga de un material a vida infinita proviene de la experimentación pero como es muy difícil tener e suficiente número de prototipos, el tiempo necesario, las condiciones necesarias; existe la forma externa en la cual se estima dicho valor a partir de unas condiciones en el cual se evalúan unos factores de corrección para tener en cuenta efectos que vean afectados.

$$S_e = C_{carga} C_{tamaño} C_{superficies} C_{temperatura} C_{confiabilidad} S_e'$$

El Factor de carga determinado de un texto del ingeniero mecánico Alfredo Parada Corrales, Fatiga fisura progresiva, determina específicamente para el caso de la celda de carga donde los esfuerzos presentes son alternantes y medios pero el esfuerzo medio es negativo debido a la naturaleza de la compresión. De este modo el factor de carga es:

$$C_{carga} = 1.2$$

Para cargas simples o combinadas que produzcan esfuerzos repetitivos donde el esfuerzo medio es >0.5 veces el esfuerzo alterno.

El factor tamaño recomendado por Shigley y Mitchell es:

$$\text{Para } d \leq 0.3 \text{ in (8mm)} \quad C_{tamaño} = 1$$

$$\text{Para } 0.3 \text{ in} \leq d \leq 10 \text{ in} \quad C_{tamaño} = 0.869d^{-0.097}$$

$$\text{Para } 8 \text{ mm} \leq d \leq 250 \text{ mm} \quad C_{tamaño} = 1.189d^{-0.097}$$

Para tamaños mayores $C_{carga}=0,86$

El factor superficial influye en la manufactura de la celda de carga por eso:

Figura 147. Factores de acabado superficial.

Acabado superficial	MPa		kpsi	
	A	b	A	b
Rectificado	1.58	-0.085	1.34	-0.085
Maquinado o estirado en frío	4.51	-0.265	2.7	-0.265
Rolado en caliente	57.7	-0.718	14.4	-0.718
Forjado	272	-0.995	39.9	-0.995

Fuente: Diseño de máquinas Robert L. Norton

Para el factor de temperatura se tienen rangos de temperaturas para los cuales aplica el diseño de la celda de carga:

$$\text{Para } T \leq 450^{\circ}\text{C} \quad C_{temp} = 1$$

$$\text{Para } 450^{\circ}\text{C} \leq T \leq 550^{\circ}\text{C} \quad C_{temp} = 1 - 0.0058(T - 450)$$

$$\text{Para } 840^{\circ}\text{F} \leq T \leq 1020^{\circ} \quad C_{temp} = 1 - 0.0032(T - 840)$$

El actor confiabilidad depende en gran parte de los datos registrados ya que son medios. Entre estos valores hay una considerable dispersión de acuerdo al número de pruebas, el material, las mismas condiciones de prueba, etc donde en la siguiente tabla se muestra a confiabilidad en factores

Tabla 20. Factores de confiabilidad.

Confiabilidad %	C_confia
50	1
90	0.897
99	0.814
99.9	0.814
99.99	0.702
99.999	0.659

Fuente: Autores

Diagrama S-N estimado

La figura 148 muestra un diagrama S-N para un acero el cual presenta un codo en 10^6 ciclos, es decir está garantizada la vida infinita de la celda de carga. Los datos de las pruebas indican que razonablemente:

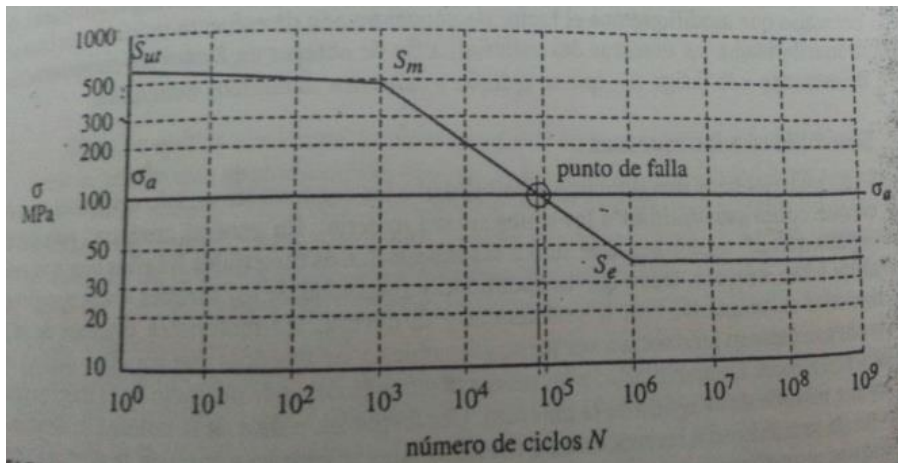
$$S_m = 0.75S_{ut}$$

Donde S_{ut} es el esfuerzo último a tracción. Cabe resaltar que esta ecuación aplica para carga axial.

Una línea recta entre S_m y S_e determinan un perímetro en el rango de las 10^3 a 10^6 ciclos, 10^3 es el punto donde se sitúa S_m mientras que S_e corresponde a 10^6 ciclos. En 10^0 se encontrará S_{ut} y se debe cerrar el dibujo mediante la unido de S_{ut} y afectado S_{ut} . Y de acuerdo a pruebas experimentales un acero como el

AISI 420 tiene un codo en 10^6 ciclos, por eso la gráfica termina con una línea casi que horizontal para cerrar la etapa de 10^6 ciclos y así todo estará dentro los límites de vida infinita.

Figura 148. Diagrama Esfuerzo- Número de ciclos



Fuente: Diseño de Máquinas. Robert L Norton

La ecuación que gobierna la línea entre S_m y S_e es $S = aN^b$.

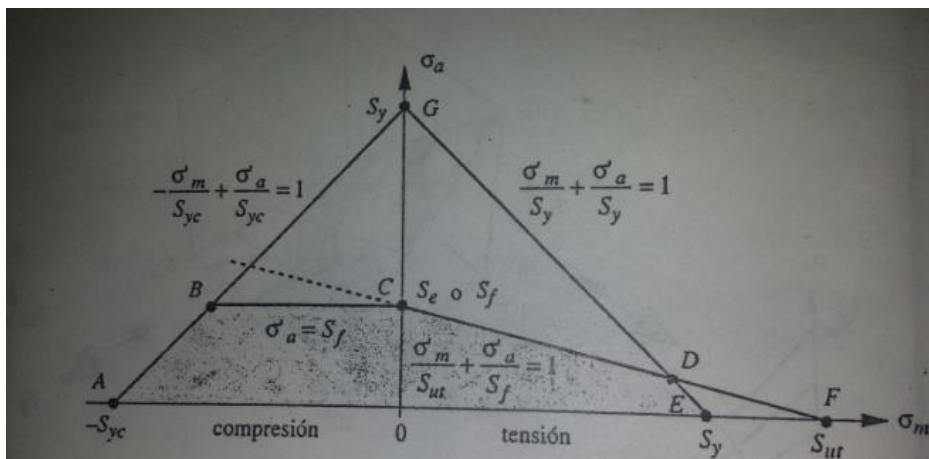
De este modo cualquier combinación de ciclos con esfuerzos delimitada por la línea que se acaba de dibujar mantendrá en vida infinita a la celda de 10^6 en adelante.

Diagrama de Goodman modificado:

Este diagrama compuesto por el eje y con el esfuerzo alternante y el otro eje con el esfuerzo medio.

En la figura siguiente se incluyen la línea de fluencia que conecta S_y con ambos ejes para servir de límite al primer ciclo de esfuerzo, es decir, si la pieza cede en este primer esfuerzo es que ha fallado independiente de su seguridad a la fatiga. En la zona de compresión (A la izquierda) se define con la línea AB. Además se presenta la región de esfuerzos a compresión. Se observan varios puntos de falla. En el eje de esfuerzo medio se definen los puntos A, E y F donde se define el límite elástico S_y la resistencia máxima a tensión S_{ut} del material en particular. Sobre el eje del esfuerzo alterno se encuentra el límite de resistencia a la fatiga S_e en el punto c, y en punto G se encuentra el límite de fluencia S_y .

Figura 149. Diagrama de Goodman modificado



Fuente: Diseño de Máquinas. Robert L Norton

Ahora para definir las áreas de y líneas de falla se puede extender la línea AF hasta la zona de compresión como se ve punteada en la imagen de acuerdo a datos empíricos, sin embargo la línea BC es más conservadora. Así de hecho se ignoran los efectos benéficos del esfuerzo medio a compresión.

