

**AUTOMATIZACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA EVALUACIÓN DE  
RECUBRIMIENTOS MEDIANTE EL ENSAYO TENSIL.**

**EDWIN YESID TIRADO ARIZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2005**

**AUTOMATIZACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA EVALUACIÓN DE  
RECUBRIMIENTOS MEDIANTE EL ENSAYO TENSIL.**

**EDWIN YESID TIRADO ARIZA**

**Trabajo de Grado presentado como requisito parcial  
para optar al título de Ingeniero Electrónico**

**Director**

**Mpe. JAIME BARRERO PÉREZ**

**Codirector**

**Ph.D. DIONISIO LAVERDE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2005**

## DEDICATORIA

*A mis padres: Ana Felisa Ariza y Miguel Antonio Tirado, por su amor ,  
sus valiosos esfuerzos y sacrificios, buscando siempre el bienestar y la  
superación de todos los integrantes de la familia.*

*Dios los Bendiga.*

*Edwin Yesid Tirado Ariza*

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa su sincero agradecimiento a:

Mpe. JAIME BARRERO, Director del Trabajo de Grado y docente de la Universidad Industrial de Santander por su apreciable colaboración, disposición y orientación en todo lo relacionado con la automatización del equipo.

PhD. DIONISIO LAVERDE CATAÑO, Codirector del Proyecto de Grado y docente de la Universidad Industrial de Santander por su valiosa orientación, colaboración, y apoyo en el desarrollo de este trabajo de grado.

Msc. PhD. ENRIQUE VERA, Director de Investigaciones y docente de la Universidad Tecnológica y Pedagógica de Colombia sede Tunja ya que gracias a su motivación y a sus grandes contribuciones encaminadas a modernizar el equipo de tracción fue posible concluir con éxito el objetivo trazado.

JHON GUERRERO, Ingeniero Metalúrgico y docente de la Universidad Industrial de Santander por los aportes y colaboración brindados en el tiempo que se realizó la tesis.

Empresa FANTAXIAS Ltda. por el aporte de muestras y la elaboración de accesorios para el equipo de tracción.

ORLANDO FERNANDEZ, Ing. Electrónico e integrante del grupo de investigación en Corrosión de la UPTC ya que gracias a su gran aporte en tiempo y conocimientos se llevó a cabo la automatización del equipo para evaluar la adherencia de recubrimientos.

A todos los estudiantes y docentes, integrantes de los grupos de investigación en Superficies, Electroquímica y Corrosión (GSEC) de la UPTC y el de Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente de la sede Guatigará.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron en que se llevara a feliz término esta tesis.

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	16
<b>1. ADHESIÓN: TEORÍA Y TERMINOLOGÍA</b>	19
<b>1.1 ADHESIÓN</b>	19
1.1.1. Clasificación de la adhesión.	20
1.1.2. Mecanismos de falla en los recubrimientos.	22
<b>1.2 ENSAYOS DE ADHESIÓN</b>	23
1.2.1 Ensayos Cualitativos.	24
1.2.2 Ensayos Cuantitativos.	26
<b>1.3 GALVANOTECNIA</b>	29
1.3.1 Electrodeposición por corriente directa (DC).	29
1.3.2 Electrodeposición por corriente alterna (AC).	31
<b>1.4 TRATAMIENTOS PREVIOS</b>	33
1.4.1 Desengrasado.	33
1.4.2 Decapado.	34
<b>2. NORMAS PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO TENSIL</b>	35
<b>2.1 DESCRIPCIÓN DEL TEST PULL-OFF</b>	36
<b>2.2 EQUIPO EMPLEADO.</b>	36
2.2.1 Medidores.	36
2.2.2 Dolly.	41
2.2.3 Probeta.	42
2.2.4 Adhesivo.	42
2.2.5 Solventes y Lijas.	42
<b>2.3 PREPARACIÓN DEL TEST.</b>	43
<b>2.4 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DEL TEST.</b>	44
<b>2.5 CÁLCULO E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.</b>	45
<b>2.6 REPORTE DE DATOS.</b>	46
<b>2.7 PRECISIÓN Y TENDENCIAS</b>	46
<b>3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE TRACCIÓN</b>	48
<b>3.1 ESTRUCTURA INICIAL</b>	49
3.1.1 Transductor de Fuerza.	51
3.1.2 Detector de Proximidad tipo Inductivo.	53
3.1.3 Engranajes.	54

3.1.4 Motor.	56
<b>3.2 ESTRUCTURA FINAL DEL EQUIPO.</b>	<b>57</b>
3.2.1 Plataforma Fija.	57
3.2.2 Accesorio para Fijación de Muestras.	58
3.2.3 Accesorio para el alineamiento de Muestras.	58
3.2.4 Accesorios para pruebas de tracción.	59
3.2.5. Transductor de desplazamiento.	60
<b>4. HARDWARE EMPLEADO EN LA AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO</b>	<b>64</b>
<b>4.1 TARJETA NI-DAQ6221mx</b>	<b>64</b>
4.1.1 Canales Analógicos de Entrada.	66
4.1.2 Canales Analógicos de Salida.	67
4.1.3 Canales Digitales o Puertos Digitales.	67
4.1.4 Configuración de Pines.	68
4.1.5. Bloque de Terminales.	70
<b>4.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN</b>	<b>71</b>
4.2.1 Fuente Empleada.	71
4.2.2 Parámetros de rendimiento.	73
<b>4.3 EXCITACIÓN DE LA CELDA DE CARGA</b>	<b>76</b>
<b>4.4 CIRCUITO PARA EL MEDIDOR DE DESPLAZAMIENTO.</b>	<b>78</b>
<b>4.5 CIRCUITO PARA EL MEDIDOR DE TEMPERATURA.</b>	<b>81</b>
<b>4.6 CIRCUITO PARA OPERACIÓN DEL MOTOR.</b>	<b>82</b>
<b>5. SOFTWARE DISEÑADO E IMPLEMENTADO</b>	<b>85</b>
<b>5.1 CALIBRACIÓN DE TRANSDUCTORES</b>	<b>86</b>
5.1.1 Calibración del Extensómetro.	87
5.1.2 Calibración de la Celda de Carga.	89
5.1.3 Calibración del Sensor de Temperatura.	90
<b>5.2 INTERFAZ GRÁFICA</b>	<b>91</b>
5.2.1. Visualización del progreso de la Prueba.	93
5.2.2. Gráficas suministradas por el Software.	94
<b>5.3 SUBVIS IMPLEMENTADOS.</b>	<b>96</b>
5.3.1. SubVI para el Extensómetro.	96
5.3.2. SubVI para la Celda de carga.	97
5.3.3. SubVI para la Lectura de temperatura.	98
5.3.4. SubVI para el Reporte de resultados.	99
<b>6. PRUEBAS REALIZADAS CON EL EQUIPO DE TRACCIÓN</b>	<b>100</b>
<b>6.1. TIPO DE DOLLY EMPLEADO.</b>	<b>100</b>
<b>6.2. PEGAMENTOS EMPLEADOS.</b>	<b>101</b>
<b>6.3. PROBETAS USADAS.</b>	<b>102</b>

<b>6.4 RESULTADOS OBTENIDOS.</b>	<b>105</b>
<b>7. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES</b>	<b>109</b>
<b>8. RECOMENDACIONES</b>	<b>112</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>114</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>116</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Partes del equipo Inicial. _____	50
<b>Tabla 2.</b> Pines de la tarjeta NI-DAQ6221mx usados. _____	68
<b>Tabla 3.</b> Calibración del extensómetro. _____	87
<b>Tabla 4.</b> Calibración de la Celda de Carga. _____	89
<b>Tabla 5.</b> Tensión de salida del LM35. _____	91
<b>Tabla 6.</b> Fragmento del archivo de salida para Prueba de Adherencia. _____	106
<b>Tabla 7.</b> Fragmento del Archivo de Salida de la Prueba de Tracción. _____	107

## LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Clasificación de la adhesión. _____	21
Figura 2. Ensayo tensil. _____	26
Figura 3. Prueba de ensamble _____	28
Figura 4. Parámetros de las técnicas de PC y PCR. _____	32
Figura 5. Medidor Tipo I. _____	37
Figura 6. Medidor Tipo II Modelo 106 _____	38
Figura 7. Medidor Tipo III _____	39
Figura 8. Medidor Tipo IV _____	40
Figura 9. Medidor Tipo V _____	41
Figura 10. Dollies utilizados en los ensayos Pull-Off. _____	41
Figura 11. Estructura inicial del Equipo de Tracción. _____	50
Figura 12. Celda de carga usada. _____	51
Figura 13. Galga Extensiométrica. _____	52
Figura 14. Configuración en puente de Wheatstone. _____	53
Figura 15. Estructura interna del detector de proximidad. _____	54
Figura 16. Tren de Engranajes del equipo. _____	55
Figura 17. Placa del motor DC. _____	56
Figura 18. Plataforma Fija. _____	58
Figura 19. Accesorio para Fijación del conjunto dolly-probeta. _____	58

Figura 20. Accesorio para alineamiento de la muestra.	59
Figura 21. Accesorios para pruebas de tracción.	60
Figura 22. Transductor de Desplazamiento.	61
Figura 23. Estructura final del Equipo	62
Figura 24. Adquisición de datos por Computador	65
Figura 25. Tarjeta NI-DAQ6221mx.	66
Figura 26. Configuración de pines de la tarjeta PCI.	69
Figura 27. Accesorio CB-68LP.	70
Figura 28. Estructura de la fuente empleada.	71
Figura 29. Transformador empleado en la fuente.	72
Figura 30. Diagrama esquemático de la Fuente dual.	73
Figura 31. Circuito para excitación de la Celda de Carga.	76
Figura 32. Ubicación del resistor para la Ganancia del Amplificador.	77
Figura 33. Conexiones para el medidor de desplazamiento.	78
Figura 34. Diagrama esquemático para el medidor de desplazamiento.	80
Figura 35. Circuito para el medidor de temperatura.	82
Figura 36. Diagrama de conexiones para el L298N	83
Figura 37. Panel Frontal del VI para la calibración de transductores.	86
Figura 38. Regresión lineal para el extensómetro.	88
Figura 39. Regresión Lineal para la Celda de Carga.	90
Figura 40. Panel Frontal del VI implementado.	92
Figura 41. Visualización del progreso de la Prueba.	94
Figura 42. Gráficas suministradas por el Software.	95

Figura 43. SubVI para el extensómetro. _____	97
Figura 44. SubVI para la celda de carga. _____	98
Figura 45. SubVI para la lectura de temperatura. _____	98
Figura 46. SubVI para el reporte de resultados. _____	99
Figura 47. Dollies Empleados. _____	101
Figura 48. Pegamentos Empleados. _____	102
Figura 49. Probetas de Cobre, Níquel y Latón. _____	103
Figura 50. Ubicación de la Muestra Bajo Prueba. _____	104
Figura 51. Resultados para una Probeta con Recubrimiento de Cobre. _____	105
Figura 52. Resultados de la prueba de tracción a microprobeta de aluminio. ___	107

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
<b>ANEXO A.</b> MANUAL DEL USUARIO DEL EQUIPO DE TRACCIÓN _____	116
<b>ANEXO B.</b> HOJAS DE DATOS _____	130
<b>ANEXO B.1.</b> TARJETA NI-DAQ6221mx. _____	131
<b>ANEXO B.2.</b> CELDA DE CARGA. _____	133
<b>ANEXO B.3.</b> POTENCIÓMETRO LINEAL LP802-50. _____	135
<b>ANEXO B.4.</b> AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN INA116. _____	136
<b>ANEXO B.5</b> AMPLIFICADOR OPERACIONAL OPA277. _____	138
<b>ANEXO B.6</b> TRANSDUCTOR DE TEMPERATURA LM35. _____	140
<b>ANEXO B.7</b> PUENTE H L298N. _____	143
<b>ANEXO B.8</b> REFERENCIA DE VOLTAJE REF102 _____	145
<b>ANEXO C.</b> NORMAS ASTM _____	147
<b>ANEXO C.1</b> NORMA ASTM D4541-02 _____	148
<b>ANEXO C.2.</b> NORMA ASTM C633-01 _____	150
<b>ANEXO C.3.</b> NORMA ASTM 6251-01 _____	153

## RESUMEN

### 1. TÍTULO

AUTOMATIZACIÓN DE UN EQUIPO PARA LA EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS MEDIANTE EL ENSAYO TENSIL\*

### 2. AUTOR

Edwin Yesid Tirado Ariza\*\*

### 3. PALABRAS CLAVES

Fuerza de adherencia, ensayos de adhesión, Recubrimientos, Ensayo Tensil, transductores, **Hardware, Software**, LabVIEW®, FANTAXIAS Ltda.

### 4. DESCRIPCIÓN

En el documento presentado se describe la automatización de una máquina de tracción empleada para cuantificar la fuerza de adherencia en recubrimientos metálicos, por medio del ensayo tensil, cumpliendo con las normas internacionales.

En el primer capítulo se exponen los conceptos de fuerza de adhesión, ensayos de adhesión (cualitativos y cuantitativos) y el proceso de galvanotecnia, los cuales deben tenerse presentes al momento de evaluar la fuerza de adherencia. Por otra parte en el capítulo 2 se describen las normas para realizar el ensayo tensil así como los diferentes equipos empleados y el procedimiento a seguir para la ejecución del test. La descripción del equipo de tracción y los transductores empleados se dan a conocer en el capítulo 3, el capítulo 4 hace mención al hardware usado para automatizar el equipo y en el capítulo 5 se menciona el software en LabVIEW®, realizado para tal fin.

Como resultado, se proporciona al grupo de investigaciones en minerales, Biohidrometalurgia y ambiente un equipo versátil, capaz de medir la fuerza de adherencia en recubrimientos metálicos sobre superficies metálicas, buscando el mejoramiento técnico y económico de la sección de galvanotecnia de la empresa FANTAXIAS Ltda., con sede en la ciudad de Bucaramanga.

---

\* Proyecto de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas, Ingeniería Electrónica. Director: Mpe. Jaime Barrero Pérez.

## ABSTRACT

### 1. TITLE

AUTOMATION OF A COATING EVALUATING EQUIPMENT THROUGH PULL-OFF TESTING\*.

### 2. AUTHOR

Edwin Yesid Tirado Ariza\*\*

### 3. KEY WORDS

Traction Machine, Adhesion effort, Tests, Coatings, Tensile tests, transducers, hardware, software, LabVIEW®, FANTAXIAS Ltda.

### 4. DESCRIPTION

This document describes the automation of a traction machine used to quantify the adhesion force in metallic coatings, through pull-off test, according to international standards.

The first chapter exposes the concepts of adhesion force, types of adhesion tests (qualitative and quantitative) and the galvanotecnic processes which must be taken into account when evaluation the adhesion force. On the other hand, chapter 2 describes the pull-off tests regulations, as well as, the different equipment used and the procedure to carry out the test. The description of the traction equipment and the used transducers are shown in chapter 3. Chapter 4 mentions the hardware used for the automation, while chapter 5 illustrates the software in LabVIEW®, employed for the automation.

As a result, “El Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente”, is provided with versatile equipment, capable of measuring the adhesion force of metallic coatings over metallic surfaces; looking for the technical and economical improvement of the galvanotecnic section of the FANTAXIAS Ltda. Industry based in Bucaramanga city.

---

\* Final Year Project.

\*\* Faculty of Engineering Physical-mechanics. Engineering Electronic. Advisor: Mpe. Jaime Barrero Pérez.

## INTRODUCCIÓN

La adhesión es una de las propiedades más importantes de los electrodepósitos, ya que muchas de las características de funcionalidad tales como protección contra la corrosión, capacidad de recepción sucesiva de capas de diferentes metales, estructura de grano, porosidad, uniformidad, durabilidad e integridad, entre otras, están dadas por la adherencia al sustrato.

Los problemas de este tipo (capa-sustrato), radican principalmente en el tipo de preparación superficial, y la compatibilidad del metal depositado con el metal base; considerando los anteriores factores, existe definitivamente una necesidad de cuantificar la adhesión y de generar estudios particulares, que tengan en cuenta no solamente el sistema galvanizado, sino también las condiciones y los agentes que de una u otra forma inciden en ella.

Debido a que la adherencia se define como la suma de las interacciones moleculares entre dos materiales, se ha propuesto el ensayo tensil para determinar la intensidad con que se mantienen unidas tanto sustrato-capas metálicas como capas metálicas-capas metálicas; en este **test** se emplea una máquina de tracción lenta la cual mide el esfuerzo y el desplazamiento necesarios para romper la adhesión.

Para determinar las propiedades de los recubrimientos, las máquinas y los equipos diseñados inicialmente se basaron en elementos mecánicos, esto representa un problema ya que los datos suministrados por los elementos que captan los cambios en las variables físicas no son totalmente confiables y poseen poca precisión.