Las expresiones para cada línea son:

La línea AG define la fluencia a compresión:

$$-\frac{\sigma_m}{S_{yc}} + \frac{\sigma_a}{S_{yc}} = 1$$

La línea BC define la falla por fatiga con esfuerzos medios a compresión:

$$\sigma_a = S_f$$

La línea CF define la falla por fatiga con esfuerzo medio a tensión:

$$\frac{\sigma_m}{S_{ut}} + \frac{\sigma_a}{S_f} = 1$$

La línea GE define la fluencia a tensión:

$$\frac{\sigma_m}{S_y} + \frac{\sigma_a}{S_y} = 1$$

Concentradores de Esfuerzos Dinámicos

En la sección de diseño estático se trató el factor de concentración de esfuerzos como K_t , en combinación con el factor de concentración geométrico de esfuerzos, pero en el diseño dinámico el factor de concentración de esfuerzos debe adaptarse a la necesidad de incluir un alto ciclaje en la cantidad de veces que sería aplicado dicho esfuerzo, es decir se necesita un factor de concentración de esfuerzo a la fatiga K_f . El tratamiento sería algo diferente y más riguroso si el material en cuestión fuese frágil, pero para materiales dúctiles se tienen ciertas condiciones para asimilar el factor de concentración de esfuerzos a la fatiga de modo que se relacione directamente con el esfuerzo máximo como sigue:

Si σ_{max} es menor de S_y , no habrá fluencia se utilizará el valor total de K_f como valor σ_m

Si $K_f [\sigma_{max}] < S_y$ entonces $K_{fm} = K_f$

Si $K_f [\sigma_{max}] > S_y$ entonces $K_{fm} = \frac{S_y - K_f \sigma_a}{\sigma_m}$

Si $K_f [\sigma_{max} - \sigma_{min}] < S_y$ entonces $K_{fm} = 0$

Factor de Seguridad

El factor de seguridad para cualquier estado de esfuerzo alternante depende de la forma en la cual puede variar los componentes medio y alterno uno respecto al otro durante el servicio. Cuatro casos se presentan a continuación:

1. El esfuerzo alternante se mantendrá esencialmente constante durante la vida de la pieza, pero el esfuerzo medio puede aumentar bajo condiciones de servicio.
2. El esfuerzo medio se mantendrá esencialmente constante durante la vida de la pieza, pero el esfuerzo alternante puede aumentar bajo condiciones de servicio.
3. Tanto los componentes como el esfuerzo medio pueden aumentar bajo condiciones de servicio, pero su relación se mantendrá constante.
4. Tanto los componentes alternantes como el esfuerzo medio pueden incrementarse bajo condiciones de servicio, pero no hay una relación conocida entre sus incrementos.

Es obvio que para cada uno de los casos el factor de seguridad se calculará de manera distinta pero al diseñar la celda de carga variando materiales, variando dimensiones, y aunque las cargas siempre sean las mismas se debe generar un cálculo general para cualquiera de dichas posibilidades, realmente acercándose a

la 4 opción. Así desarrollado dentro de Locell Soft dicha solución se puede consultar allí, esto debido a que fue un arreglo geométrico el que determina el factor de seguridad.

Este valor se obtiene del diagrama de Goodman modificado mostrado en la figura 149 de forma gráfica, donde Locell Soft fue programado para calcular la distancia más cercana al punto correspondiente al esfuerzo alternante y al esfuerzo medio, bien sea con respecto a la línea BC o la línea AB, es decir con respecto a la falla por fluencia en compresión o al límite de resistencia de fatiga por compresión.

Anexo D. Tablas de Selección de Strain Gages

TABLAS DE SELECCIÓN DE STRAIN GAGES

Gage Series

MEME Micro-Measurements



Transducer Class® Strain Gages

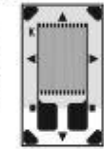
N2A SERIES

N2A gages are open-faced constantan-alloy patterns constructed on a thin, laminated, polyimide-film backing. This series is capable of low and repeatable creep performance. Construction is very rugged, which will help prevent gage handling damage.



J2A SERIES

J2A gages are encapsulated constantan-alloy patterns. Both the encapsulation and backing are thin, laminated polyimide film. Gage soldering tabs are exposed for simplified lead connections. Creep performance is equal to the N2A Series, although the presence of an encapsulating layer will require a change in creep code selection to maintain the same performance.



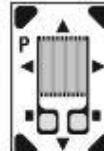
EA SERIES

EA gages are open-faced constantan-alloy patterns with a flexible cast-polyimide backing. Creep scatter is somewhat more pronounced than with all other series. Consequently, EA gages are normally available with only one creep code per pattern.



N2K SERIES

N2K gages are open-faced modified-Karma-alloy patterns constructed on a thin, laminated, polyimide-film backing. More rugged and flexible than the TK or SK Series, N2K gages are popular for transducer applications where lower cost K-alloy gages are desired. All N2K gages are supplied with copper soldering pads (DP) for ease of leadwire attachment. Most gages in the N2K Series can also be modulus compensated.



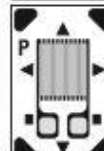
N3K SERIES

N3K gages are special, open-faced, modified-Karma-alloy patterns constructed on an ultrathin, laminated polyimide-film backing. Their small size and high resistance (5000 Ω) makes them ideally suited for 4 to 20mA process control transmitters and battery-operated systems. All N3K gages are supplied with a copper soldering pad (DP) on each gage tab.



TK SERIES

TK gages are open-faced modified-Karma-alloy patterns with a thin, reinforced, laminate backing. These gages have a higher operating temperature range and greater fatigue life than N2A, J2A, EA, N2K, or N3K gages. However, they are generally more costly. Most gages in the TK Series can also be modulus compensated. All TK gages are supplied with a copper soldering pad (DP) on each gage tab.



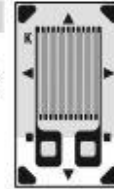
SK SERIES

SK gages are fully encapsulated, modified-Karma-alloy patterns with a preformed solder dot on each gage tab. Both backing and encapsulation are thin, reinforced, laminated material. Due to the relatively stiff backing and encapsulation, SK-Series gages are less flexible than all other series and care must be exercised in handling and bonding. Some SK patterns can be supplied with modulus compensation (EMC) options.



J5K SERIES

J5K gages are encapsulated, modified-Karma-alloy patterns specially constructed to improve gage performance at elevated temperatures. Because of the laminated polyimide-film backing and encapsulation, all J5K patterns are fully flexible without being brittle. Copper soldering pads (DP) are exposed for simplified lead connections. Some J5K gages can be supplied with modulus-compensation (EMC) options. For best high-temperature performance, J5K-Series gages should be installed with M-Bond 450 high-temperature adhesive.



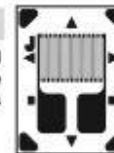
J5E SERIES

J5E gages are a family of platinum-tungsten-alloy patterns constructed with a thin, flexible polyimide backing. Sensing grids are fully encapsulated by a polyimide film overlay and include a preformed solder dot on each gage tab. With a gage factor more than double that of conventional strain gages, platinum-tungsten-alloy patterns provide standard transducer output levels at less than half the normal spring-element stress values. This allows for higher overload safety, increased fatigue life, and improved linearity in many transducer designs. A negative gage-factor-versus-temperature slope also provides modulus compensation in many types of steel transducer spring elements. A relatively high thermal output of platinum-tungsten alloy makes precision static measurements difficult.



RE SERIES

RE gages are platinum-tungsten alloy patterns constructed with a thin, flexible, glass-fiber-reinforced polyimide film backing. Option E2 grid encapsulation is recommended for RE series gages. Solder tabs are fully exposed. Platinum-tungsten alloy is quite easy to solder using conventional rosin type fluxes. RE Series gages have the same beneficial high gage factor of J5E Series, and are useful in the same applications.



GAGE SERIES	TEMPERATURE RANGE		GAGE FACTOR (SEE NOTE)	FATIGUE LIFE	
	STATIC	DYNAMIC		STRAIN LEVEL IN $\mu\epsilon$	NUMBER OF CYCLES
N2A	-100° to +200°F [-75° to +95°C]	Same as Static	2.05 nom.	± 1500 1500	10^7 10^8 (2)
J2A	-100° to +200°F [-75° to +95°C]	Same as Static	2.05 nom.	± 1700 1700	10^6 10^7 (2)
EA	-100° to +200°F [-75° to +95°C]	[-320° to +350°F [-195° to +175°C]	2.05 nom.	± 1500 1500	10^6 10^7 (2)
N2K	-100° to +200°F [-75° to +95°C]	Same as Static	2.1 nom. (1)	± 1800	10^7
N3K	-100° to +200°F [-75° to +95°C]	Same as Static	2.1 nom. (1)	± 1800	10^7
TK	-100° to +300°F [-75° to +150°C]	-320° to +400°F [-195° to +205°C]	2.1 nom. (1)	± 2000 2000	10^7 10^8 (2)
SK	-100° to +350°F [-75° to +175°C]	-320° to +450°F [-195° to +230°C]	2.1 nom. (1)	± 2000 2000	10^7 10^8 (2)
J5K	-100° to +400°F [-75° to +205°C]	-320° to +500°F [-195° to +260°C]	2.1 nom. (1)	± 2000 1800	10^7 10^8 (2)
J5E	-100° to +400°F [-75° to +205°C]	Same as Static	4.5 nom.	± 1500	10^6
RE	-100° to +400°F [-75° to +205°C]	Same as Static	4.5 nom.	± 1500	10^6

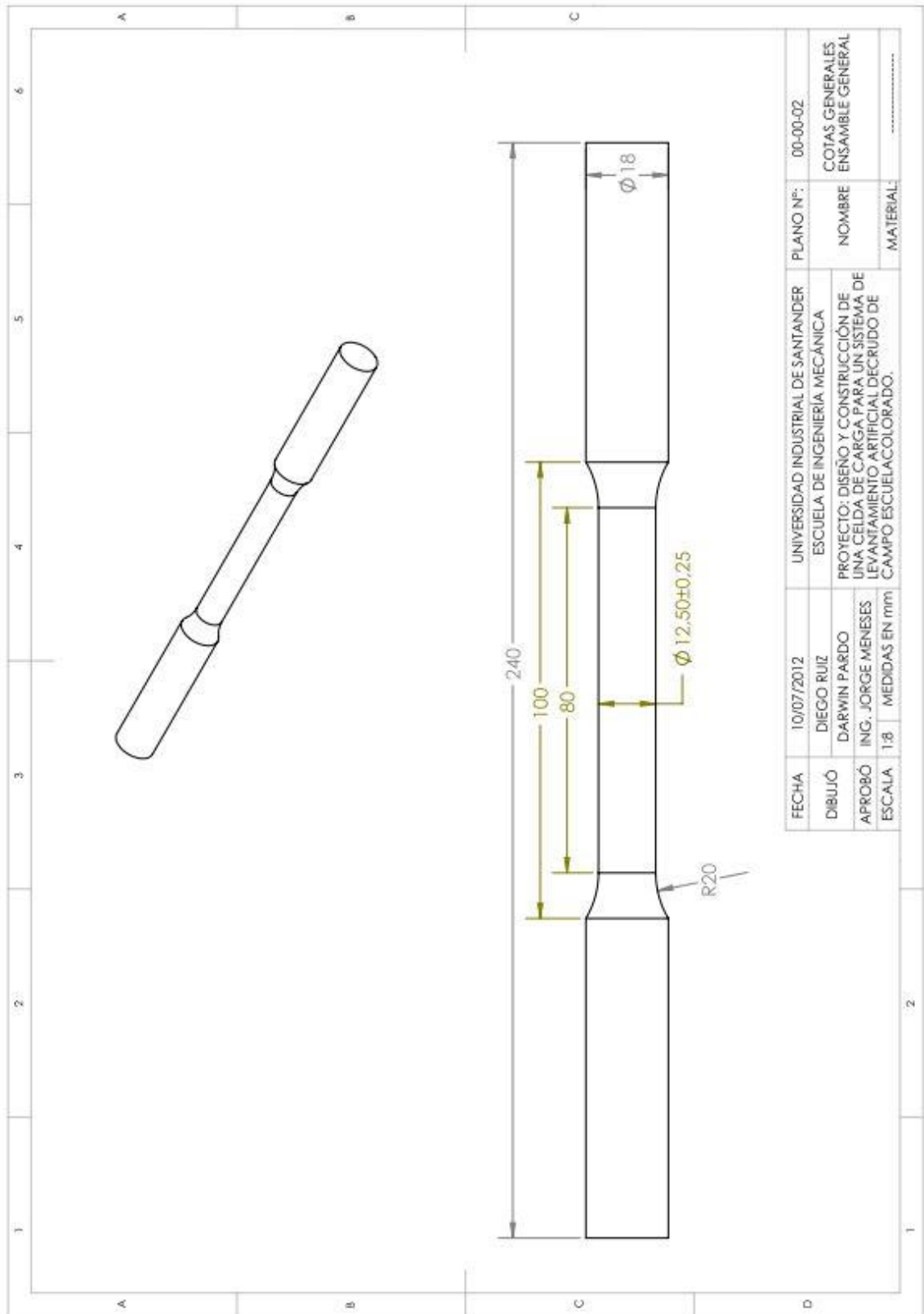
Notes:

- Transducer-Class® gages are supplied with nominal gage factor values that will vary slightly with pattern. They are not suitable for strain measurement in stress analysis applications. Request our Precision Strain Gages databook, or contact our Applications Engineering Department, for a complete listing of gages for precision strain measurement applications.

(1) Nominal gage factor is 2.3 for EMC options.

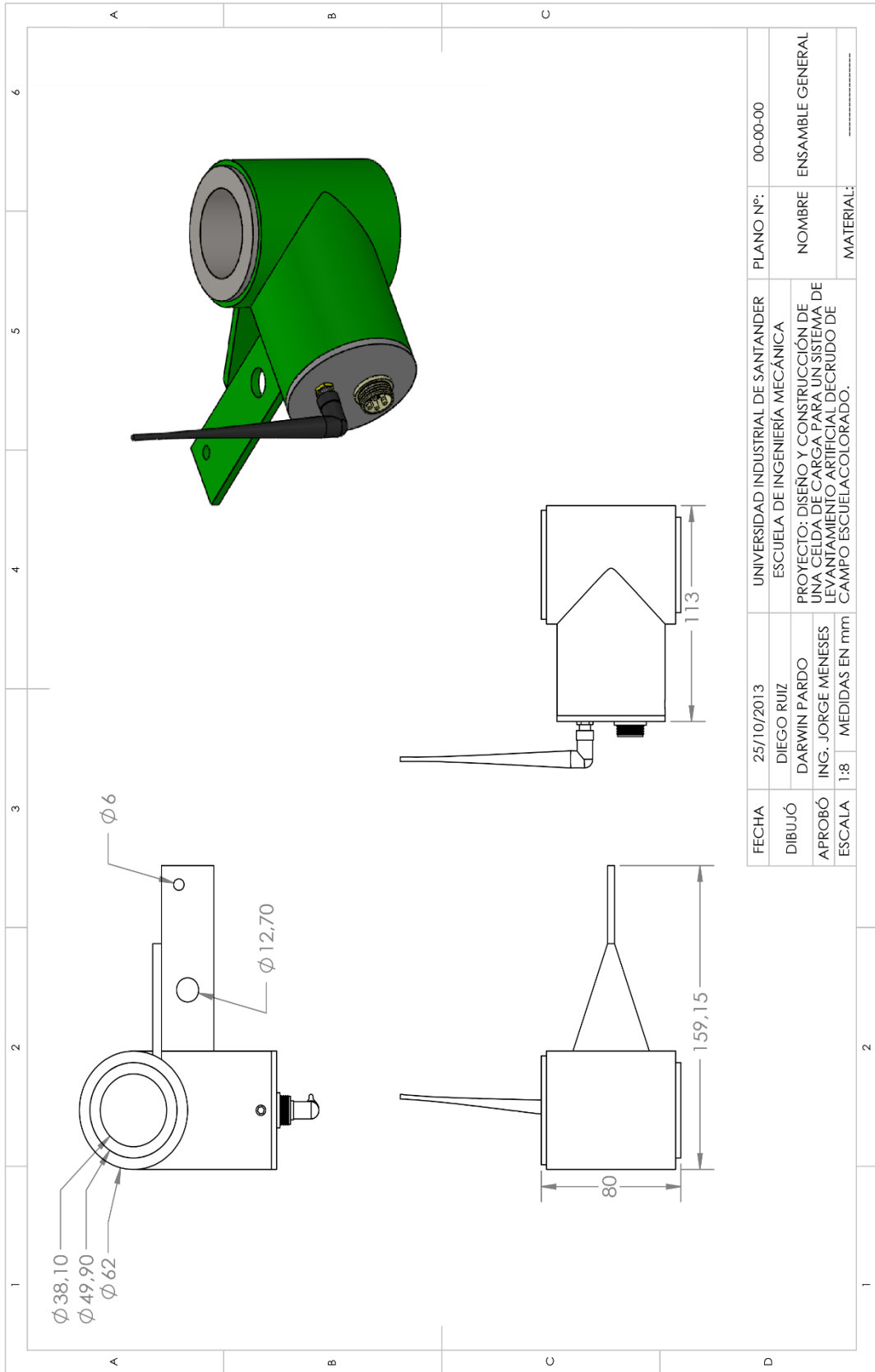
(2) Unidirectional strain.