Los dispositivos electrónicos sin partes móviles con que se cuenta hoy día, así como los sistemas de cómputo cada vez más avanzados, que permiten procesar datos a altas velocidades, eliminan esta desventaja, además, poseen la ventaja de tener una comunicación y/o reporte de los mismos incluso en tiempo real.

En el caso que compete a la ejecución de este proyecto, se cuenta con dos precedentes dados por la ejecución de un trabajo de grado llevado a cabo en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la UIS , titulado **Automatización de una Máquina de Tracción Lenta**; en el que se hizo la actualización de un equipo similar, y por un trabajo de grado realizado en la Escuela de Física de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), sede Tunja, el cual lleva por título **Implementación de una Metodología para Evaluar la Adhesión en Recubrimientos**, siendo este último la base para realizar la automatización del equipo debido ya que parte de lo desarrollado en la UPTC, es utilizado en la estructura del equipo con que cuenta la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander.

Lo que se logró en este proyecto fue la automatización del equipo de adherencia para la adquisición y reporte de datos mediante una interfaz gráfica en LabVIEW® de tal forma que el ensayo sea confiable, reproducible y versátil; pudiéndose determinar el esfuerzo máximo alcanzado para recubrimientos de cobre sobre zamac y de níquel sobre cobre, obtenidos por dos técnicas de electrodeposición diferentes.

Este trabajo de grado hace parte de un proyecto que desarrolla la Empresa FANTAXÍAS Ltda., con sede en la ciudad de Bucaramanga, junto al grupo de Investigación de Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente, de la Universidad Industrial de Santander y COLCIENCIAS; y el grupo de investigación en Control, Electrónica, Modelado y Simulación CEMOS; el cual tiene por objeto adaptar la técnica de corriente pulsante inversa (**PRC** por sus siglas en inglés), para el

proceso de electrorecubrimiento de herrajes y hebillas de aleación zamac con miras al mejoramiento técnico–económico de la sección de galvanotecnia de la empresa.

La distribución de los capítulos que componen este trabajo de grado se ha hecho de tal forma que el lector tenga la posibilidad de conocer paso a paso el procedimiento seguido en la automatización del equipo en mención; es así como en los dos primeros capítulos se encuentra la teoría, terminología y normas necesarias para realizar las pruebas para determinar la fuerza de adhesión en recubrimientos. En el tercer capítulo se hace una descripción del equipo objeto de la modernización, así como de los transductores empleados para obtener las lecturas de esfuerzo y desplazamiento, variables principales a tratar, dando a conocer sus características y teoría de funcionamiento.

En los capítulos subsecuentes se hace mención del **hardware** y del **software** diseñados e implementados, y por último una sección en la cual se muestran algunas pruebas a recubrimientos de cobre sobre zamac y de níquel sobre cobre, obtenidos por electrodeposición por corriente directa y por corriente pulsante inversa. Además, como anexos se presentan las hojas de datos de los componentes electrónicos, y los transductores, la norma ASTM D4541-02 titulada **Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers** y un detallado manual de usuario, ya que el equipo hará parte del instrumental de los grupos de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente de la UIS y de Superficies, Electroquímica y Corrosión (GSEC) de la UPTC.

## 1. ADHESIÓN: TEORÍA Y TERMINOLOGÍA

La adherencia entre las capas electrodepositadas y el metal base es de gran importancia para la calidad de un artículo recubierto, ya que las fuerzas mecánicas de deformación, el soplado por gases y la corrosión entre otros factores, van disminuyéndola hasta dejar sin uso al objeto protegido. Sin embargo, el grado de adherencia raramente se intenta medir, bien sea por su complejidad o por el tiempo que demanda, haciendo que las empresas se limiten a controlar el proceso y a efectuar otras pruebas como la de espesor, porosidad, corrosión, y brillo las cuales son mucho más sencillas.

Pese a las dificultades nombradas, es importante encontrar los valores numéricos de las fuerzas que mantienen unidos los materiales; esta necesidad, junto con el desarrollo de nuevas y diversas técnicas, permitieron encontrar alternativas económicas y confiables para la industria electroquímica de recubrimientos, la cual, se compone en su gran mayoría de pequeños talleres.

### 1.1 ADHESIÓN

El término adhesión es complejo, por ello, antes de presentar la metodología de la medida de adhesión, es necesario comprender de lleno su significado y la forma en que se relaciona con los valores medidos en el laboratorio. La adhesión puede definirse de varias formas dependiendo del campo de interés (químico, físico, adhesivos, pinturas, metales, etc.) y otros factores, pero esencialmente, la adhesión es la suma de las interacciones moleculares (pueden ser iónicas, covalentes, polares o de **Van Der Waals**), entre dos materiales.

Los valores de estas interacciones dependen de la proximidad de los materiales y del tipo de interacción. Así, para definir la adhesión debe diferenciarse entre Básica o Fundamental, y la medida en el laboratorio debe ser nombrada como Práctica o Experimental respectivamente. Otros nombres comunes para los usados anteriormente son Esfuerzo de **Bond** o Fuerza de adhesión.

La adhesión práctica o esfuerzo de **Bond** se mide en términos de fuerza/área, fuerza/longitud, o energía/área (trabajo/área) requerida para romper la interfase entre dos materiales (A y B). Las fuerzas de adhesión y energía o trabajo de adhesión pueden relacionarse únicamente si se hacen las suposiciones de que el cambio de la fuerza con la distancia de separación permanece constante, y además, que este cambio es unidimensional. En otras palabras, el trabajo de adhesión está dado por la ecuación (1):

$$W = \int f(x)dx \tag{1}$$

Las fallas en la adhesión de recubrimientos se clasifican, dependiendo de la forma y del sitio en que ocurra la fractura, en Adhesiva o Cohesiva, cada una involucra ciertas características que se describen a continuación.

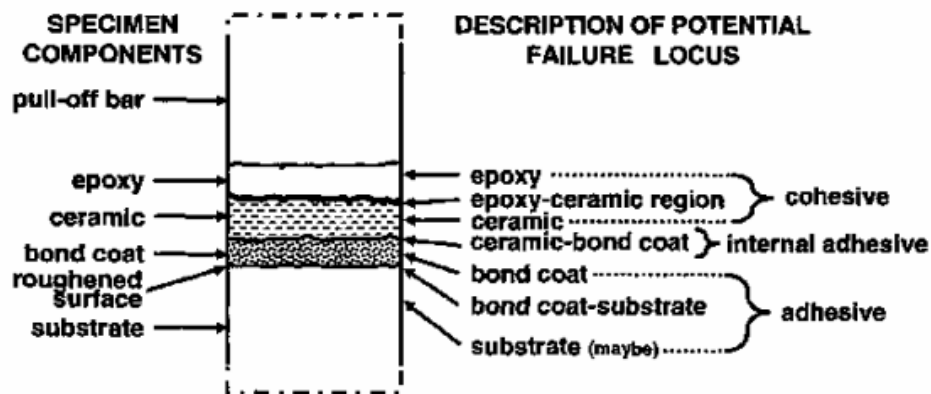
**1.1.1. Clasificación de la adhesión.** Existen dos tipos de fallas que comúnmente se presentan; si el rompimiento ocurre en la interfase, entonces se denomina falla adhesiva y si ocurre entre A o B es una falla cohesiva, (ver figura 1). Si no existe una interfase bien definida debido a la interdifusión, los valores obtenidos representarán el plano más débil dentro del sistema (sustrato-capas), lo cual es importante para localizar la posición de separación.

Las fallas se comprenden mejor si se definen las fuerzas de unión, así, la fuerza de adhesión es una manifestación de las fuerzas moleculares que hace que las

moléculas de sustancias distintas puestas en contacto permanezcan unas junto a otras; mientras que la fuerza de cohesión es la coexistencia de un cuerpo debido a las fuerzas moleculares, es decir, la propiedad por la cual las moléculas se mantienen juntas.

En los casos donde no sea claro el corte de la falla adhesiva, los términos esfuerzo de **Bond** o esfuerzo de adhesión no pueden ser usados, y desafortunadamente no existe un término para designar las fallas no adhesivas. En el campo de los adhesivos el término esfuerzo de enlace se usa para representar las fallas de asociación sin importar el sitio de la falla.

**Figura 1.** Clasificación de la adhesión.



Fuente: **Norma ASTM C633**

Cuando existe una falla adhesiva verdadera, la relación entre el esfuerzo de **Bond** y la adhesión básica se puede describir mediante la ecuación (2):

$$\text{Esfuerzo de Bond} = f(\text{adhesión básica}, \text{factores externos}) \quad (2)$$

Los factores externos dependen de la técnica usada para medir el esfuerzo de **Bond**; para un sistema dado, los valores del esfuerzo de **Bond** difieren cuando es

medido por diferentes técnicas, además, algunas de esas técnicas son dependientes del operador adicionándose más problemas.

**1.1.2. Mecanismos de falla en los recubrimientos.** Como se mencionó anteriormente, el recubrimiento puede perder adherencia debido a una gran variedad de factores; catalogando una serie de posibles mecanismos para que el recubrimiento falle; tales mecanismos se pueden clasificar así:

- Enlace pobre del recubrimiento sobre el sustrato debido a su morfología, por el tipo de **spangle** o grano en su superficie y algunas veces por el tratamiento de preservación en la fábrica.
- Por deterioro del enlace inicial debido a la penetración de humedad en el recubrimiento (efecto de adhesión húmeda).
- Corrosión bajo la película ubicada arriba de la superficie del sustrato dada por la humedad.
- Degradación química del recubrimiento, particularmente por medios ácidos o alcalinos.
- Diferencial de expansión y contracción entre el sistema estudiado, a decir, metal y recubrimiento.
- Impurezas sobre superficie del sustrato.
- Por una combinación de todas las anteriores.

La uniformidad de la superficie del galvanizado ha originado muchos métodos para analizar su textura. Algunos autores advierten sobre daño por el uso de algunos tratamientos especiales de limpieza caseros tal como: el lavado de la superficie con vinagre, ácido acético, ceniza, ácido muriático, soluciones de sulfato de cobre, ácido hidroclicórico los cuales han sido analizados como perjudiciales.

## 1.2 ENSAYOS DE ADHESIÓN

En todas las pruebas de adherencia, se aplica al espécimen una fuerza para intentar despegar la capa de metal de la base, y debido a ese desprendimiento, todos los ensayos son de carácter destructivo. La medida de la adherencia se relaciona con el componente perpendicular de la fuerza aplicada.

Las técnicas de medida de adhesión se clasifican en test mecánicos y no mecánicos, y éstos a su vez en cualitativos y cuantitativos, cada uno de los cuales debe aproximarse a lo que se denomina **test** ideal y para ello ha de cumplir el mayor número de los siguientes requisitos:

- Cuantitativo.
- Reproducible.
- Tiempo de prueba corto.
- Fácilmente adaptable a la rutina del **test**.
- Relativamente simple de ejecutar.
- No destructivo.
- Independiente del espesor del depósito.
- Independiente de la experiencia del operador.
- Aplicable a todas las combinaciones de materiales electrodepositados y sustratos.
- Independiente de la geometría del cátodo.
- Válido en un amplio rango de valores.
- Aplicable a productos y procesos.
- Independiente de la forma de ejecutar el **test**.

Además de los ítems anteriores, los requerimientos de maquinaria para la preparación del espécimen deben ser mínimos y no han de necesitarse equipos

especializados para los **test**. Ninguna de estas idealidades puede ser recreada en la realidad y no existe prueba alguna que cumpla al menos la mitad de los requisitos.

**1.2.1 Ensayos Cualitativos.** Como su nombre lo indica, sirven únicamente para catalogar la adherencia del recubrimiento como buena o mala; su gran inconveniente es depender de la experiencia del operario, la cual, generalmente es insuficiente debido a la variedad de sistemas a los que eventualmente se enfrentará; lo que desemboca en resultados subjetivos y a menudo controversiales.

Los **tests** cualitativos poseen limitaciones ya que dependen del tipo de recubrimiento, del espesor, de la ductilidad y de la composición de capas y sustratos; además es muy difícil diferenciar entre los casos donde la adherencia es muy baja y donde es aceptable. Entre los test cualitativos más usados están:

a) Prueba del cuchillo o **Knife Test**: en esta prueba se emplea un cuchillo para separar la capa y establecer si la adherencia de ésta al sustrato o a otra capa (en los sistemas multicapa) está en un nivel adecuado. La evaluación se basa en el grado de dificultad para quitar la capa del sustrato y en el tamaño de dicha capa.

El **test** consiste en hacer, usando el cuchillo y una guía, dos cortes en la capa con un ángulo entre 30° y 45° para formar una X (equis). Acto seguido se intenta levantar, con la punta del cuchillo y por el vértice formado, la capa del sustrato o de la capa inmediatamente anterior. Para un mayor entendimiento de la prueba del cuchillo se puede remitir a la norma ASTM D6677.

b) Prueba de la cinta o **Tape Test**: Es una variación de la prueba del cuchillo en sustratos de metal, consistente en cubrir con cinta sensible la capa cortada,

luego intentar desprender las secciones hechas por los cortes. El corte sobre la superficie del recubrimiento se puede hacer en forma de X (ángulos de 30°) o en forma de cruz (ángulos de 90°).

La ventaja de esta prueba respecto a la anterior es que el desprendimiento de la capa depende exclusivamente de la fuerza de adhesión entre la cinta y el recubrimiento. Un método estandarizado para la aplicación y desempeño de esta prueba está disponible en la norma ASTM D3359.

- c) Prueba doblar y torcer o **Bending and Twisting Test**: Se basa en la idea de que en un alargamiento tanto del sustrato como del recubrimiento, resultan fuerzas que tienden a separarlos. Variaciones en el método involucran diferentes radios, ángulos de curvatura en el sistema (90° o 180°), y repetición tanto de las torciones como de los dobleces.

La fuerza de adherencia es afectada por la disminución del radio del sustrato y del recubrimiento durante el alargamiento, por esta razón el método no es aplicable a capas quebradizas o duras. Las capas dúctiles también tienen inconvenientes pues reducen la tensión aplicada por la deformación plástica que sufren y por consiguiente no es posible diferenciar las capas con adherencia pobre. Este método se usa ampliamente para depósitos delgados pero también es posible su empleo en depósitos de espesor considerable.

- d) Otras pruebas: existen muchas otras pruebas las cuales no se describen aquí, sin embargo se hace mención de algunas de éstas, para el lector interesado, dichos ensayos son: Prueba de impacto o del martillo, Prueba de calentamiento-enfriamiento y Prueba **Push Out**.

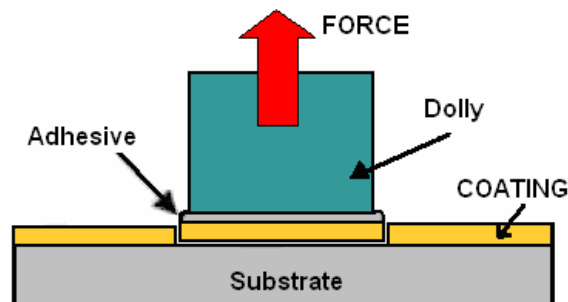
**1.2.2 Ensayos Cuantitativos.** Los ensayos de tipo cuantitativo operan aplicando a las probetas, una tensión bien sea por medios mecánicos, hidráulicos o neumáticos con la finalidad de desprender el recubrimiento de su sustrato. Para capas metálicas, poliméricas y cerámicas suelen usarse probetas circulares con un diámetro de 20 mm., mientras que para concreto y sus derivados se prefieren de 50mm.

A continuación serán descritos los test mecánicos de mayor uso en las pruebas de adhesión, cada uno con sus ventajas, desventajas y aplicaciones correspondientes, dichos ensayos son:

a) Ensayo tensil o **Pull-Off Test**: Una fuerza es aplicada perpendicular a la interfase depósito-sustrato, y la cantidad de fuerza/área necesaria para romper esa interfase es la medida del esfuerzo de adhesión (figura 2).

Los requerimientos para la buena ejecución del test tensil son: simetría a través de la interfase, ausencia de concentración local de esfuerzos, mínima deformación plástica, distribución de la tensión sobre toda la superficie y la tendencia para que la falla ocurra en la interfase (adhesiva) más que en el depósito o en el sustrato.

**Figura 2.** Ensayo tensil.



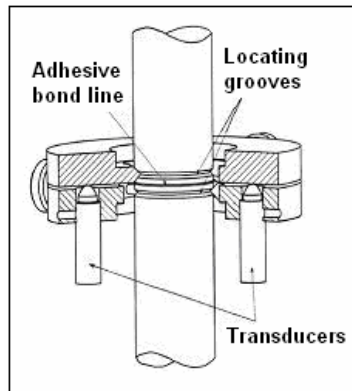
Fuente: **Review of Tests for Adhesion Strength, NPL Report MATC (A)**  
Diciembre 2001.