Anexo E. Planos Probetas Para Ensayos MTS 810

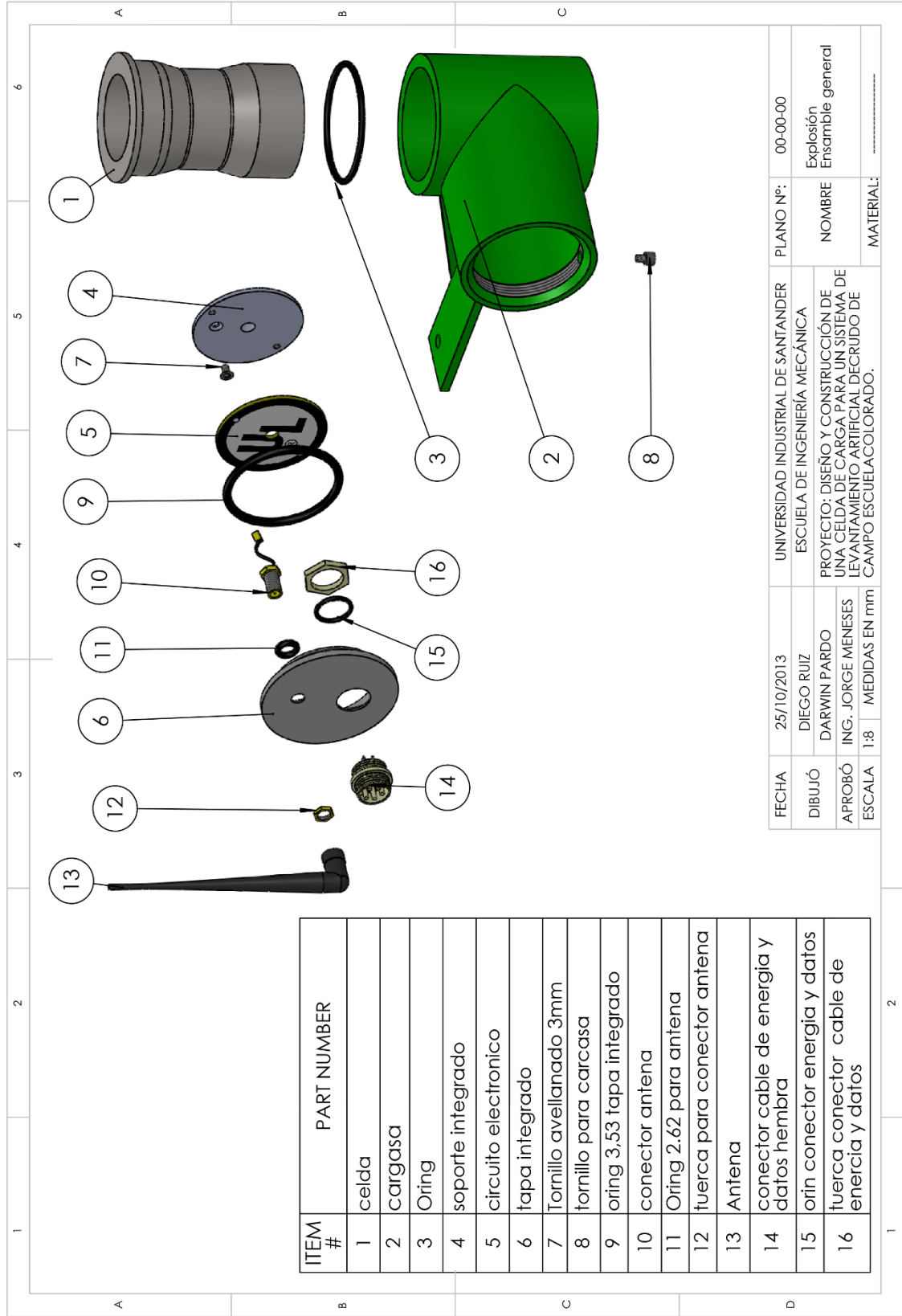


FECHA	10/07/2012	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PLANO N°:	00-00-02
DIBUJÓ	DIEGO RUIZ	ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA	NOMBRE	COTAS GENERALES ENSAMBLE GENERAL
APROBÓ	DARWIN PARDO	PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CARGA PARA UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DECRUDO DE	MATERIAL:
ESCALA	1:8	CAMPO ESCUELA COLORADO.		

Anexo F. Planos Celda de Carga

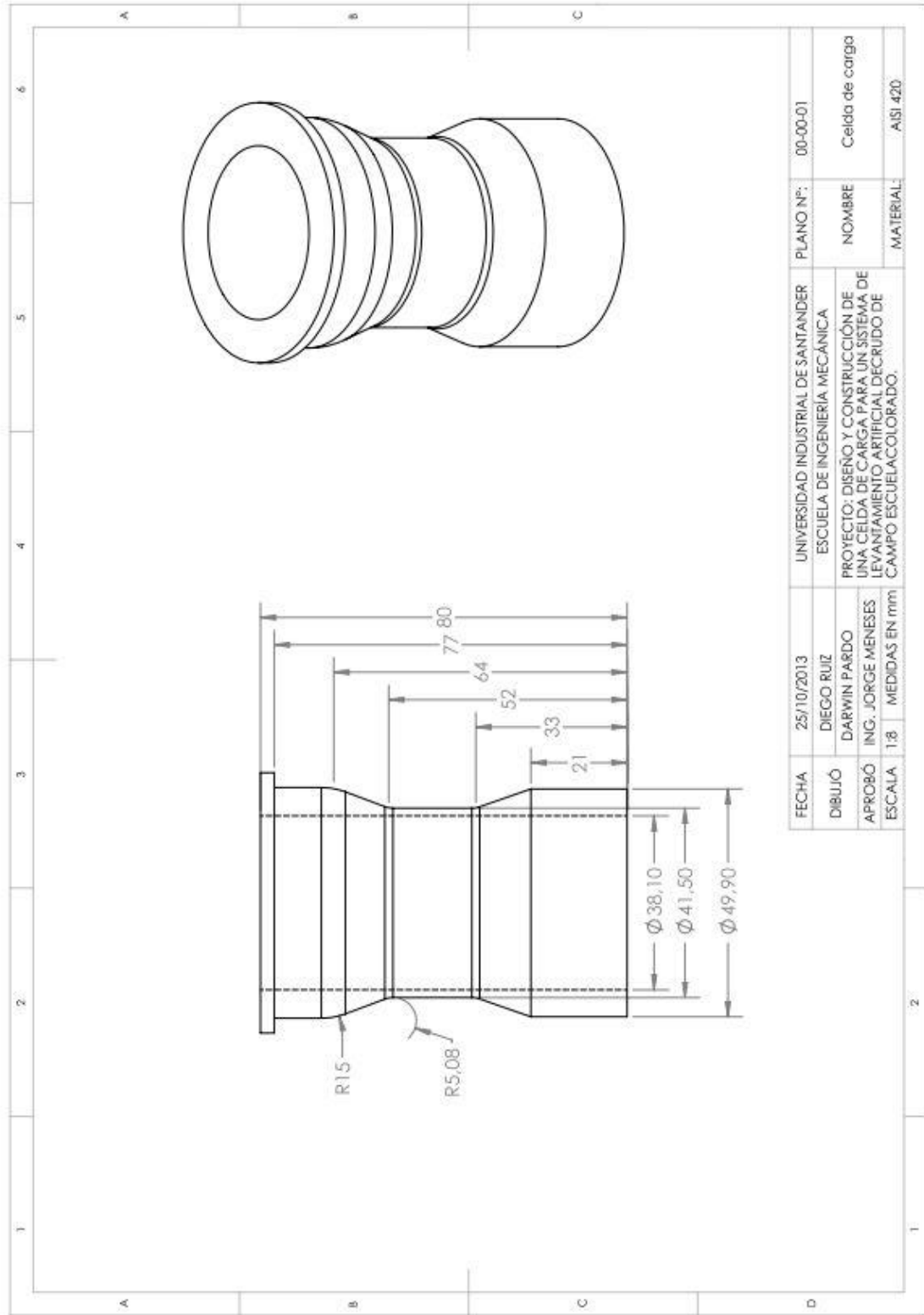


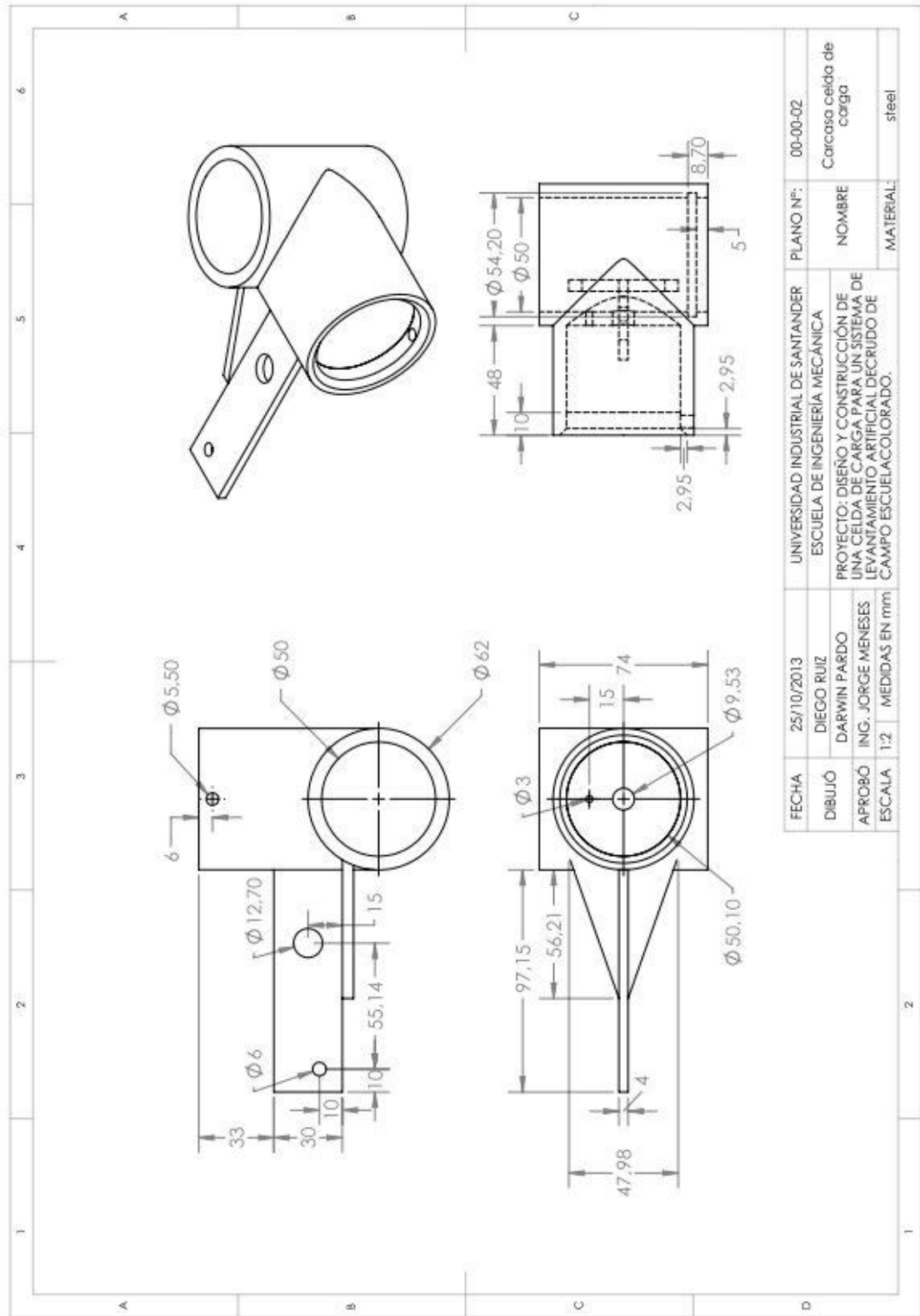
FECHA	25/10/2013	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PLANO N°:	00-00-00
DIBUJÓ	DIEGO RUIZ	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	NOMBRE	ENSAMBLE GENERAL
APROBÓ	DARWIN PARDO ING. JORGE MENESES	PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CARGA PARA UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DECRUDO DE CAMPO ESCUELA COLORADO.	MATERIAL:	
ESCALA	1:8	MEDIDAS EN mm		