Para unir la superficie recubierta al dispositivo de tracción debe usarse soldadura, un nódulo electroformado o un agente adhesivo que posean una fuerza de adhesión mayor hacia el material de la superficie móvil que hacia el recubrimiento.

El adhesivo es el más empleado debido a que no afecta las propiedades del recubrimiento, sin embargo se debe verificar que su viscosidad sea lo suficientemente alta para no penetrar la superficie electrodepositada y que su temperatura de curado sea menor de 150 °C. La normalización de este método para la aplicación y desempeño de esta prueba está disponible en ASTM D4541, ASTM C633 e ISO 4624.

- b) Prueba de ensamble o **Tensile Butt Joint Test**: Es similar al ensayo tensil, este ensayo proporciona un valor de la fuerza bajo estados críticos de tensión. Aquí, dos varas o barras de igual sección transversal se unen mediante adhesivo, en las juntas inicio-fin, una de las cuales esta recubierta (figura 3); es de anotar, que en esta etapa la alineación debe ser excelente para garantizar que la tensión actúe sobre toda la superficie. Para garantizar que las juntas encajen perfectamente, se emplean dispositivos de auto-alineación; sólo de esta forma se pueden proporcionar distribuciones de tensión muy uniformes que disminuyan la interpretación errónea en los resultados.

**Figura 3.** Prueba de ensamble



Fuente: **Review of Tests for Adhesion Strength, NPL Report MATC (A) February 2004**

- c) Prueba de **Jacquet o Pull-Out test**: Esta prueba evalúa la adherencia de muestras empotradas; un sistema lámina-barra de menor área que la recubierta se ubica sobre una muestra ya depositada y el conjunto se somete a una nueva electrodeposición hasta obtener un espesor de aproximadamente 305  $\mu\text{m}$ .

El sistema empotrado se traslada a otro lugar en donde se le aplica una fuerza perpendicular a fin de desprender la parte sobre-recubierta (305  $\mu\text{m}$ .), dicha fuerza se relaciona con la adhesión del metal depositado, expresándose la adhesión como la carga por unidad de espesor de metal adicional depositado.

En sistemas donde la fuerza de adhesión es bastante alta, la respuesta de la prueba es dominada por la deformación del metal depositado y la información sobre la fuerza de desprendimiento es difícil de interpretar sin un análisis complejo.

- d) Otras pruebas: Adicionales a las anteriores se encuentran los siguientes ensayos: Prueba de curvatura o **Bend Test**, Prueba de Ollard, Método del

rotor de alta velocidad o **High - Speed Rotor Test**, **Test** de Ultrasonido, entre otras.

### **1.3 GALVANOTECNIA**

Es un proceso electroquímico mediante el cual se deposita una capa fina de metal sobre una base generalmente metálica. Se persiguen principalmente tres objetivos al recubrir un sustrato: evitar la corrosión, mejorar las propiedades mecánicas, y hacer más atractivo el producto final.

Los metales que se utilizan normalmente en galvanotecnia son: cadmio, cromo, cobre, oro, níquel, plata, estaño, y aleaciones como el latón (conocido como dorado). Los productos más comunes de la galvanotecnia son las cuberterías plateadas, los accesorios cromados de automóvil, los recipientes de comida estañados y piezas pequeñas como botones, broches, prendedores, pasadores y otros.

Para realizar el recubrimiento de los sustratos con capas metálicas, existen básicamente dos formas o técnicas las cuales se definen dependiendo del tipo de corriente que se emplee en cada una de ellas, así: Electrodeposición por corriente directa (**DC**) y Electrodeposición por corriente alterna (**AC**), esta última se divide en corriente pulsante (**PC**) y corriente pulsante inversa (**PCR**); estas técnicas se detallan a continuación.

**1.3.1 Electrodeposición por corriente directa (DC).** En este proceso, el objeto que va a ser recubierto se coloca en una disolución (baño), de una sal del metal a ser depositado, la cual se coloca en contacto con el electrodo negativo de

una fuente eléctrica externa, en tanto que otro conductor que puede ser del mismo metal que compone la sal (soluble) o de otro metal (insoluble), se conecta al electrodo positivo de la fuente.

Para el proceso se necesita una corriente continua proporcionada por una fuente de bajo voltaje, normalmente de 1 a 6 v. Cuando se pasa la corriente a través de la disolución, los átomos del metal en solución forman iones positivos (pierden electrones) y son atraídos hacia el sustrato para depositarse allí (cátodo o electrodo negativo), los iones del metal ganan los electrones perdidos y vuelven a su forma metálica.

Los átomos metálicos son sustituidos en el baño por los del ánodo (electrodo positivo), si está compuesto por el mismo metal, si no es así, se sustituyen añadiendo al baño periódicamente la sal correspondiente. En cualquier caso, se mantiene un equilibrio entre el metal que sale y el metal que entra en la disolución hasta que el objeto está galvanizado.

Dentro de las variables más importantes a controlar están el pH, la temperatura del baño, el voltaje aplicado y la agitación dentro del sistema; logrando con esto, un espesor de capa depositada dependiente del tiempo ( $t$ ), de la cantidad de iones metálicos ( $\eta$ ), de la masa molar del metal ( $M$ ), la constante de Faraday ( $F$ ) que equivale a 96500 C, y de la densidad relativa de la corriente ( $I$ ); dicho espesor se determina por la ley de Faraday dada por la ecuación **(3)**

$$W = \frac{I \times t \times M}{\eta \times F} \quad (3)$$

A pesar de ser una técnica con más de 200 años de antigüedad, sigue presentando problemas tales como heterogeneidad del depósito en las zonas agudas, alta porosidad, uso de aditivos y diferencias en el acabado superficial;

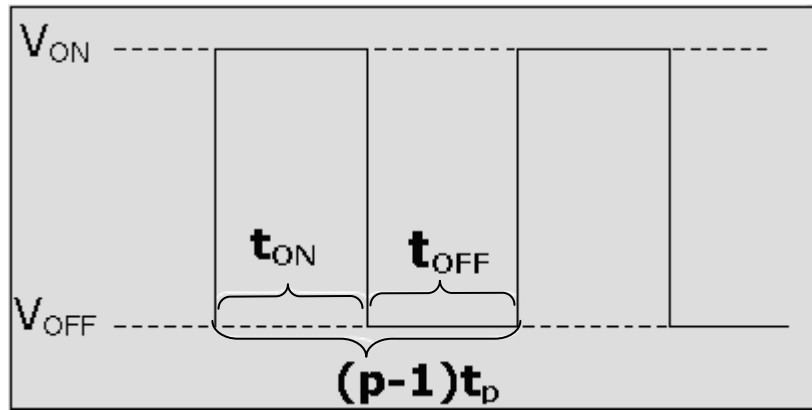
debido a los anteriores factores y a los avances en la electrónica, las empresas empiezan a optar por las técnicas de corriente alterna.

**1.3.2 Electrodeposición por corriente alterna (AC).** El proceso es básicamente el mismo, solo cambia el tipo de corriente aplicada, en este caso corriente alterna (**AC**). Con la **AC** se pueden obtener diferentes tipos de ondas (pulsos) a través de filtros y por ende se han podido desarrollar dos tipos de técnicas: corriente pulsante y corriente pulsante inversa. Para la técnica de corriente pulsante (**PC**), la corriente que se aplica al sistema es interrumpida por un periodo de tiempo específico; mediante este procedimiento se logra que el sustrato se recubra de manera intermitente, es decir, por pulsos.

El fundamento de la técnica de corriente pulsante inversa (**PCR**) es el cambio automático de la polaridad durante la electrodeposición del metal. La duración de la corriente inversa (catódica) es normalmente una pequeña fracción, 20% o menos, de la duración de la corriente en el sentido directo.

Los parámetros, mostrados en la figura 4, se tienen en cuenta para la deposición de metales por **PC** o por **PCR** son: tiempo catódico ( $t_{ON}$ ), tiempo anódico o de relajación ( $t_{OFF}$ ), voltaje de encendido ( $V_{ON}$ ) y voltaje de apagado ( $V_{OFF}$ ), además de los mencionados en la electrodeposición por corriente directa.

**Figura 4.** Parámetros de las técnicas de **PC** y **PCR**.



Fuente: Empresa Fantaxias Ltda.

Para elaborar recubrimientos por corriente alterna (**AC**) se debe establecer, como primera medida que el tiempo del pulso catódico sea inferior al del pulso anódico y así asegurar que ocurra el recubrimiento. El comportamiento electroquímico durante el pulso catódico es el mismo que se tiene en **DC**, es decir, depositar el metal sobre el sustrato; cuando se invierte la polaridad, el pulso anódico remueve parte del recubrimiento, luego otra vez se recubre por pulso catódico y así sucesivamente hasta terminar el tiempo de deposición establecido.

Lo que se logra con este método es depositar el metal por capas de muy poco espesor y con ello se logra mejorar las propiedades mecánicas del recubrimiento pues siendo el tamaño de grano mas fino, los depósitos son más uniformes, densos y compactos, además se incrementa, la ductilidad y la adherencia, y reduce el uso de aditivos orgánicos; también le da mejor apariencia externa y por ello elimina algunos tratamientos posteriores en los que se aplican agentes abrillantadores.

El proceso de recubrimiento por pulsos se usa ampliamente en la industria electrónica para la elaboración de circuitos impresos, sin embargo cuenta con

algunas desventajas, entre ellas; dificultad para controlar los tiempos anódico y catódico, costo de la fuente y el generador de pulsos.

## 1.4 TRATAMIENTOS PREVIOS

Teniendo en cuenta que los recubrimientos se basan en la adherencia con el sustrato, es fácil entender que cualquier material presente en la superficie del metal a recubrir tendrá influencia en el proceso. Para asegurar una cohesión estrecha entre el objeto a ser recubierto y el material a depositar, hay que limpiar el objeto a fondo; a esta limpieza se le conoce como tratamiento previo y en este, se establecen dos etapas básicas: desengrasado y decapado.

**1.4.1 Desengrasado.** Es el procedimiento general para limpiar las impurezas de tipo orgánico las cuales aparecen como residuos de los lubricantes empleados en las operaciones de conformado y tratamiento térmico, humectantes, pinturas, barnices y otros.

Los procesos de desengrase se clasifican en:

- **Pirogenación:** Se basa en la combustión de productos orgánicos, siendo ésta conseguida por llama directa sobre la superficie, inmersión directa en un baño de metal fundido o por proceso Sendzimir (se pasa por un horno de túnel con una zona oxidante y alta temperatura que volatiliza los residuos orgánicos y a la vez oxida la superficie; por último pasa por una zona reductora que elimina la capa oxidada).
- **Disolventes orgánicos:** Fundamentado en la solubilidad que presentan los productos grasos en disolventes como el tricloroetileno y el percloroetileno,

empleándose principalmente en piezas pequeñas por motivos económicos. Se clasifica según la fase del disolvente en fase vapor, fase líquida y fase mixta.

- Medios alcalinos: Si las grasas y aceites industriales son de origen animal, se emplean baños alcalinos para saponificar esos productos; la operación es discontinua y depende de factores como el efecto tensoactivo y el equilibrio entre esterificación y saponificación presente cuando el medio alcalino no es lo suficientemente fuerte.

**1.4.2 Decapado.** Es el proceso mediante el cual se eliminan los óxidos metálicos, hidróxidos y carburos formados en tratamientos térmicos y mecánicos; el decapado se puede efectuar por medios químicos o mecánicos.

- Decapado Químico: Se emplean agentes removedores tales como disoluciones acuosas, sales fundidas o atmósferas reductoras. Para el caso de las disoluciones, el proceso se lleva a cabo en medios ácidos, básicos y por decapado electroquímico (anódico o catódico) mientras que para las sales fundidas se emplean procedimientos oxidantes, reductores o electroquímicos.
- Decapado Mecánico: El óxido es eliminado por medios mecánicos sin requerimiento de un desengrase previo; se distinguen: el Granallado (limpieza por chorro de perdigones), el Arenado (limpieza en frío por el paso veloz de partículas de abrasivo) y la limpieza por ultrasonido.

## 2. NORMAS PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO TENSIL

En la automatización de equipos para laboratorio, se hace necesario tener presente las normas internacionales que han sido elaboradas por grupos interdisciplinarios como **International Organization for Standardization ISO, The American Society for Testing and Materials ASTM, National Association of Corrosion Engineers NACE, American National Standards Institute ANSI**, entre otros, con la finalidad de estandarizar métodos y/o procedimientos para el diseño y la fabricación de estos, así como para evaluar el desempeño de materiales, y para determinar las condiciones y consideraciones necesarias para la realización de los ensayos.

El método por tracción en el cual se basó la fabricación del equipo desarrollado en la Escuela de Física de la UPTC<sup>1</sup>, se encuentra normalizado según UNIT 830-90 Determinación de la Fuerza de Arranque de Revestimientos por Medio del Uso de un Medidor de Adherencia Portátil; la misma, toma como documento base la norma ISO 4624-1978 **Pull-Off Test for Adhesion** y la norma ASTM D 4541 **Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers**, siendo esta última la más completa y específica.

Tomando como referencia para la automatización y modernización del equipo de tracción la norma ASTM D4541, en su actualización del año 2002, se describen a continuación los apartados más importantes de esta, ya que allí se dan las pautas a seguir en la realización de pruebas para determinar la fuerza de adherencia en recubrimientos, y de la misma manera, se indican las características de los equipos, accesorios e insumos empleados en el ensayo tensil.

---

<sup>1</sup> Trabajo de Grado “Implementación de una Metodología para Evaluar la Adhesión en Recubrimientos”.

## 2.1 DESCRIPCIÓN DEL TEST PULL-OFF

La evaluación de la adherencia en recubrimientos electrodepositados debe realizarse mediante el ensayo tensil o **test Pull-Off**, en este método, establecido para evaluar recubrimientos; es asegurado perpendicularmente un accesorio, denominado **dolly**, a la superficie del recubrimiento por medio de un adhesivo; luego del tiempo de curado del adhesivo, el conjunto **dolly**-probeta es ubicado en la máquina de tracción, en la cual se aplica gradualmente una tensión normal a la superficie del recubrimiento, monitoreándola hasta el momento en que ocurra un desprendimiento o hasta un valor específico de tensión; para el posterior análisis del valor de la fuerza de cohesión y del tipo de falla que pueda ocurrir, deben tenerse en cuenta los datos de carga máxima soportada, así como el área del recubrimiento expuesto a la prueba.

## 2.2 EQUIPO EMPLEADO.

El equipo utilizado para la evaluación de la adherencia se denomina medidor de adhesión por desprendimiento; este equipo debe ser capaz de aplicar una carga concéntrica al conjunto **dolly**-probeta ya sea a través de sistemas hidráulicos, neumáticos o mecánicos y cuantificar dicha carga, lo cual se logra al ubicar algún tipo de medidor de tensión como celdas de carga, dinamómetros, entre otros.

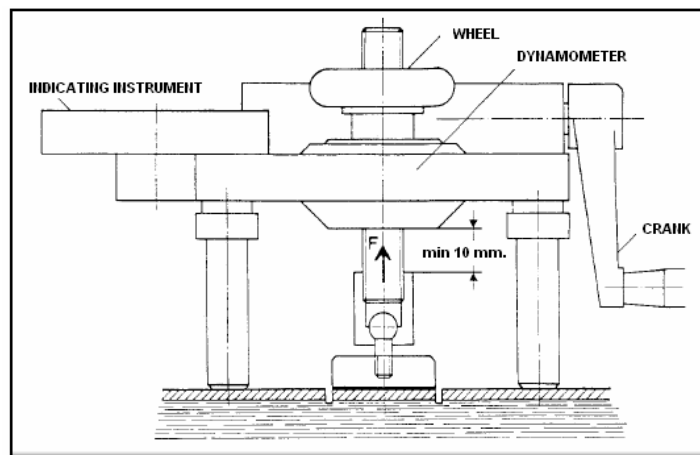
**2.2.1 Medidores.** Existen diversos tipos de **testers** o medidores para llevar a cabo el ensayo tensil, en cada uno de ellos es importante que el equipo permita el autoalineamiento de la muestra o probeta, para de esta forma garantizar que la tensión aplicada sea concéntrica.

La norma ASTM en mención, clasifica los instrumentos para medir la adhesión en cinco tipos, a continuación se generalizan las características de estos medidores.

- **Medidor Tipo I**

En este tipo de medidor se ubican **dollies** con un diámetro de 50 mm., los cuales se ajustan en el centro mediante cabezales esféricos, el medidor cuenta con una celda de carga, un dinamómetro y un manubrio mediante el cual se proporciona la carga a la muestra a través de un mecanismo giratorio. Están disponibles cuatro modelos de 5, 15, 25 y 50 kN como capacidad máxima de fuerza tensil aplicada, en la figura 5 se aprecia un bosquejo de este tipo de aparato.