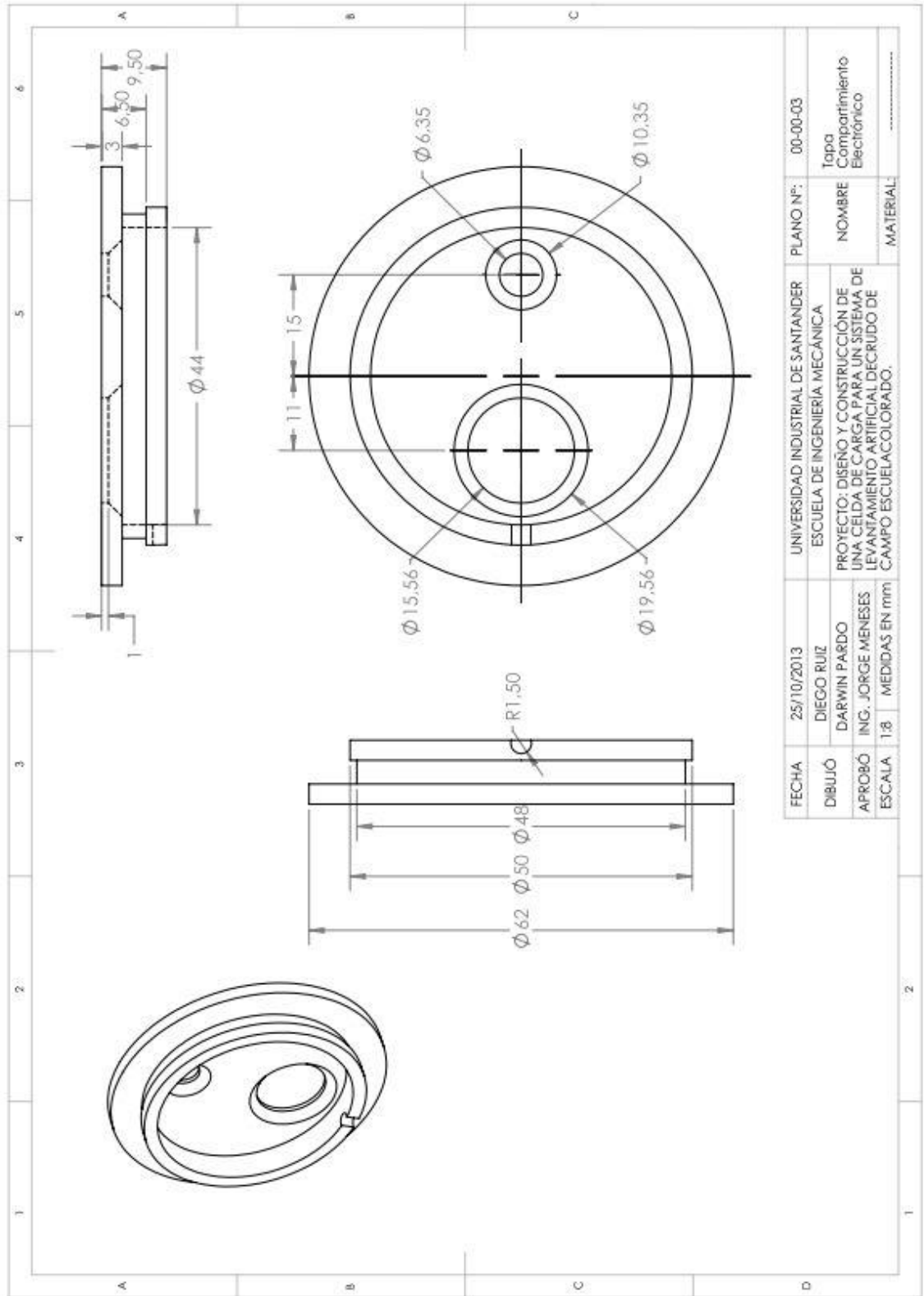


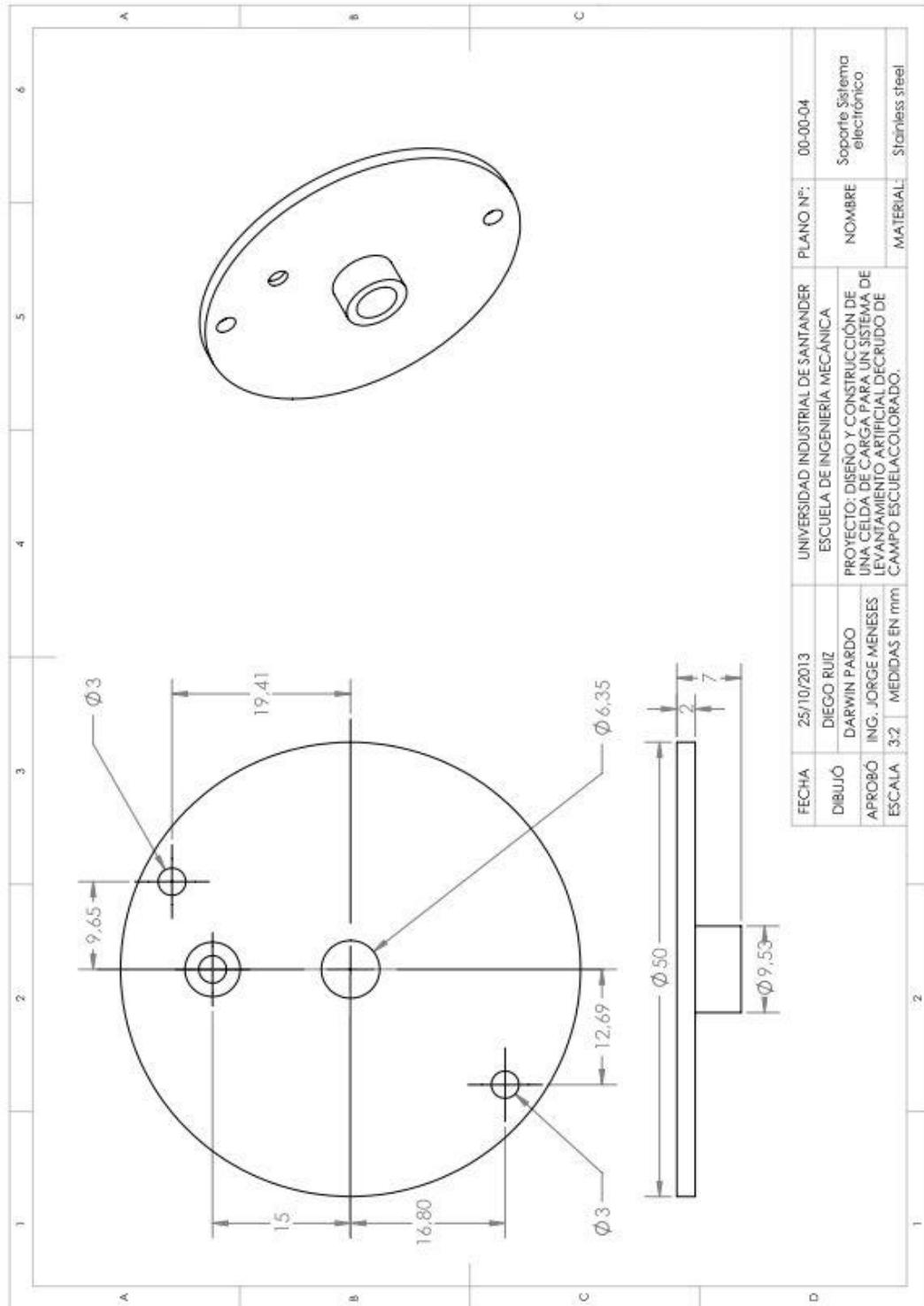
ITEM #	PART NUMBER
1	celda
2	cargasa
3	Oring
4	soporte integrado
5	circuito electronico
6	tapa integrado
7	Tornillo avellanado 3mm
8	tornillo para carcasa
9	oring 3,53 tapa integrado
10	conector antena
11	Oring 2.62 para antena
12	tuercas para conector antena
13	Antena
14	conector cable de energia y datos hembra
15	oring conector energia y datos
16	tuercas conector cable de energia y datos

FECHA	25/10/2013	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PLANO N°:	00-00-00
DIBUJÓ	DIEGO RUIZ	ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA	NOMBRE	Explosión Ensamble general
APROBÓ	DARWIN PARDO	PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CARGA PARA UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DEGRUJO DE CAMPO ESCUELA COLORADO.	MATERIAL:	
ESCALA	ING. JORGE MENESES 1:8 MEDIDAS EN mm			

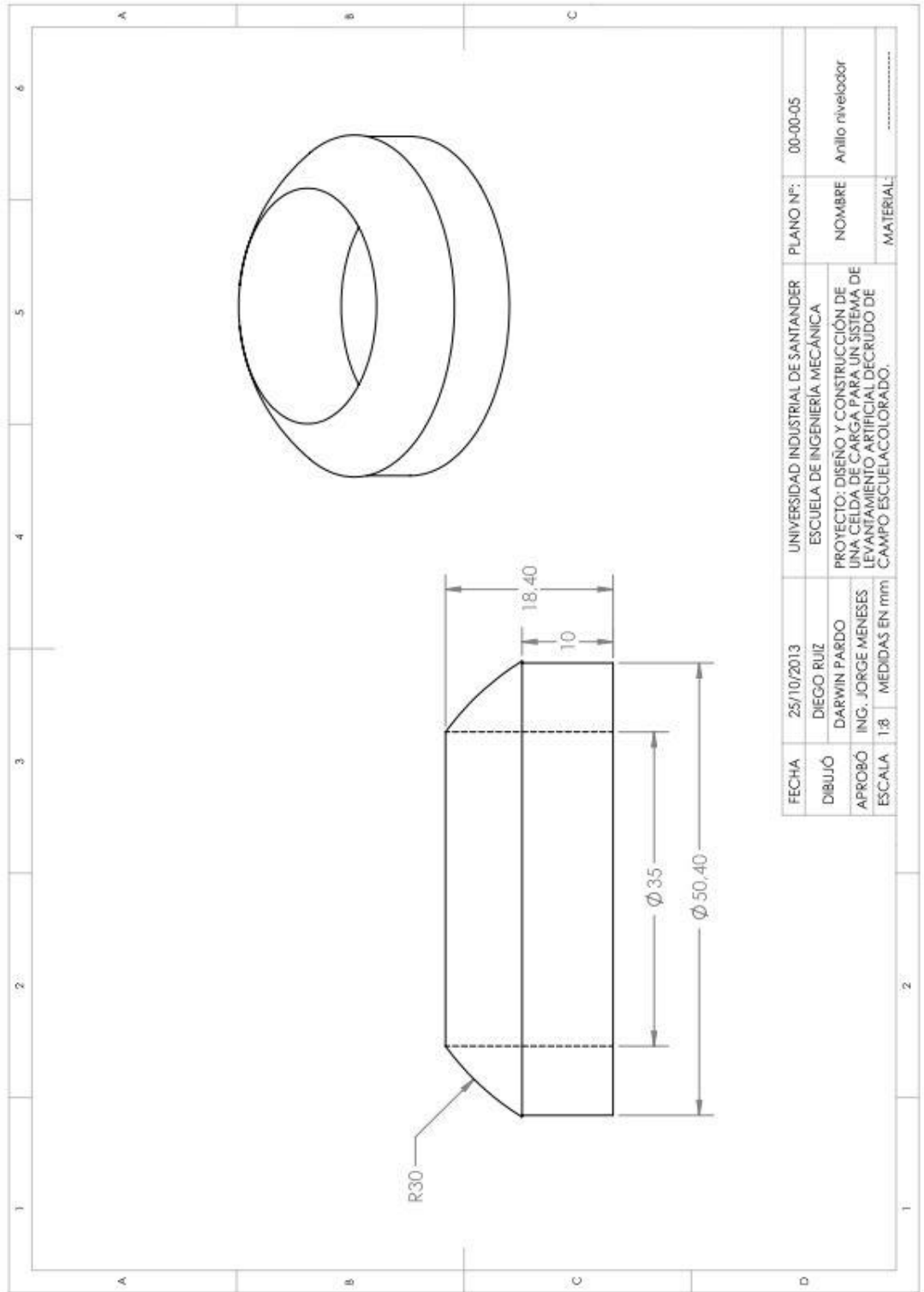




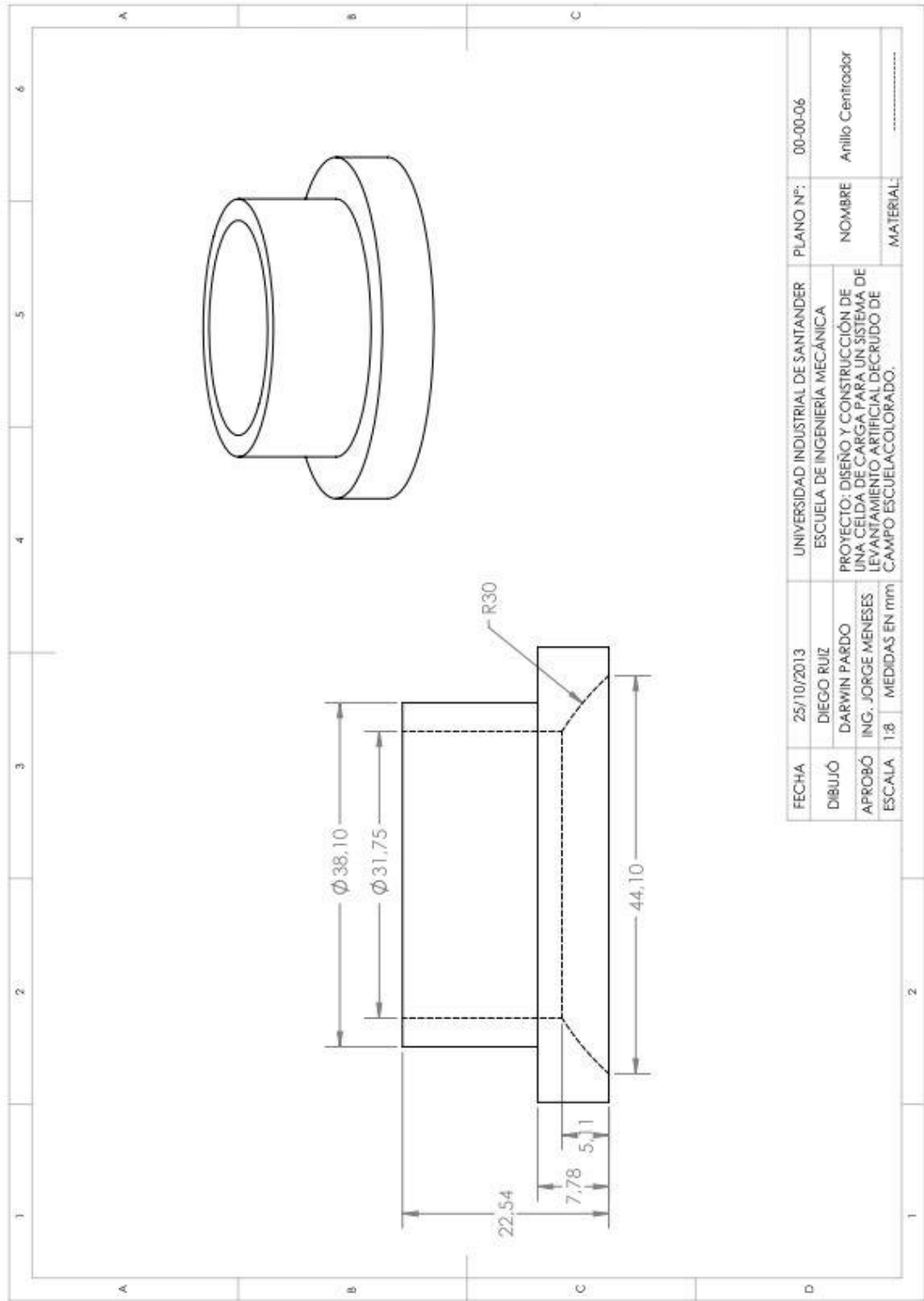




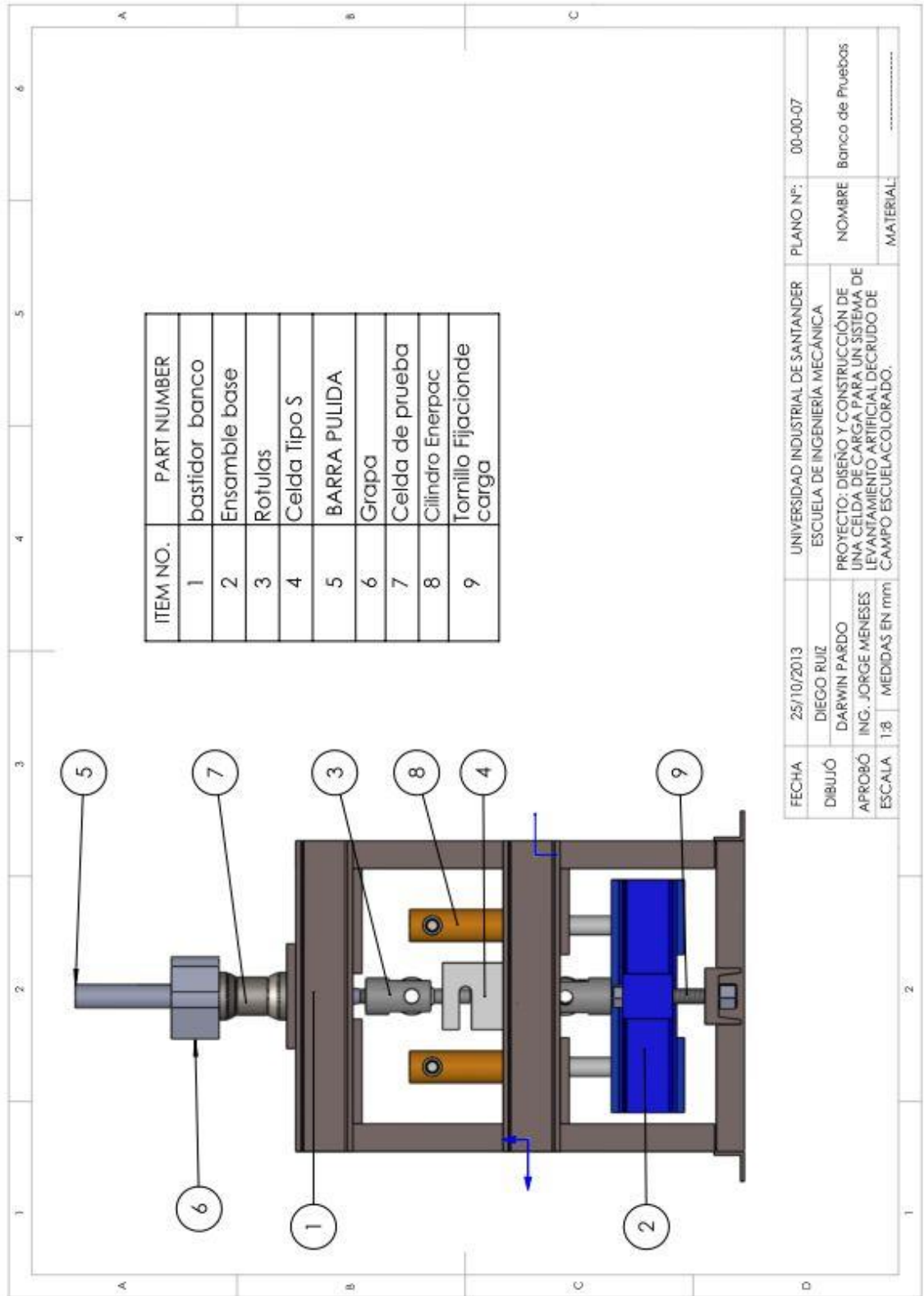
FECHA	25/10/2013	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PLANO N°:	00-00-04
DIBUJÓ	DIEGO RUIZ	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA	NOMBRE	Soporte Sistema electrónico
APROBÓ	DARWIN PARDO	PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CARGA PARA UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DECRUDO DE CAMPO ESCUELACOLORADO.	MATERIAL:	Stainless steel
ESCALA	3:2	MEDIDAS EN mm		