**Figura 5.** Medidor Tipo I.



Fuente: **NACE Resource Library - Coating Instrument Series.**

- **Medidor Tipo II**

Para este segundo tipo de medidores, el diámetro del **dolly** empleado es de 20 mm. tiene una base en forma de cono, y una cabeza en forma de T mediante la cual se asegura al elemento que suministra la fuerza; el valor de la fuerza es

indicado mediante la lectura del desplazamiento máximo experimentado por el resorte que se encuentra en el interior del medidor.

En el comercio este tipo de medidor se encuentra disponible para cuatro rangos de fuerza máxima así: de 0 a 500, 0 a 1000, 0 a 2,000, y 0 a 4,000 psi (3.5, 7.0, 14, y 28 Mpa respectivamente); en la figura 6 se muestra un medidor de este tipo comercializado por la Empresa Elcometer bajo la referencia: modelo 106.

**Figura 6.** Medidor Tipo II Modelo 106



Fuente: [www.elcometer.com](http://www.elcometer.com)

- **Medidor Tipo III**

El medidor tipo III utiliza un pistón hidráulico para aplicar la carga al centro del **dolly**, el diámetro del pistón varía de acuerdo al área neta de este, de tal manera que la fuerza aplicada sea igual a la suministrada al pistón, la cual se transmite directamente a una galga de presión empleada para visualizar su valor numérico.

El rango de trabajo de los medidores tipo III va desde 0 hasta 20 MPa, como fuerza máxima proporcionada; en la figura 7 se presenta un medidor de este tipo.

**Figura 7. Medidor Tipo III**



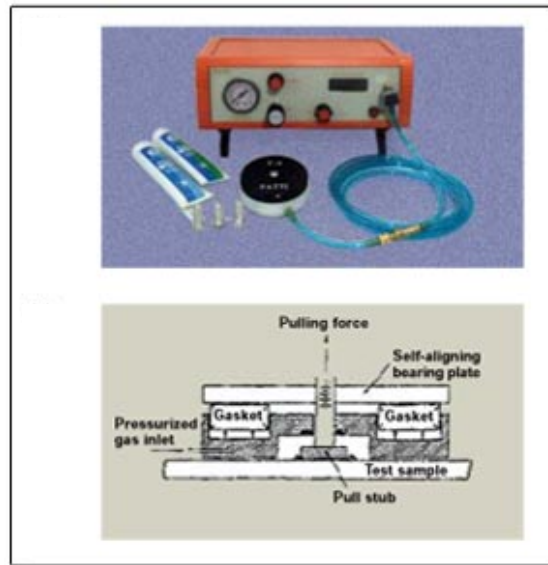
Fuente: **NACE Resource Library - Coating Instrument Series.**

- **Medidor Tipo IV**

Este aparato está compuesto por tres partes, la primera de estas es un **dolly** con una base cilíndrica plana con un diámetro de 12.5 mm., la base de este accesorio puede unirse al recubrimiento a ser evaluado; el segundo componente de este tipo de medidor es un elemento que permite que el **dolly** se enganche de tal forma que la fuerza proporcionada sea concéntrica. El tercer elemento es un gas presurizado que penetra a través de un manguera flexible, en la cámara donde se encuentra el conjunto dolly-probeta; esta manguera se conecta por su otro extremo a un controlador de presurización y a una galga de presión o sensor electrónico.

En la figura 8 se aprecia un modelo de un medidor tipo IV, al igual que los demás tipo de medidores, este se encuentra disponible en rangos estandarizados desde 0 a 3.5MPa y de 3.5MPa a 70 MPa formando seis grupos espaciados en múltiplos de dos; sin embargo, es permitido tener rangos de trabajo especiales.

**Figura 8.** Medidor Tipo IV



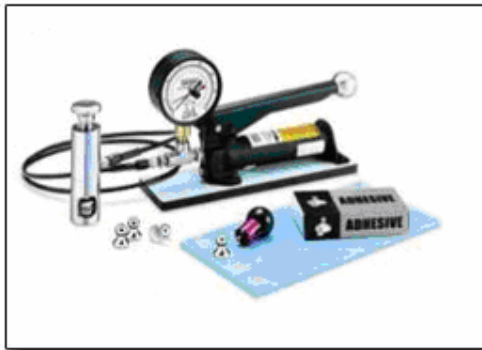
Fuente: **NACE Resource Library - Coating Instrument Series.**

- **Medidor Tipo V**

En el **tester** tipo V se tiene un **dolly** con un diámetro estándar de 20 mm. y cuya área es igual al área a evaluar, posee además una cabeza esférica que permite su autoalineamiento. Este tipo de medidor se emplea tanto para evaluar recubrimientos sobre metales como sobre concreto; además en casos especiales se permite usar en superficies curvadas y cuando se requiera aplicar elevadas presiones, empleando los accesorios adecuados para este fin.

La figura 9 presenta el tipo de medidor mencionado en este apartado así como los accesorios empleados en el mismo como **dollies** y adhesivo.

**Figura 9.** Medidor Tipo V



Fuente: **NACE Resource Library - Coating Instrument Series.**

Para la correcta realización del **test pull-off**, se tienen además del equipo para ensayos o **tester**, diversos accesorios e insumos para efectuar la sujeción de la muestra al **dolly**, y la limpieza correcta de las probetas.

**2.2.2 Dolly.** Es un accesorio metálico normalmente de aluminio, con una superficie lisa sobre la cual se aplica el adhesivo con el fin de afirmar la superficie recubierta para su posterior ubicación en el mecanismo que le proporciona la tensión, en la figura 10 se muestran algunos **dollies** utilizados en ensayos **pull-off**.

**Figura 10.** Dollies utilizados en los ensayos **Pull-Off**.



Fuente: **DeFelsko, Inc.**

**2.2.3 Probeta.** Es el elemento sobre el cual se hace la electrodeposición del recubrimiento, su material de construcción debe ser el mismo material que se va a ser evaluado, es decir este es el sustrato a ensayar, además, debe cumplir con la característica de tener un lado plano cuyo diámetro es igual al del **dolly**, para que el ajuste con el mecanismo que proporciona la fuerza sea el correcto.

**2.2.4 Adhesivo.** Es un insumo muy importante, ya que de este depende la fijación del **dolly** al recubrimiento de la probeta sin afectar sus propiedades físicas (resistencia a la tracción, porosidad, rugosidad, etc.).

Los adhesivos recomendados son los de tipo epóxico de dos componentes y los de tipo acrílico, teniendo presente que la fuerza de adherencia del adhesivo, suministrada por el fabricante, debe ser mayor a la mínima fuerza requerida para romper el esfuerzo adhesivo o cohesivo del recubrimiento.

Además se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El adhesivo debe ser lo suficientemente viscoso para no penetrar el espesor del recubrimiento y mantener la consistencia entre las superficies adheridas.
- La temperatura de curado debe ser tal que no afecte la composición y/o propiedades del recubrimiento.
- No debe reaccionar químicamente con la capa depositada o con el material del cual está hecho el **dolly**.

**2.2.5 Solventes y Lijas.** Se usan para lograr la limpieza de las probetas y eliminar el exceso de adhesivo en el **dolly**, además de: óxidos, huellas y otros contaminantes; en lo que respecta a la lija, es recomendable usar una lija de grano muy fino (800) para no introducir imperfecciones o dejar residuos, así como para

limpiar el recubrimiento de manera que no se altere en su integridad por químicos o solventes agresivos.

### **2.3 PREPARACIÓN DEL TEST.**

El área seleccionada para la evaluación de la adherencia debe ser lo suficientemente lisa para permitir su alineamiento dentro del equipo, el espacio del sitio evaluado es básicamente el espacio necesario para la ubicación del **dolly**, y permitir su colocación en el sistema de sujeción.

Con la finalidad de evitar las fallas entre el adhesivo y el dolly se debe llevar a cabo un procedimiento de limpieza de las superficies en contacto, realizando desengrase y decapado de éstas empleando los métodos o procedimientos que se tengan a disposición, por costo o por tiempo (desengrase por disolventes orgánicos, decapado ultrasónico, granallado, decapado electroquímico, entre otros).

El adhesivo elegido para realizar la unión entre el **dolly** y la probeta debe ser preparado según las indicaciones del fabricante, ya que de su buena preparación y del tiempo de curado depende en gran parte que las superficies queden perfectamente adheridas, especialmente cuando se emplean pegamentos epóxicos de dos partes en los cuales se requiere que la mezcla sea homogénea.

Si se desea que la fuerza de adherencia no se vea afectada por microrupturas en el recubrimiento debe evitarse la realización de marcas alrededor de la superficie del **dolly**, ya que cada ruptura puede ocasionar fallas y disminuir el esfuerzo, además, las pruebas demarcadas constituyen otro tipo de **test**.

Para el análisis de resultados son necesarias a lo sumo tres réplicas para cada probeta; además, debido a que la rigidez del sustrato afecta el esfuerzo de adhesión, se hace necesario tener conocimiento de su espesor y de la composición del mismo, (zamac en este caso); así como de la temperatura en el momento de realizar las pruebas, y la humedad relativa del lugar, la cual es función principalmente de la presión atmosférica y la temperatura.

#### **2.4 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DEL TEST.**

Con lo descrito anteriormente, la norma ASTM D4541-02 incluye además el procedimiento a seguir para la realización del **Test Pull-Off**, en este apartado, el estándar hace especial énfasis en todos y cada uno de los pasos a tener en cuenta para lograr resultados correctos que proporcionen un análisis satisfactorio del valor de la fuerza de adhesión en los recubrimientos, así como de los factores que influyen en esta.

En primera instancia, se debe seleccionar correctamente el medidor de adhesión con un dispositivo de desprendimiento donde la fuerza o tensión que le aplique a la muestra, esté dentro del rango de valores de adhesión esperados para el recubrimiento.

Una vez se haya escogido el equipo a emplear, y teniendo el **dolly** adherido a la probeta se debe cumplir con las exigencias para ajuste del conjunto **dolly**-recubrimiento y asegurar el dispositivo que proporciona la carga al sistema, teniendo presente que no queden ángulos de inclinación es decir, quede totalmente recto.

Continuando con el procedimiento, se incrementa la fuerza lo más lentamente posible a una razón de menos de 150 psi/s (1 MPa/s), hasta que ocurra el desprendimiento del recubrimiento o hasta que se alcance el máximo esfuerzo permitido por el equipo a los 100 segundos o antes; realizado lo mencionado anteriormente, se registra la fuerza a la cual ocurrió la fractura (desprendimiento total), o la máxima fuerza aplicada y estas muestras se marcan y almacenan para realizar el análisis cualitativo de la falla.

Se hace importante reportar cualquier desvío del procedimiento como desalineamiento del **dolly**, fluctuaciones en la carga aplicada, entre otras; para luego en la interpretación de resultados, establecer factores que influyen en las lecturas que se obtuvieron.

## 2.5 CÁLCULO E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Para tener una correcta interpretación de los resultados, se hace necesario calcular los esfuerzos relativos aplicados a cada recubrimiento de acuerdo a la siguiente expresión:

$$X = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (4)$$

donde:  $X$  es el mayor esfuerzo aplicado durante el test [psi o MPa],  $F$  mayor fuerza aplicada sobre el sistema. [N] y  $d$  es el diámetro de la superficie evaluada. De manera adicional, para todas las muestras que desprendan se debe estimar el porcentaje de falla adhesiva o cohesiva de acuerdo con sus áreas y localización en el sistema compuesto por las capas de recubrimiento y adhesivo.

## 2.6 REPORTE DE DATOS.

Una vez realizadas las pruebas y la toma de datos, se debe hacer un reporte de algunos parámetros, para lo cual se procede a diseñar o elaborar una hoja de reporte donde queden consignados, en lo posible, los siguientes datos:

- Locación de realización del **test**, y persona que lo realiza.
- Una breve descripción de la naturaleza del **test** así como el laboratorio donde se evalúan las probetas, el tipo de recubrimiento, el tipo de sustrato.
- Aparato usado incluyendo modelo, constructor, tipo de carga aplicada, dimensiones.
- Identificación del sustrato: espesor, tipo, orientación.
- Tipo de adhesivo usado.
- Para los ensayos donde se desprenda o no el recubrimiento, registrar el esfuerzo aplicado; para los que fallan o desprenden deben reportarse los valores calculados mediante la ecuación **(4)**.

## 2.7 PRECISIÓN Y TENDENCIAS

Los parámetros de precisión y tendencias dependen de la exactitud en la medición de la fuerza, la alineación del dispositivo y de que se hayan realizado los debidos tratamientos de limpieza de las muestras y se haya asumido el cuidado en la preparación del adhesivo y la fijación del **dolly** a la probeta.

Debido a que no existían métodos para evaluar la fuerza de desprendimiento antes de la presentación de la norma ASTM, los tratamientos de precisión y tendencias pueden ser desarrollados de forma particular.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE TRACCIÓN

Una vez definidas las consideraciones a tener en cuenta para la ejecución del **Test Pull-Off** mediante el cual se realizó la evaluación de recubrimientos metálicos, en este capítulo se describe el equipo dispuesto para la automatización; este equipo se diseñó y elaboró en la Escuela de Física de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), como parte de un trabajo de grado<sup>2</sup> en el cual se desarrolló una metodología para evaluar la compatibilidad de adhesión del recubrimiento polimérico aplicado sobre lámina galvanizada.

Para realizar la automatización del equipo se hace necesario conocer la estructura metálica o armazón que sirvió como punto de partida, los accesorios diseñados para realizar ensayos de adhesión para recubrimientos electrodepositados teniendo presente la norma ASTM D4541<sup>3</sup> descrita en el capítulo anterior; asimismo, presentar la descripción de los dispositivos adquiridos para cumplir con el objetivo de obtener un equipo que proporcionara ensayos confiables, reproducibles y versátiles.

Con todo lo anterior, en este apartado, se hace además una detallada exposición de las características y teoría de funcionamiento de los transductores que se emplearon en la automatización del equipo así como del sistema de engranajes que este posee, el cual le brinda o suministra el movimiento a una plataforma móvil sobre la cual se monta la muestra a ensayar, es decir la probeta con el debido recubrimiento previamente depositado por cualquier técnica de galvanoplastia.

---

<sup>2</sup> Proyecto de Grado “IMPLEMENTACION DE UNA METODOLOGIA PARA EVALUAR LA ADHESION EN RECUBRIMIENTOS”

<sup>3</sup> Para más información consultar Anexo C.1

### 3.1 ESTRUCTURA INICIAL

El equipo de tracción desarrollado en la UPTC, estaba básicamente constituido por dos columnas cilíndricas de acero inoxidable, sobre las cuales se ubicaron dos plataformas del mismo material, estas plataformas se emplearon para proveer soporte mecánico a las muestras empleadas, con el fin de mantenerlas fijas para poder suministrar la fuerza mediante el desplazamiento de la otra plataforma, el cual se produce gracias al movimiento giratorio de los engranajes y tornillos sinfín ubicados en la parte inferior o base del equipo.

Un motor de corriente continua acoplado a una caja reductora de velocidad, proporcionaba un movimiento a un grupo de engranajes, brindando de esta forma un desplazamiento lineal con una velocidad lenta a una las plataformas, la que además aloja un transductor de fuerza, el cual se da a conocer en el siguiente inciso.

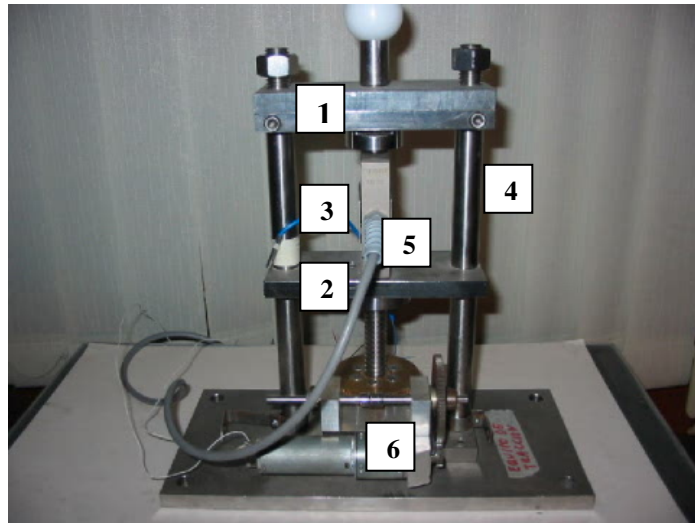
Además de los componentes mencionados, el equipo contaba con un detector de inductivo proximidad (DPI), para determinar el espacio recorrido por la plataforma móvil; todo esto acompañado del respectivo **hardware** con la finalidad de acondicionar las señales y transferirlas a un computador personal, para su tratamiento por **software**.