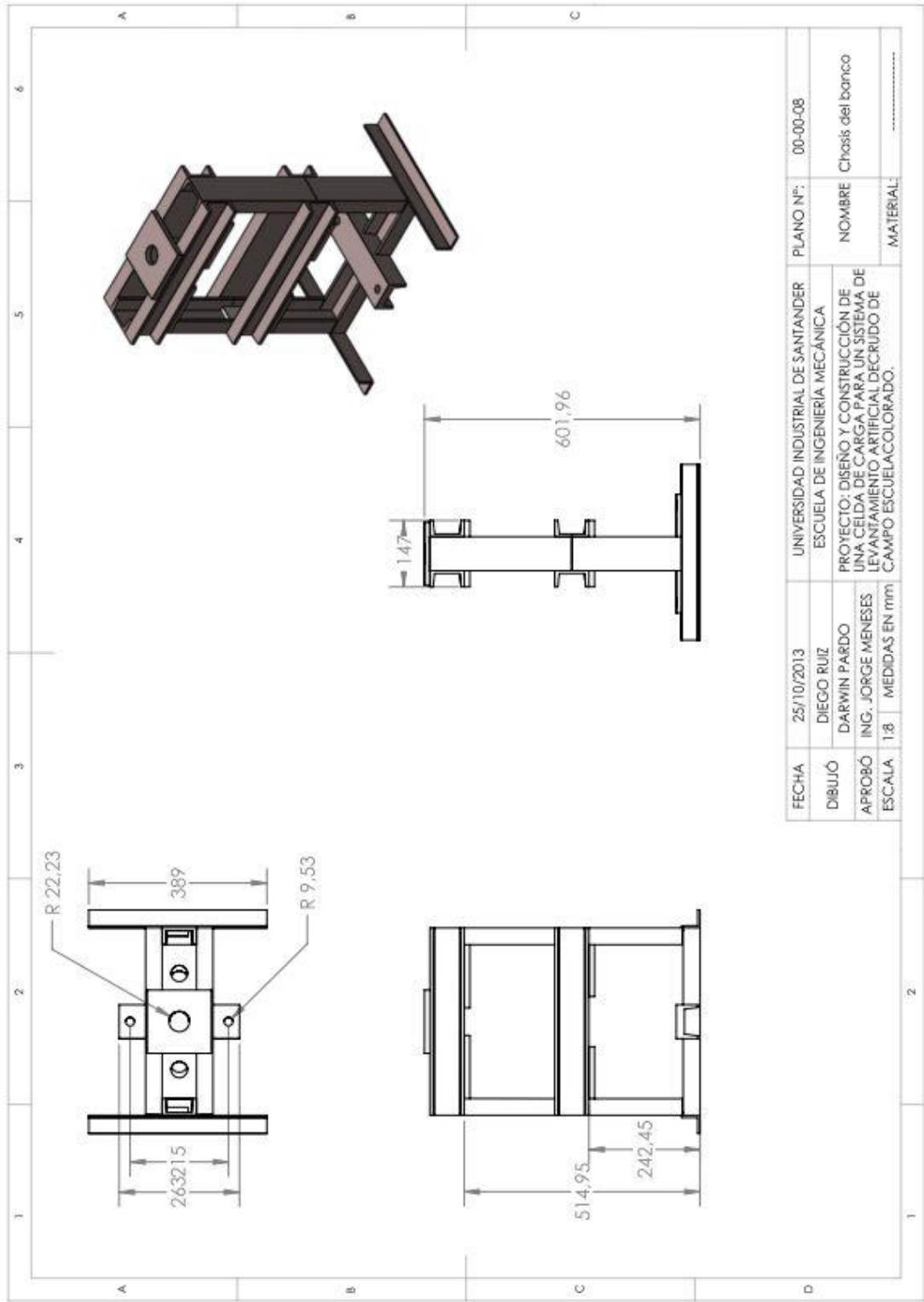
FECHA	25/10/2013	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PLANO N°:	00-00-05
DIBUJÓ	DIEGO RUIZ	ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA	NOMBRE	Anillo nivelador
APROBÓ	DARWIN PARDO ING. JORGE MENESES	PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CARGA PARA UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE CRUDO DE CAMPO ESCUELA COLORADO.	MATERIAL
ESCALA	1:8	MEDIDAS EN mm		



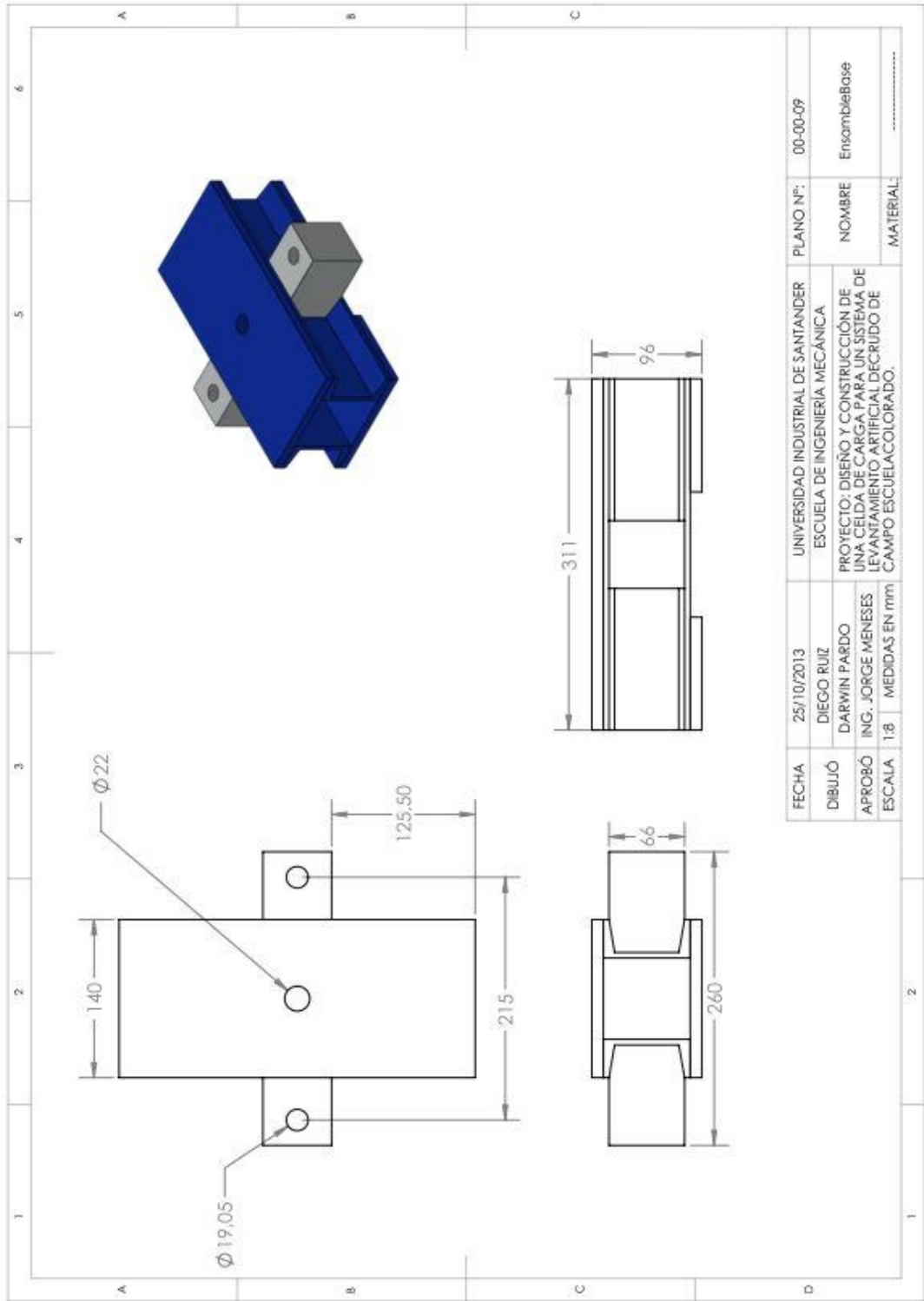
Anexo G. Planos Banco de Pruebas Estático 10.000 lb



FECHA	25/10/2013	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PLANO Nº:	00-00-07
DIBUJÓ	DIEGO RUIZ	ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA	NOMBRE	Banco de Pruebas
APROBÓ	DARWIN PARDO	PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CARGA PARA UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DEGRUO DE CAMPO ESCUELA-COLORADO.	MATERIAL:
ESCALA	1:8	MEDIDAS EN mm		



FECHA	25/10/2013	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PLANO N°:	00-00-08
DIBUJÓ	DIEGO RUIZ	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA	NOMBRE	Chasis del banco
APROBÓ	DARWIN PARDO	PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CARGA PARA UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DEGRUPO DE CAMPO ESCUELA COLORADO.	MATERIAL:
ESCALA	1:8	MEDIDAS EN mm		



FECHA	25/10/2013	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PLANO N°:	00-00-09
DIBUJÓ	DIEGO RUIZ	ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA	NOMBRE	EnsambleBase
APROBÓ	DARWIN PARDO	PROYECTO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE CARGA PARA UN SISTEMA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DECRUDO DE CAMPO ESCUELA COLORADO.	MATERIAL:
ESCALA	1:3	MEDIDAS EN mm		