En la figura11 se presenta una fotografía el equipo tomado como base para la automatización, la cual fue suministrada por el GSEC<sup>4</sup>, de la Escuela de Física de la UPTC, ya que fue allí donde se realizó su diseño e implementación.

---

<sup>4</sup> Grupo de Superficies, Electroquímica y Corrosión de la Universidad Pedagógica de Colombia .Tunja

**Figura 11.** Estructura inicial del Equipo de Tracción.



Fuente: Grupo de Superficies, Electroquímica y Corrosión. Universidad Pedagógica de Colombia .Tunja

En la imagen puede apreciarse cada una de las partes descritas, así como el armazón o estructura física de la máquina de tracción; en la siguiente tabla se relacionan las partes marcadas en la figura con la parte correspondiente, para un mayor entendimiento de lo apreciado.

**Tabla 1.** Partes del equipo Inicial.

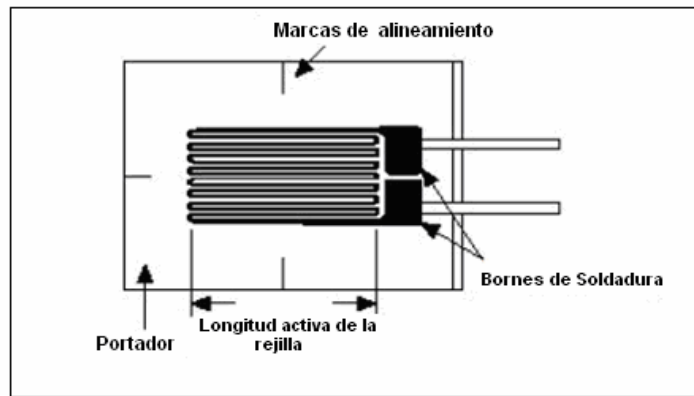
<b>Numeración</b>	<b>Elemento</b>
<b>1</b>	Plataforma Fija
<b>2</b>	Plataforma Móvil
<b>3</b>	Detector de Proximidad
<b>4</b>	Columnas Cilíndricas
<b>5</b>	Transductor de Fuerza
<b>6</b>	Motor y Engranajes

Fuente: El autor.



La galga extensiométrica consiste en un fino alambre u hoja metálica dispuesta en un patrón de rejilla (figura 13), este patrón de rejilla maximiza la cantidad de alambre metálico conforme a la tensión en la dirección paralela. La rejilla se enlaza a un forro fino, llamado portador, que se une directamente al espécimen de la prueba; por lo tanto, la tensión experimentada por el espécimen de la prueba se transfiere directamente a la galga extensiométrica, que responde con un cambio lineal en resistencia eléctrica.

**Figura 13.** Galga Extensiométrica.

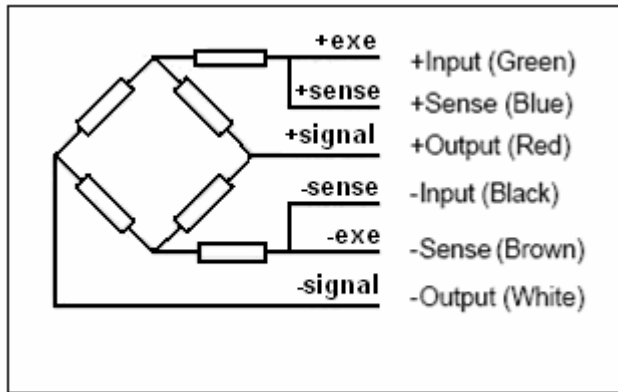


Fuente: B.A. Gregory, Instrumentación Eléctrica y Sistemas de Medida.

Un parámetro fundamental de la galga de tensión es su sensibilidad a la tensión, expresado cuantitativamente como el factor de galga (GF), para la celda empleada el factor de la galga es 2.

Para cuantificar cambios pequeños en resistencia, en las galgas de tensión se utiliza, como se mencionó, una configuración especial denominada puente de **Wheatstone**, con una fuente de excitación de voltaje que, en este caso es de 10VDC; la configuración de la celda se observa en la figura 14.

**Figura 14.** Configuración en puente de **Wheatstone**.



Fuente: Hoja de datos de la Celda de carga modelo 615.

Entre las características más importantes <sup>5</sup>de la celda modelo 615 con que cuenta el equipo de tracción, están:

- Impedancia de Salida 350  $\Omega$ .  $\pm 3$
- Capacidad máxima 500kg.
- Resistencia de aislamiento mayor a 2000 M $\Omega$ .
- Peso 0.7kg.
- Práctica en aplicaciones tanto de tensión como compresión.
- El efecto de la temperatura está compensado desde -10 hasta 40°C por medio de galgas fantasma.

**3.1.2 Detector de Proximidad tipo Inductivo.** El D.P.I permite señalar la presencia de un objeto cerca de su cara sensible. Se compone de un oscilador de alta frecuencia cuya bobina del circuito oscilante alojada en una ferrita magnética abierta por un lado, constituye la cara sensible.

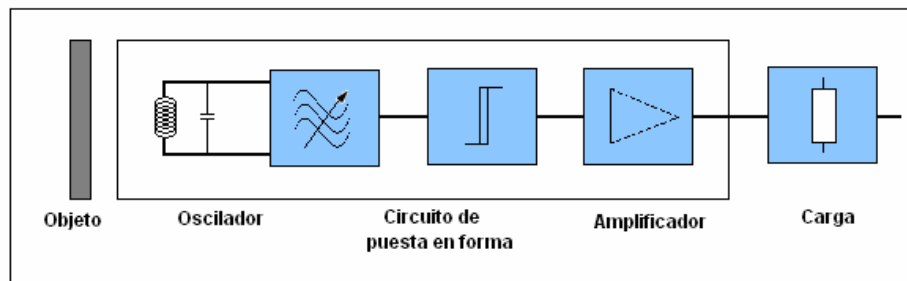
---

<sup>5</sup> Mayor información Anexo B.2

Delante de esta genera un campo magnético alterno, el cual al ser interrumpido por cualquier pieza metálica producirá corrientes de Foucault las cuales suministran la corriente de salida.

Desde el punto de vista funcional están constituidas por un circuito oscilador L-C con alta frecuencia de resonancia, la bobina está constituida sobre un núcleo de ferrita de forma que el flujo se cierra en la parte frontal. La presencia de metal dentro de la zona sensible altera la reluctancia del circuito magnético, atenúa el circuito oscilante y hace variar la amplitud de oscilación. La detección de dicha amplitud permite obtener una señal proporcional al desplazamiento, en la figura 15 se aprecian las partes constitutivas del mencionado transductor.

**Figura 15.** Estructura interna del detector de proximidad.



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

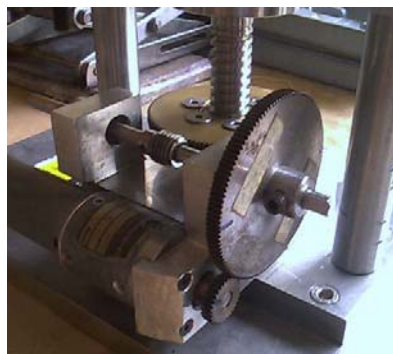
Cabe señalar que este componente o dispositivo no estaba presente en el momento de la iniciación de este proyecto, ya que parte del equipo se dismanteló, es decir estaba en desuso y por ende se hizo necesario la consecución de otro transductor de desplazamiento.

**3.1.3 Engranajes.** Con la finalidad de convertir el giro del motor en desplazamiento lineal de la plataforma que aloja a la celda de carga, se dispuso un tren de engranajes para cumplir con este objetivo, además para suministrar o aplicar la fuerza necesaria a las muestras para desarrollar el **test**.

El principal componente encargado de aumentar el torque del motor y reducir la velocidad es una caja reductora de la que no hay mayores detalles pues está cerrada y no posee placa de datos, acoplada al eje saliente de esta caja se encuentra un engranaje o rueda dentada con un radio de 16 mm. y 30 dientes, este transmite el movimiento a otro engranaje de 124 dientes y 62 mm. de radio; justo por el centro de este engranaje pasa una varilla con un diámetro de  $\frac{1}{4}$  de pulgada, la cual en su centro geométrico tiene un tornillo sinfín de 7 filetes el cual transmite el movimiento a otro engranaje de 120 dientes y 65 mm. de radio, conformando un engranaje de husillo con otra rueda dentada de 120 dientes.

Como elemento que transfiere el movimiento a la plataforma, se encuentra un tornillo sinfín el cual se ubica en el centro del último engranaje descrito en el párrafo anterior, completando con esto la conversión del movimiento giratorio del motor en desplazamiento lineal. A continuación, en la figura 16 se presenta una descripción grafica del tren de engranajes.

**Figura 16.** Tren de Engranajes del equipo.



Fuente: El autor.

Como comentario adicional, algunos de los engranajes poseen dientes defectuosos debido a un error humano cometido durante unas pruebas hechas en la ciudad de Tunja durante la experimentación con recubrimientos poliméricos,

como resultado de este defecto, las lecturas tanto de desplazamiento como de esfuerzo pueden verse afectadas.

**3.1.4 Motor.** El componente encargado de producir el movimiento de la plataforma móvil es un motor de corriente directa, que según datos suministrados por el GSEC, opera en un rango de 0-36 **volts** con una corriente máxima de 800mA, desafortunadamente no se poseen más datos del motor debido a que la placa está visiblemente deteriorada como se observa en la figura 17.

**Figura 17.** Placa del motor DC.



Fuente: El autor.

Como resultado de lo anterior, se hizo necesario determinar de forma empírica la velocidad del motor aplicándole 30 **volts**, ya que con esta tensión se obtiene una velocidad conveniente para realizar la prueba o ensayo **pull-off** mencionado anteriormente. Por tanto, al aplicar el voltaje en los terminales del motor se determinó en forma aproximada, que la velocidad del engranaje que tiene 124 dientes es de 30 rpm, por tanto se procede a calcular la velocidad según la ecuación **(5)**.

$$\frac{N_1}{\theta_2} = \frac{N_2}{\theta_1} \quad (5)$$

Donde  $N_1=30$ ,  $N_2=124$  y  $\theta_2=30$  rpm, entonces, despejando  $\theta_1$ , que es la velocidad del engranaje acoplado al eje saliente de la caja reductora, se halla que esta corresponde a 124 rpm.

### **3.2 ESTRUCTURA FINAL DEL EQUIPO.**

La estructura final del equipo, es decir la estructura que se empleó para la realización de las pruebas para recubrimientos metálicos, tiene algunas variaciones con respecto al equipo de tracción desarrollado en la UPTC.

Algunos de los cambios se realizaron al armazón o estructura metálica ya que las columnas fueron reemplazadas por unas con una longitud mayor y un diámetro de 1 pulgada, cuyas partes finales se encuentran roscadas con la finalidad de asegurar mediante tuercas una plataforma o cubierta superior, permitiendo de este modo que el equipo sea utilizado también en pruebas de tracción para alambres o microprobetas de aluminio u otro material dúctil, razón por la cual se construyeron los accesorios necesarios para tal fin.

**3.2.1 Plataforma Fija.** Otro de los cambios se realizó al reemplazar la plataforma fija, por una de menor espesor y con orificio en el centro para fijar el accesorio encargado de asegurar el conjunto **dolly**-probeta al equipo. Esta plataforma es afirmada a las columnas principales por medio de tornillos de 4mm. de diámetro dispuestos en orificios en la parte frontal de la plataforma como se observa en la figura 18.

**Figura 18.** Plataforma Fija.



Fuente: El autor.

**3.2.2 Accesorio para Fijación de Muestras.** Como se indicó en el inciso anterior existe un accesorio que permite asegurar el conjunto dolly-probeta a la plataforma fija, este elemento se construyó en los talleres de mecánica fina de la UIS sede Guatiguará y es básicamente un disco con una parte biselada y con un maquinado en forma circular en su interior para lograr el agarre de las muestras; en la siguiente figura se presenta este accesorio.

**Figura 19.** Accesorio para Fijación del conjunto **dolly**-probeta.



Fuente: El autor.

**3.2.3 Accesorio para el alineamiento de Muestras.** Para realizar las pruebas a los recubrimientos electrodepositados, se hizo necesario otro accesorio, el cual se enrosca sobre la celda de carga y está encargado de transferir la fuerza a la muestra y ofrecer el alineamiento a la misma, este accesorio, mostrado en la

figura 20, tiene una forma cilíndrica con dos lados biselados, un tornillo con una longitud de  $\frac{3}{4}$  de pulgada y un diámetro  $\frac{1}{2}$  pulgada el cual se ajusta en la cavidad roscada que posee la celda de carga en su parte superior; además el elemento mencionado posee el espacio suficiente para albergar la base del **dolly** y para asegurarlo.

**Figura 20.** Accesorio para alineamiento de la muestra.



Fuente: El autor.

**3.2.4 Accesorios para pruebas de tracción.** Como se mencionó, las columnas principales se reemplazaron por unas de mayor longitud con el fin de hacer pruebas de tracción, para lo cual también se desarrollaron 2 accesorios que permiten que estas pruebas puedan llevarse a cabo, convirtiendo al equipo en un equipo versátil y funcional; los accesorios mencionados tienen forma cilíndrica y en su base poseen un tornillo para poder ser enroscados tanto en la plataforma superior como en la celda de carga respectivamente, como se puede ver en la figura 21. Estos accesorios poseen individualmente, un maquinado en forma de surcos horizontales que permiten el agarre de las muestras para pruebas de tracción.

**Figura 21.** Accesorios para pruebas de tracción.



Fuente: El autor.

Por tanto, como puede apreciarse, el equipo posee accesorios intercambiables según el tipo de prueba a realizar.

**3.2.5. Transductor de desplazamiento.** En el inciso 3.1.2 se mencionó, que para cuantificar el desplazamiento de la plataforma móvil se empleó un detector de proximidad, en este caso, para medir el desplazamiento se empleó como transductor un potenciómetro lineal, que es esencialmente una resistencia variable en la que el contacto se realiza mediante un terminal móvil que se desplaza sobre película delgada de resistencia conocida la cual es excitada por un voltaje, entregando de esta manera un voltaje de salida proporcional al desplazamiento del terminal móvil.

Para obtener la medida de desplazamiento se adquirió el extensómetro o potenciómetro lineal de referencia LP802-50 de la empresa Omega<sup>6</sup> que posee entre otras características las siguientes:

---

<sup>6</sup> Mayor información Anexo B.3.

- Linealidad  $\pm 1\%$  FS.
- Resistencia nominal  $3000 \pm 20\%$  [ $\Omega$ ].
- Consumo de Potencia 0.75 watts/pulgada.
- Inductancia interna 0  $\mu$ H y capacitancia interna 0  $\mu$ F.
- Recorrido efectivo 50 mm.
- Sensibilidad incremental 0.00005 pulgadas.
- Histéresis  $\pm 0.025$ mm.

La figura 22 presenta una fotografía del transductor en mención, donde puede apreciarse el vástago o elemento móvil y el cuerpo junto a su conector para el cable blindado.

**Figura 22.** Transductor de Desplazamiento.



Fuente: El autor.

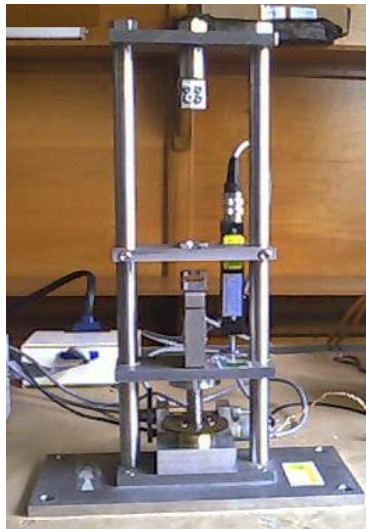
Para ubicarlo en el equipo, se hizo necesario asegurarlo a las dos plataformas para tener la lectura de desplazamiento, para esto, se recurrió a un gancho sujetador suministrado por el fabricante y a una base en cobre hecha por la empresa Fantaxias para afirmarlo a la plataforma móvil por medio de tornillos.

Además, para la lectura del desplazamiento, se diseñó el respectivo **hardware** con el fin de acondicionar la señal de voltaje y tratarla posteriormente en **software**, como se aprecia en los capítulos 4 y 5 respectivamente.

Tendiendo presente todo lo anterior, el equipo final, es decir con el que realizaron las pruebas de adherencia a los recubrimientos metálicos, es un equipo versátil, robusto y relativamente sencillo el cual queda a disposición del grupo de investigación de Biohidrometalurgia en sus laboratorios de la UIS sede Guatiguará.

Con el fin de observar la apariencia del equipo una vez realizada la adaptación de los nuevos accesorios y de los transductores, se presenta a continuación una fotografía del mismo.

**Figura 23.** Estructura final del Equipo.



Fuente: El autor.

En la figura 23 presentada con anterioridad, puede apreciarse la ubicación de los transductores de desplazamiento y de fuerza, así como la posición de las plataformas, y las diferentes partes constructivas del equipo de tracción.

También puede observarse en la parte superior de la misma figura, uno de los elementos para ensayos de tracción el cual hace parte de los accesorios descritos

en el inciso 3.2.4; la ubicación de este accesorio, no afecta la realización de las pruebas en recubrimientos metálicos, ya que las muestras para este tipo de ensayos se ubican entre la plataforma fija y la móvil empleando los elementos mencionados con anticipación en los incisos 3.2.2 y 3.2.3 los cuales son mostrados en las figuras 19 y 20.

## 4. HARDWARE EMPLEADO EN LA AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO

La necesidad de medir o cuantificar los fenómenos físicos ha creado en la humanidad la destreza para crear instrumentos o dispositivos capaces de convertir las variables físicas en otro tipo de variables las cuales puede acondicionar, procesar y analizar; para tener un control total o parcial de un proceso.

El término transductor suele usarse para designar un elemento capaz de convertir un tipo de energía en otra, es decir presenta la particularidad de responder a un estímulo de características físicas determinadas.

Por todo lo anterior, en este capítulo se describe la forma de adquirir y procesar las variables implicadas en el desarrollo de los ensayos **pull-off** (fuerza, desplazamiento, temperatura), de la misma forma en que se detallan: la tarjeta de adquisición de datos usada y los circuitos electrónicos empleados para acondicionar las señales provenientes de la celda de carga y el extensómetro usado para medir desplazamiento, y para realizar el control de la velocidad del motor el cual es un factor determinante en la evaluación de los recubrimientos metálicos.

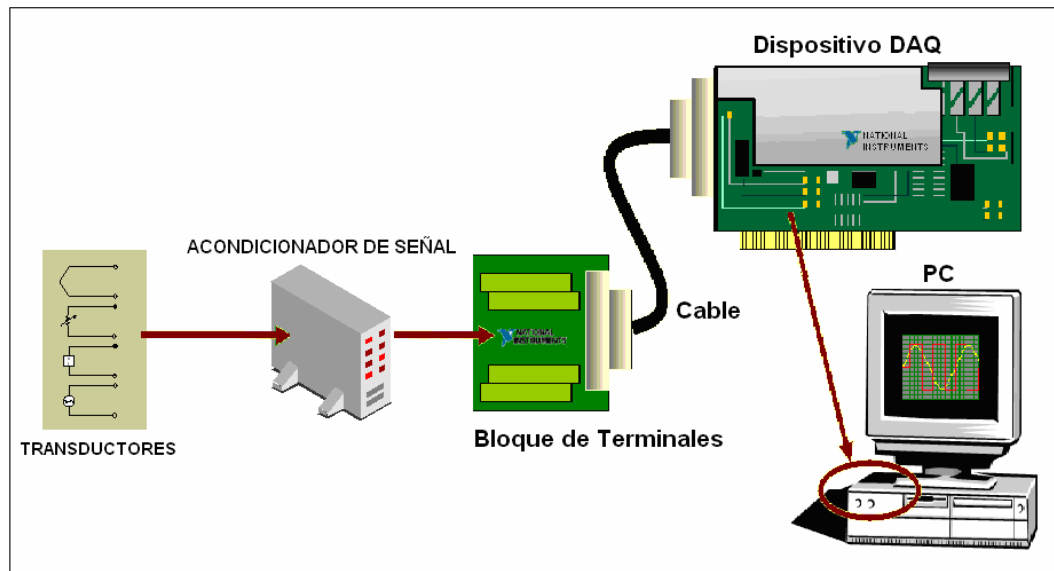
### 4.1 TARJETA NI-DAQ6221mx

La adquisición de los datos provenientes de los transductores ubicados en el equipo, para su posterior procesamiento mediante **software**, se realizó por medio

del bus PCI de un computador personal; el cual en esencia permite la transmisión de información entre el mundo real y el PC.

Una vez la señal proveniente de los sensores ha sido acondicionada, es llevada a las entradas de la tarjeta de adquisición de datos empleando los accesorios para este fin como son en este caso el bloque de terminales y el cable; se hace necesario mencionar que la tarjeta se aloja en el interior del PC. a través de un zócalo de expansión del mismo. La figura 24 es una representación gráfica de lo mencionado en las líneas anteriores.

**Figura 24.** Adquisición de datos por Computador



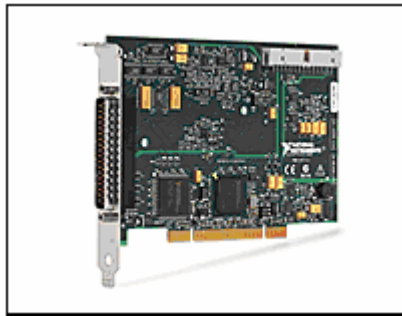
**Fuente:** El autor.

La tarjeta mencionada es comercializada por **National Instruments**, disponible bajo la referencia NI-DAQ6221mx<sup>7</sup>, posee una tasa de muestreo de 250000 muestras por segundo (250 kS/s) lo que la hace útil en la aplicación que se realizó. Es un dispositivo robusto con un conector de 68 pines a los que se accede por medio un bloque de terminales; alberga un multiplexor para seleccionar los

<sup>7</sup> Mayor información Ver Anexo B.1.

canales analógicos y el modo de funcionamiento de los 16 canales de entrada para variables analógicas, un conversor Analógico/Digital de 16 bits, un amplificador de instrumentación de ganancia programable (**PGIA** por sus siglas en inglés), además con 2 canales o salidas analógicas, 2 contadores de propósito general, 8 canales digitales para entrada y/o salida de datos, entre otros bloques funcionales. Una fotografía de este dispositivo se presenta en la figura 25.

**Figura 25.** Tarjeta NI-DAQ6221mx.



Fuente: <http://www.ni.com/pdf/products>

A continuación se describen algunos de los bloques nombrados debido a su uso para realizar la automatización del equipo de tracción; así como la numeración de los pines y el accesorio CB-68LP o bloque de terminales.

**4.1.1 Canales Analógicos de Entrada.** La tarjeta DAQ-6221mx consta, como se mencionó, de 16 líneas o puertos de entrada para un máximo de 16 canales analógicos. Cada una de estas líneas de entrada es configurable según tres modos de operación en la siguiente manera:

- Diferencial (**DIFF**): En esta configuración se usan un par de líneas de entrada para una señal diferencial. El modo diferencial debe utilizarse para señales pequeñas (<1volt) o señales degradadas por el ruido.

- **NRSE (Non Referenced Single-Ended)**: Para señales referenciadas a tierra es decir no flotantes, o también para señales que son grandes (>1volt), limpias de ruido, (si no es así, se prefiere la configuración diferencial).
- **RSE (Referenced Single-Ended)**: Empleada para adquisición de señales cuyo terminal de masa no está conectado a tierra, es decir para señales flotantes, entre la línea en cuestión y el pin de referencia marcado como **AIGND**.

Con todo anterior, se tendrían en total, 8 canales diferenciales o 16 canales unipolares. La notación dispuesta para las entradas analógicas está dada por **AI0...AI15**.

**4.1.2 Canales Analógicos de Salida.** También la DAQ-6221mx puede generar señales de salida, para tal fin tiene dos líneas de salida analógicas referenciadas como **AO (analog output)**, que corresponden a dos canales: DAC0OUT y DAC1OUT con dos conversores DAC, es muy importante tener presente que el rango del nivel de tensión de salida de los canales es [-10V,10V], el cual se actualiza ya sea por **software**, o bien por **hardware**, para el caso que compete a este trabajo de grado, se empleó la actualización por **software**<sup>8</sup>.

**4.1.3 Canales Digitales o Puertos Digitales.** Se tienen disponibles 8 pines para entradas/salidas digitales distribuidos desde DIO0 hasta DIO7 y referenciados al pin DGND, cada uno de estos ocho puertos se puede programar individualmente ya sea como entrada o como salida, debe tenerse especial cuidado ya que para su buen funcionamiento debe conectarse un resistor de **Pull-down**, es decir un resistor conectado entre la entrada o salida según corresponda

---

<sup>8</sup> Ver Capítulo 5.

y la referencia o tierra, el valor óhmico del resistor está entre 50kΩ y 75kΩ según la hoja de datos.

**4.1.4 Configuración de Pines.** La tarjeta con que se cuenta posee un conector de 68 pines que dan acceso a todos los puertos o canales, como son: las entradas y salidas tanto analógicas como digitales, los terminales de los contadores de propósito general, los puertos digitales y sus respectivas tierras (**DGND**), las referencias o tierras analógicas para cada canal (**AIGND**), pines de voltaje de referencia de 5 V. y la referencia o tierra general del dispositivo.

Como observación, se indica que el uso de cada pin posee un especial cuidado ya que cualquier error puede causar daños a la tarjeta aun cuando ésta cuenta con las debidas protecciones del caso como circuitos contra sobrevoltaje, temperaturas de operación elevadas entre otras.

Para el caso que compete a la automatización del equipo de tracción, a continuación se listan los pines usados con su numeración, su abreviatura y su respectivo significado.

**Tabla 2.** Pines usados de la tarjeta NI-DAQ6221mx.

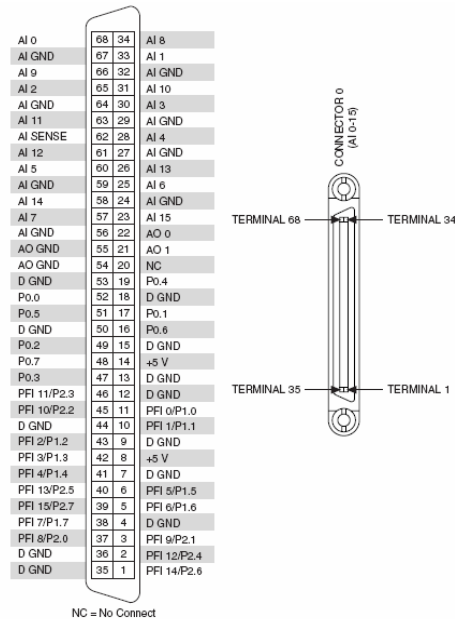
<b>Numeración</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
22	AO0	Salida Analógica 0
21	AO1	Salida Analógica 1
55	AO GND	Referencia para salida analógica 0
54	AO GND	Referencia para salida analógica 1
68	AI0	Entrada Analógica 0
67	AI GND	Referencia para entrada analógica 0
33	AI1	Entrada Analógica 1
32	AI GND	Referencia para entrada analógica 1

65	AI2	Entrada Analógica 2
64	AI GND	Referencia para entrada analógica 2
14	+5v	Fuente de +5V
13	D GND	Referencia para la fuente de +5V.
52	P0.0	Puerto digital 0
53	DGND	Referencia para puerto digital
17	P0.1	Puerto digital 1
18	DGND	Referencia para puerto digital

Fuente: El autor.

Para apreciar la distribución de los pines a lo largo del conector, se presenta la figura 26, obtenida de la hoja de datos suministrada por el fabricante en su página Web. (<http://www.ni.com/pdf/products>)

**Figura 26.** Configuración de pines de la tarjeta PCI.



Fuente: **National Instruments.**

El acceso a cada uno de estos pines y a otros que no son descritos en este texto, se da a través del conector CB-68LP, descrito en el inciso siguiente.

**4.1.5. Bloque de Terminales.** Un accesorio importante para la adquisición de datos por medio de la tarjeta es el bloque de terminales, debido a que con este elemento, es posible tener acceso a los diferentes canales o puertos de la tarjeta.

Para el caso de la NI-DAQ6221mx el bloque de terminales con que se cuenta es el de referencia CB-68LP (figura 27), suministrado por el fabricante al momento de la compra, este accesorio cuenta un conector para el cable saliente del PC., y una serie de conectores marcados con los números correspondientes a los pines de la tarjeta proporcionando el acceso a la misma para diferentes aplicaciones con tan solo introducir un cable y ajustarlo con el tornillo del conector.

**Figura 27.** Accesorio CB-68LP.



Fuente: [www.ni.com](http://www.ni.com)

A esta altura, es de mencionar que la tarjeta de adquisición de datos descrita, es propiedad del Grupo de Investigación de Minerales Biohidrometalurgia y Ambiente y es empleada además para control y monitoreo de la fuente generadora de pulsos mediante la cual se hacen los electrodepósitos que fueron objeto de prueba en esta tesis.

## 4.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

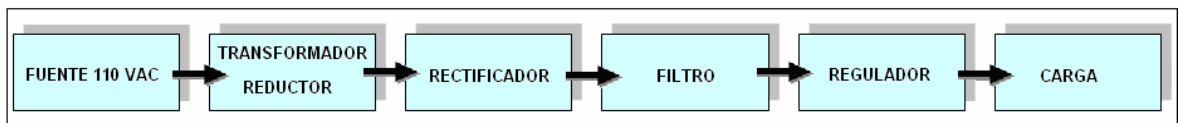
La fuente de alimentación es una parte importante de todo dispositivo electrónico, su finalidad, radica en proporcionar la conversión de potencia de una fuente de energía, generalmente la red pública de corriente alterna (AC) en la forma requerida por el dispositivo o sistema particular a proveer de voltaje.

En este caso la fuente de alimentación debe suministrar el voltaje a los componentes electrónicos (pasivos y activos), encargados de acondicionar las señales obtenidas de los transductores necesarios para la automatización del equipo de tracción, para tales efectos, se implementó una fuente dual que permite obtener un voltaje CD de  $\pm 15$  V. a partir de un abastecimiento de 110 VAC.

Las fuentes de alimentación, como todo circuito electrónico, deben diseñarse siguiendo ciertos parámetros que garanticen su correcto desempeño, por tal razón en este apartado se dan a conocer algunos parámetros de rendimiento de la fuente empleada.

**4.2.1 Fuente Empleada.** La fuente que se empleó para suministrar voltaje, tiene como estructura el diagrama presentado en la figura 28, el cual, como puede observarse posee 6 bloques funcionales, el primero de ellos hace referencia a la fuente primaria de energía en este caso la red de 110 VAC.

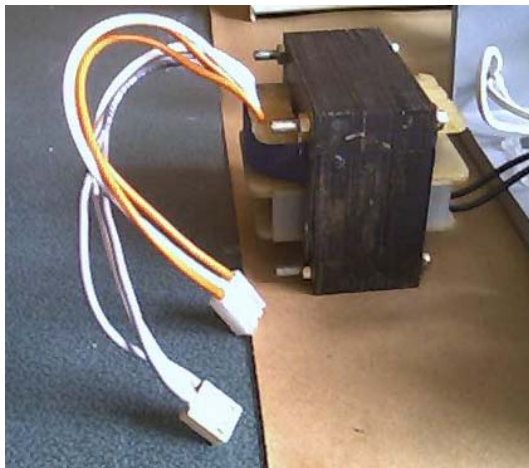
**Figura 28.** Estructura de la fuente empleada.



Fuente: El autor.

La tensión de la red se entrega al primario de un transformador con dos devanados secundarios con **tap** central (figura 29), cada uno de ellos proporciona 20VAC a un puente rectificador de onda completa con el fin de obtener un voltaje DC pulsante, el cual a su vez se suministra a un filtro compuesto por condensadores de 2200 $\mu$ F/50V, obteniendo de esta manera un voltaje DC uniforme bipolar.

**Figura 29.** Transformador empleado en la fuente.



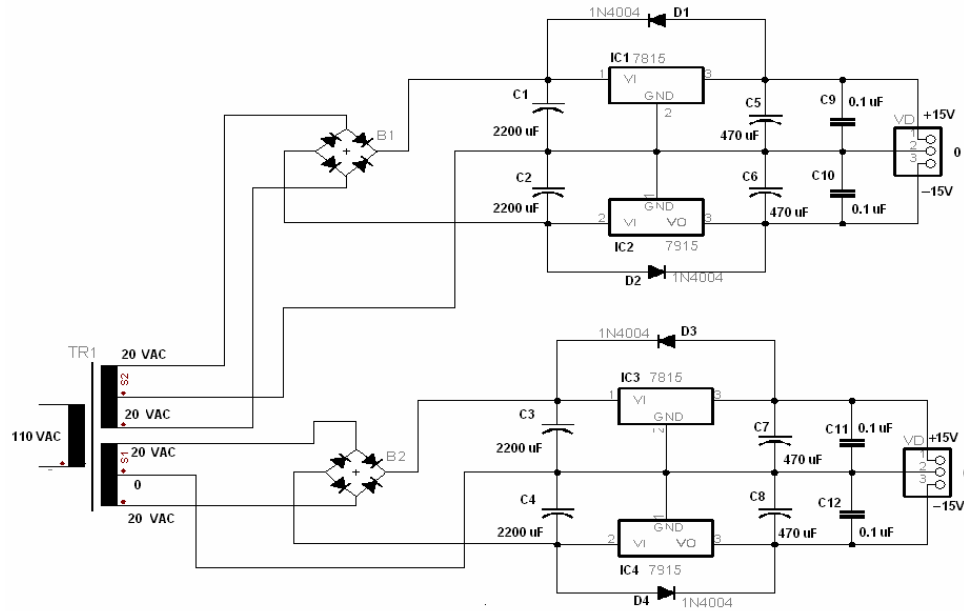
Fuente: El autor.

En el bloque definido como regulador, se tienen como elementos principales los reguladores monolíticos integrados de referencia LM7815 y LM7915 con sus respectivos disipadores de calor, los cuales se encargan de mantener estable la tensión que entrega la fuente ante los cambios que pueda presentar la corriente de carga.

Como resultado final a la salida del bloque 5, luego de filtrar la señal de salida a través de un capacitor de 0.1 $\mu$ F con el fin de mejorar la inmunidad al ruido, se obtiene una fuente dual que proporciona una tensión fija de  $\pm 15$ V a la carga, la

cual se describe en apartados siguientes. En la figura 30, se proporciona el diagrama esquemático de la fuente, con las respectivas referencias de los componentes utilizados.

**Figura 30.** Diagrama esquemático de la Fuente dual.



Fuente: El autor.

**4.2.2 Parámetros de rendimiento.** Debido a que en la práctica no es posible obtener fuentes de voltaje ideales, las cuales deberían proporcionar voltajes de salida constantes, libres de rizado e insensibles a los cambios en el voltaje de entrada o a las variaciones en la corriente; se definen algunos parámetros para asegurar que el comportamiento de la fuente real se aproxime al de una ideal, tales como, el porcentaje de regulación en la carga y en la línea, voltaje de rizado, rechazo al rizado, entre otros.

- **Porcentaje de Regulación en la Carga.** Para evaluar el grado en que el comportamiento de la fuente real utilizada se aproxima a una fuente ideal, se

usa esta figura de mérito denominada porcentaje de regulación o simplemente regulación, la cual está definida por la ecuación (6):

$$\%REG = \left( \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \right) * 100 \quad (6)$$

Siendo  $V_{NL}$  y  $V_{FL}$  los valores del voltaje de salida sin carga y con carga respectivamente; tomando la lectura de estos valores para la fuente diseñada, se halló que el porcentaje de regulación es de 0.067%, el cual es un valor bueno, que indica que la fuente mantiene constante su voltaje de salida aun con la carga conectada.

- **Porcentaje de Regulación de Red o de Línea.** Denominado así ya que hace referencia a la variación en el voltaje regulado entregado a la carga para una variación en la tensión de la red, que en el caso de los reguladores de tensión negativa empleados, es de 5mV para un voltaje de entrada entre -30. y -17.5V. y para los reguladores de tensión positiva es de 37mV, para una tensión de entrada entre 17.5 y 30V.
- **Voltaje de rizado.** Es un parámetro que indica la idealidad de la fuente implementada, es decir cuan lejos está la fuente de ofrecer un voltaje **DC** constante; teniendo presente que este voltaje de rizo es originado por la carga y descarga de los condensadores este parámetro puede calcularse por medio de la expresión (7).

$$V_{rpp} = \frac{I_L}{2 * F * C} \quad (7)$$

Tomando las lecturas sobre el circuito, se calculó el  $V_{rpp}$ , dando como resultado un voltaje de rizado de 378mV, indicando que la fuente entrega un nivel de continua aceptable para la aplicación.

- **Rechazo al rizado.** Los reguladores de tensión empleados en la fuente de alimentación, proporcionan estabilidad en el voltaje de salida frente a una variación en el voltaje de entrada, esta estabilidad puede ser cuantificada por medio del parámetro llamado rechazo al rizado, dado por la expresión (8), mediante la cual es posible determinar el voltaje de rizo o rizado de la tensión de salida en el regulador teniendo en cuenta el valor del rechazo al rizado dado por el fabricante (70 dB. en este caso).

$$RR = \frac{V_{r(sal)}}{V_{r(en)}} \quad \text{o en dB} \rightarrow \quad RR' = 20 \log \left( \frac{V_{r(sal)}}{V_{r(en)}} \right) \quad (8)$$

De esta manera, conociendo el factor de rechazo al rizado, el voltaje de rizado calculado en el ítem anterior y despejando de la expresión (8) el valor del voltaje de rizo de salida se halla que este es de 119.534μV.

- **Resistencia de Salida:** La resistencia de salida de los reguladores de tensión empleados es de 19mΩ según se consultó en la hoja de datos de los dispositivos suministrada por el fabricante **National Semiconductor**.
- **Potencia disipada:** La potencia promedio disipada por cada uno de los reguladores puede calcularse empleando la expresión (9):

$$P_D = (V_{en} - V_{Reg}) * I_L \quad (9)$$

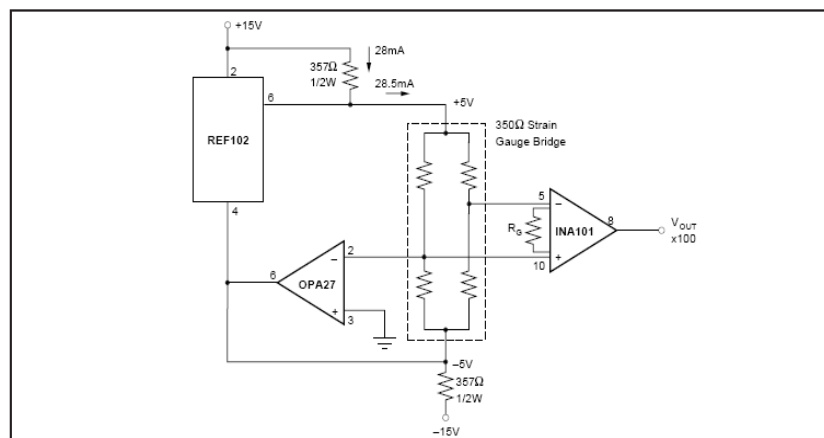
Encontrando, que para el LM7915 el voltaje de entrada es de -21.8V, el voltaje de salida -14.99V y la corriente en la carga es 100 mA., por tanto la potencia disipada es 681mW. y para el LM7815 es de 762.3mW, con una corriente de 110mA, voltaje de entrada 21.9V y voltaje de salida 14.97V.

### 4.3 EXCITACIÓN DE LA CELDA DE CARGA

Debido a que la celda de carga es básicamente un puente de **Wheastone**, es necesario excitar con un voltaje DC, el cual es proporcionado por una referencia de voltaje precisa de 10 V., (REF 102), especialmente diseñada para fines en que se hace necesario un amplificador de instrumentación, debido a que el nivel de tensión que se tiene en la salida es muy bajo, (menor a 10 mV).

El fabricante recomienda utilizar la configuración mostrada en la figura 31, donde se utilizan unos pocos componentes externos para otorgar el voltaje necesario para su correcto funcionamiento a un puente de galgas extensiométricas con una resistencia de  $350\Omega$ , como lo es la celda de carga usada en este caso.

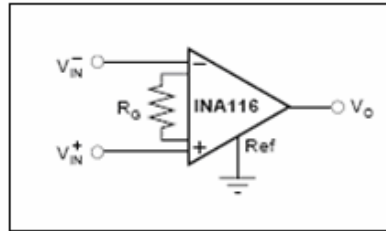
**Figura 31.** Circuito para excitación de la Celda de Carga.



Fuente: Hoja de datos de la referencia de voltaje REF102.

La ganancia de voltaje para el amplificador de instrumentación empleado, de referencia INA 116, fue de 100 V/V, ésta se obtuvo conectando un resistor de precisión con un valor de 511Ω entre los pines 1 y 16 de este circuito integrado, (figura 32).

**Figura 32.** Ubicación del resistor para la Ganancia del Amplificador.



Fuente: Hoja de datos del amplificador de instrumentación INA 116.

Esta ganancia se calculó de acuerdo a la ecuación **(10)**, donde el valor de  $R_G$  es el del resistor nombrado.

$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \quad (10)$$

El voltaje de salida del amplificador de instrumentación, se conecta a través de un cable plano a los pines 65 y 64 del accesorio CB-68LP descrito con anterioridad, los cuales pertenecen a terminales de la entrada analógica o canal físico **A12** en la tarjeta DAQ6221mx, luego por **software**, como se describirá en el capítulo 5, el valor de voltaje leído es procesado y usado en la aplicación elaborada.

Cabe mencionar que para la calibración o caracterización de la celda de carga<sup>9</sup>, se utiliza el circuito mencionado, con el fin obtener la ecuación característica del mismo.

---

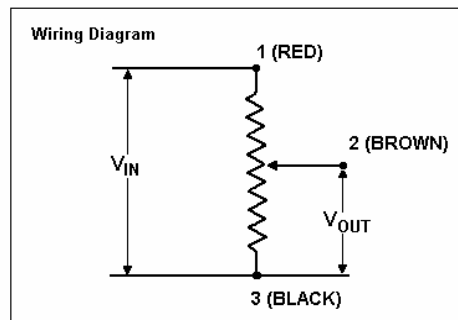
<sup>9</sup> Ver Capítulo 5 inciso 5.1.2

#### 4.4 CIRCUITO PARA EL MEDIDOR DE DESPLAZAMIENTO.

El medidor de desplazamiento, como se mencionó anteriormente, es un potenciómetro o resistencia variable por tanto la medida de desplazamiento será proporcional a un voltaje dependiente de la extensión del vástago o accesorio móvil, este voltaje tendrá su valor máximo o valor de excitación del potenciómetro cuando su extensión sea máxima y su valor mínimo se presentará con una elongación mínima.

Para la correcta conexión de los terminales del medidor, debe tenerse en cuenta que debido a la existencia de un voltaje de excitación, el voltaje de salida está presente entre el terminal acoplado a la parte móvil y un punto común, constituyendo así un divisor de voltaje con una resistencia total de  $3k\Omega$ , en este caso, y por ende el voltaje de salida depende del recorrido del vástago móvil y la excitación del transductor; para realizar las conexiones de este transductor se empleó el diagrama de conexiones (figura 33) dado por el fabricante.

**Figura 33.** Conexiones para el medidor de desplazamiento.



Fuente: Hoja de instrucciones del Potenciómetro Lineal LP802.

Para cumplir con los requisitos de voltaje de excitación, se implementó un circuito amplificador no inversor con una ganancia de 2 V/V mediante el circuito integrado OPA277P<sup>10</sup>, y sus componentes asociados, con la finalidad de entregar un voltaje relativamente bajo al medidor de desplazamiento básicamente para no sobrepasar el límite máximo de consumo de potencia suministrado por el fabricante y de esta manera dar un mayor tiempo de vida útil al dispositivo.

El voltaje de entrada al amplificador, proviene de una salida analógica de la tarjeta, cuyo valor se controla por **software**, por tal razón los terminales de las entradas inversora y no inversora del amplificador operacional se conectan a los pines del bloque de terminales marcados como 22 y 55, que corresponden a la salida analógica **A00**, y a través de estos, se entregan 5 V. al circuito, obteniendo 10 V. para energizar el potenciómetro.

Una vez se le ha proporcionado 10V al medidor, el voltaje de salida **V<sub>out</sub>**, se conecta a los terminales 33 y 32 del CB-68LP, los cuales son los pines de la entrada analógica **A11**, donde, a través del **software**, se procesa el valor adquirido, para realizar las diferentes gráficas que se necesitan para la determinación de la fuerza de adherencia.

En la figura 34, se muestra el diagrama esquemático del circuito realizado, donde se observa la configuración dada al amplificador operacional, y donde los puntos marcados como referencia y DAQ, hacen mención a la conexión desde y hacia la tarjeta respectivamente, además, se observa la ubicación de capacitores con un valor de 1 $\mu$ F entre las líneas de alimentación del circuito y la referencia con la finalidad de suprimir picos de voltaje que puedan presentarse en la operación del mismo.

---

<sup>10</sup> Mayor Información ver Anexo B.5.



## 4.5 CIRCUITO PARA EL MEDIDOR DE TEMPERATURA

Para tomar la lectura de la temperatura del lugar donde se realiza la prueba, se empleó como componente principal un circuito integrado de referencia LM35<sup>11</sup> de la empresa **National Semiconductor**. Este circuito integrado posee la particularidad de entregar un voltaje de salida proporcional a la temperatura a la cual se somete, dicha voltaje está calibrado en grados Celsius (°C), razón por la cual requiere pocos componentes externos como son: un amplificador operacional LF353 configurado como seguidor de voltaje, y un resistor para obtener un amplio rango de lectura, desde -55 hasta 150°C.

El valor óhmico del resistor se calcula de acuerdo a la siguiente expresión, suministrada por el fabricante en su hoja de datos:

$$R_1 = \frac{-V_s}{50\mu A} \quad (11)$$

Que para el caso, empleando una fuente de alimentación dual de ±15V se obtiene que  $R_1=300K\Omega$ .

El circuito general para el medidor de temperatura es sencillo, como puede observarse en la figura 35, donde además se aprecia que la salida del amplificador operacional es llevada a una entrada analógica de la DAQ6221mx, para realizar todo su tratamiento por medio de la interfaz gráfica implementada en **software**<sup>12</sup>.

---

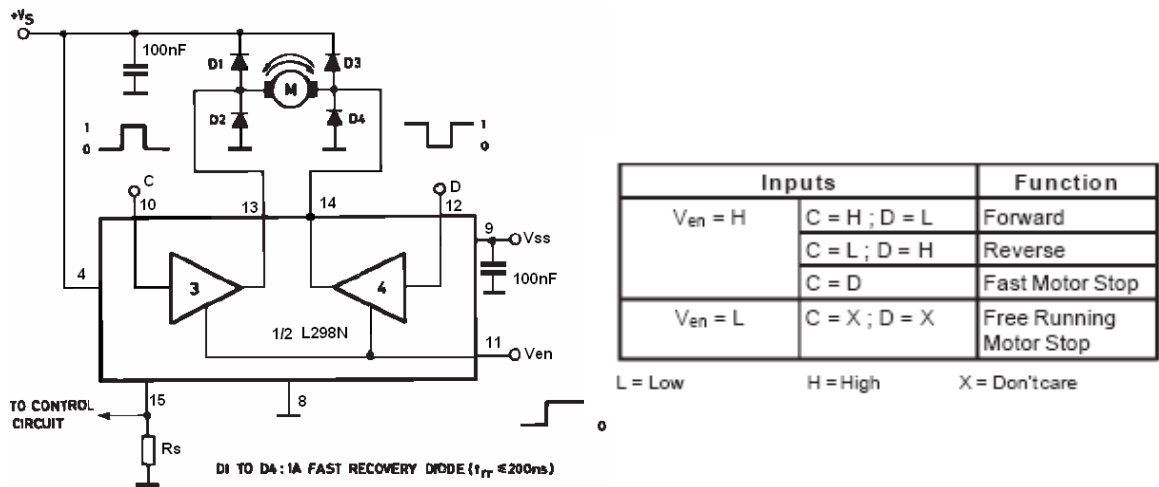
<sup>11</sup> Mayor Información Ver Anexo B.6

<sup>12</sup> Ver capítulo 5 inciso 5.1.3.



El componente mencionado es activado por medio de las salidas digitales con que cuenta la tarjeta, al enviar por estas un **bit** (1 o 0) a los pines 10 y 12 del puente H, con lo cual se logra sentido de giro dependiente de si el **bit** es alto o bajo, como se aprecia en la figura 36, el cual se obtuvo de la hoja de datos.

**Figura 36.** Diagrama de conexiones para el L298N



Fuente: Hoja de datos del puente H de referencia L298N.

El voltaje para mantener el pin 11 ( $V_{en}$ ) en estado alto, se suministra desde los pines de la tarjeta de adquisición de datos marcados como 14 y 13 correspondientes a la fuente de +5V provista en la tarjeta; de la misma manera, el voltaje para el terminal marcado como Vss del puente H es provisto a través de estos pines.

La fuente de alimentación para este circuito es de 30VDC, obtenidos a partir de una fuente regulada, para que mediante la conmutación de los transistores del puente H le sea suministrado este nivel de tensión al motor, con el fin de mantener la velocidad en 124 rpm y una velocidad de 1mm/min, es decir 0.0167 mm/s aproximadamente.

Los terminales del accesorio CB-68LP marcados con los números 52 y 17 que corresponden a los puertos digitales PO.0 y PO.1, se usan para proporcionar los **bits** necesarios para realizar la inversión de giro por medio del puente H, como se propone en la tabla suministrada por el fabricante del L298N.

## 5. SOFTWARE DISEÑADO E IMPLEMENTADO

El software de alto nivel desarrollado para la automatización del equipo de tracción detallado en el capítulo 3, fue realizado en el lenguaje gráfico **LabVIEW®** en su versión 7.1, del cual el Grupo de Biohidrometalurgia posee la licencia; este **software** realiza una completa integración entre el **hardware** implementado, y la tarjeta de adquisición de datos NI-DAQ 6221 de la serie mx, mencionados con anterioridad; con la finalidad de ofrecer una interfaz gráfica amigable y vistosa permitiendo al usuario un entendimiento del proceso, y brindando la posibilidad de interpretar datos, observar las variables esfuerzo y desplazamiento en forma gráfica e incluso monitorear en tiempo real la ejecución del **test pull-off**.

Para la calibración de los elementos que se utilizaron como transductores de desplazamiento, fuerza o carga y temperatura, se hizo también necesaria la implementación de un instrumento virtual (**VI** por sus siglas en inglés), con lo cual se obtuvo una solución a la fase del proyecto que estaba encaminada a la correcta presentación de los datos tomados sobre el equipo lo cual se logra con una buena calibración de los transductores.

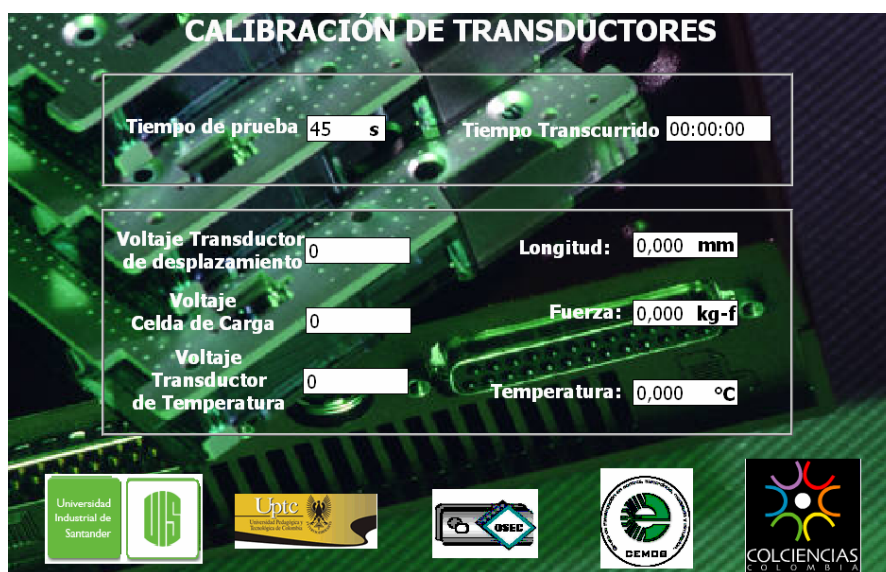
Cabe mencionar que mediante el lenguaje de programación gráfica empleado es posible crear instrumentos virtuales que permiten el control de procedimientos; así como adquisición, almacenamiento, análisis y reporte de datos, entre otras aplicaciones; permitiendo de esta manera tener un software altamente versátil y a la vez confiable, sin necesidad de tener líneas de código complejas, como sucedería con otros lenguajes.

## 5.1 CALIBRACIÓN DE TRANSDUCTORES

Para la lectura de las variables físicas implicadas en el proceso para determinación de la fuerza de adherencia, se tienen principalmente: la celda de carga, el potenciómetro lineal empleado como extensómetro y el sensor de temperatura; como se mencionó en el capítulo 4, para cada uno de ellos se hizo una toma de datos mediante el **Hardware** y un **VI** especial para obtener las curvas características de estos dispositivos, con la finalidad de incorporarlas al **VI** principal.

En la figura 37 se muestra el panel frontal del **VI**, que se realizó para la calibración de los transductores, y a continuación se procede a explicar el procedimiento seguido para la calibración de cada uno de estos.

**Figura 37.** Panel Frontal del **VI** para la calibración de transductores.



Fuente: El autor.

**5.1.1 Calibración del Extensómetro.** En la calibración del extensómetro se hizo uso de una salida analógica y una entrada analógica de la tarjeta, configurándolas por medio del asistente que se genera automáticamente cuando se ubica el icono de adquisición de datos a través de la tarjeta NI-DAQmx de referencia PCI 6221 en el diagrama de bloques del **VI**.

Para la salida analógica se aplicó un voltaje de 5 V. en el canal **AO0** con la finalidad de obtener un voltaje de excitación para el extensómetro de 10 V, por medio del amplificador operacional implementado en hardware con ganancia igual a 2; para luego adquirir en el canal o entrada analógica **AI1** el valor de voltaje resultante que se produce por el movimiento del vástago del extensómetro; de esta manera se obtuvieron los datos que se muestran a continuación, para su posterior análisis.

Para una extensión del vástago, es decir cuando el equipo aplica la carga al conjunto **dolly**-probeta se obtuvo la siguiente tabla de datos:

**Tabla 3.** Calibración del extensómetro.

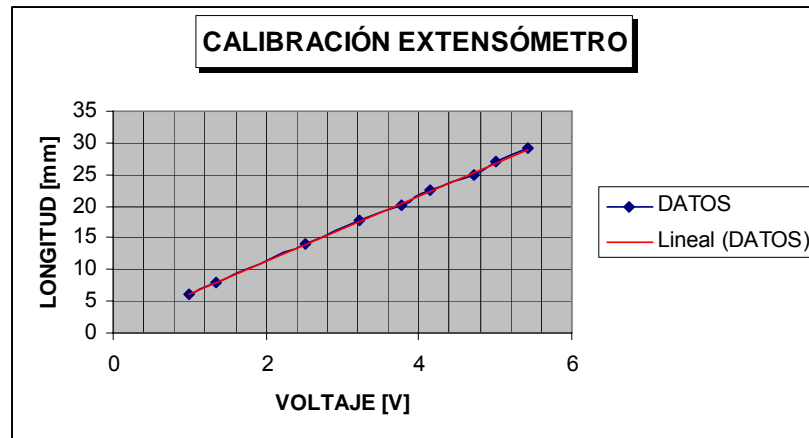
LONGITUD [mm.]	VOLTAJE EN HARDWARE [v]	VOLTAJE SEGÚN SOFTWARE [v]
6	0,99	0,993126
8	1,34	1,338427
14,1	2,52	2,5129
17,8	3,24	3,228058
20,07	3,77	3,764778
22,5	4,15	4,151159
25,05	4,72	4,72689
27	5	5,004854
29,1	5,43	5,425678

Fuente: El autor.

Para la calibración de este dispositivo se realizó una regresión lineal con los datos de voltaje y longitud, (x e y respectivamente), y tomando los valores del voltaje

obtenidos en **software**, ya que esta lectura proporciona un mayor número de cifras significativas y por ende una mayor precisión; con todo esto se obtuvo lo mostrado a continuación.

**Figura 38.** Regresión lineal para el extensómetro.



Fuente: El autor.

La expresión obtenida mediante la regresión lineal se presenta en la ecuación (12), con un coeficiente de correlación de 0.9993 lo que indica que los valores obtenidos tienen un comportamiento lineal, como se esperaba.

$$L = 5.1599v + 0.9886 \quad o \quad L = \frac{v + 0.1916}{0.1938} \quad (12)$$

Es de anotar, que las medidas de longitud y voltaje fueron tomadas con un pie de rey o calibrador y un multímetro marca Tektronix de referencia TEK DMM252 respectivamente.

**5.1.2 Calibración de la Celda de Carga.** En la calibración de este transductor se procedió de forma similar a la utilizada para el extensómetro; utilizando el **VI** mencionado anteriormente, con la diferencia de que en este caso no se hizo necesario suministrar voltaje de excitación a la celda de carga a través de un canal analógico de salida, debido a que el **hardware** desarrollado, el cual se presentó en el capítulo anterior<sup>14</sup>, suministra el voltaje de la salida del amplificador de instrumentación INA 116 directamente a una de las entradas analógicas de la tarjeta, en este caso la **AI2**, empleando lo anteriormente mencionado, se obtuvieron los datos que se presentan en la tabla 4.

**Tabla 4.** Calibración de la Celda de Carga.

<b>VOLTAJE EN VI [v]</b>	<b>PESO [kg]</b>
<b>0,00410871</b>	<b>1</b>
<b>0,00608672</b>	<b>1,5</b>
<b>0,00806472</b>	<b>2</b>
<b>0,01004272</b>	<b>2,5</b>
<b>0,01202073</b>	<b>3</b>
<b>0,01399873</b>	<b>3,5</b>
<b>0,01637234</b>	<b>4</b>
<b>0,01914155</b>	<b>4,5</b>
<b>0,02032835</b>	<b>5</b>
<b>0,02151515</b>	<b>5,5</b>
<b>0,02428436</b>	<b>6</b>
<b>0,02626236</b>	<b>6,5</b>
<b>0,02744917</b>	<b>7</b>
<b>0,03100957</b>	<b>7,5</b>
<b>0,03219638</b>	<b>8</b>

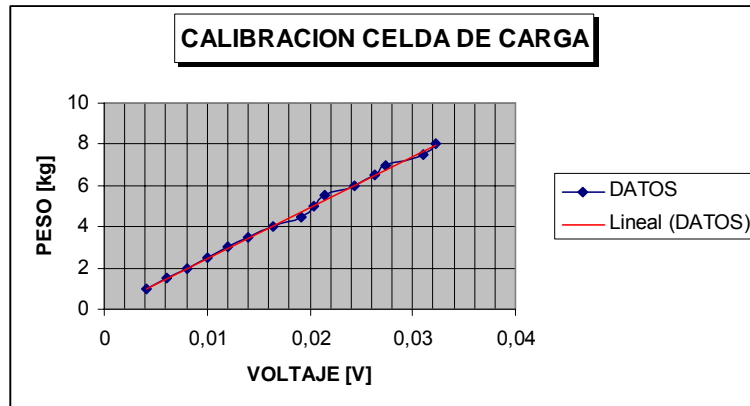
Fuente: El autor.

---

<sup>14</sup> Ver Capítulo 4 inciso 4.3

Una vez más, con los datos obtenidos se procedió a realizar una interpolación lineal, dando como resultado lo mostrado en la figura (39).

**Figura 39.** Regresión Lineal para la Celda de Carga.



Fuente: El autor.

La regresión lineal indica que el coeficiente de correlación es 0,9976, y que la expresión correspondiente es:

$$P = 252.78v - 0.0386 \quad (13)$$

Por tanto, esta expresión es la que será incluida en el **software** para proporcionar la lectura de la fuerza aplicada a la muestra durante la prueba.

**5.1.3 Calibración del Sensor de Temperatura.** Para tomar la lectura de temperatura se procedió a leer el voltaje presente en la entrada analógica A10 entre los pines 68 y 67 del bloque de terminales; con el voltaje se procede a convertir esta lectura en la temperatura, lo cual se logra con tan solo multiplicar el valor del voltaje presente en la entrada analógica por una constante (100), ya que según la hoja de datos del transductor de temperatura empleado, el LM35, éste

proporciona una tensión de salida dependiente de la temperatura según la siguiente tabla:

**Tabla 5.** Tensión de salida del LM35.

<b>Voltaje</b>	<b>Temperatura</b>
+1.50V	+150°C
+250mv	+25°C
-550mv	-55°C

Fuente: Hoja de datos del LM35.

Se realizó la comparación con el termómetro de referencia IKATRON ETS D3 disponible en el laboratorio de biohidrometalurgia, teniendo una lectura preliminar de 27°C y la lectura visualizada en la interfaz gráfica fue de 27.1°C, por tanto se asume que existe un error del 0.37% lo cual indica que el transductor empleado posee una excelente precisión.

## **5.2 INTERFAZ GRÁFICA**

Una vez se tienen las expresiones características de los diferentes dispositivos que se emplearon en la determinación de los parámetros necesarios para la ejecución del **test pull-off**, estas ecuaciones son llevadas al **VI** principal por medio de **subVIs**, para su utilización en el proceso para determinar la fuerza de adhesión.

El panel frontal del **VI** principal elaborado para automatizar el equipo mediante el cual se realiza el ensayo tensil, se muestra en la figura 40, este se desarrolló

teniendo presente, que el operario o persona que realiza el **test** obtenga una comprensión del proceso mediante una interfaz amigable.

**Figura 40.** Panel Frontal del VI implementado.



Fuente: El autor.

Como puede observarse, en el momento de iniciar la prueba le es solicitada cierta información al operario como: ciudad, diámetro del **dolly**, y un campo de comentarios donde se introducen algunas características del recubrimiento a ensayar según lo estime conveniente el usuario.

Los campos correspondientes a la fecha, la hora, la temperatura y la humedad relativa, se activan una vez el usuario pulse el botón con la leyenda “INICIAR” y estos datos se proporcionan automáticamente por medio del software, el cual toma las lecturas de estas variables o datos y los presenta en pantalla.

Estos y otros datos suministrados por el **software**, son reportados a un archivo en formato texto para el posterior análisis; análisis que hace parte del trabajo de

grado titulado: ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ADHERENCIA DE COBRE SOBRE ZAMAC Y NÍQUEL SOBRE COBRE DEPOSITADOS MEDIANTE LAS TÉCNICAS DE CORRIENTE DIRECTA Y CORRIENTE PULSANTE INVERSA<sup>15</sup>, realizado a la par con la ejecución de la automatización del equipo.

La interfaz gráfica, presenta además, varias ventanas que se van abriendo a medida que se ejecuta el **test**, con la finalidad de proporcionar una información detallada del proceso a la persona que hace los ensayos a las probetas, en el momento mismo en que se produce y permitir que se visualicen las respectivas gráficas. A continuación se describen todas y cada una de las ventanas con que cuenta el **VI** implementado.

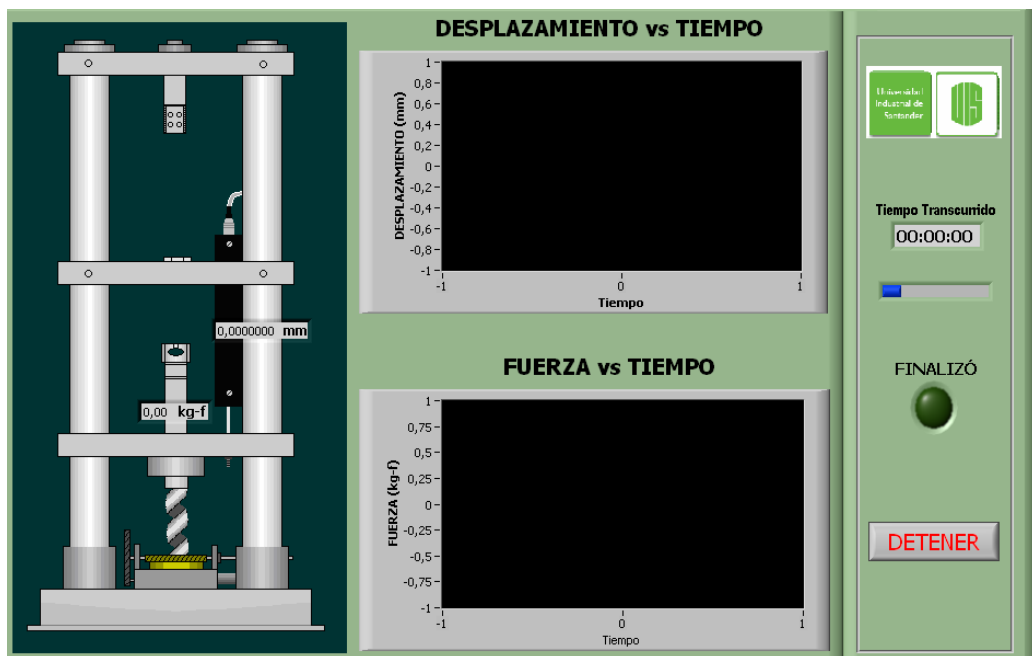
**5.2.1. Visualización del progreso de la Prueba.** Una vez se ha iniciado la prueba o ensayo tensil, se puede visualizar el progreso del mismo a través de una ventana donde se presentan las curvas de desplazamiento contra tiempo y de fuerza contra tiempo así como el tiempo de ejecución y una imagen del proceso, con la finalidad de entregar al usuario los datos en tiempo real, es decir en el momento en que se producen.

Lo anterior puede apreciarse en la figura 41, donde se observan las diferentes gráficas que son presentadas al usuario y la mencionada información.

---

<sup>15</sup>Autor: David Fernando Tirado Ariza, estudiante de Ingeniería Química de la UIS.

Figura 41. Visualización del progreso de la Prueba.



Fuente: El autor.

**5.2.2. Gráficas suministradas por el Software.** Luego de culminado el **test**, se despliegan dos ventanas en las cuales se visualización los resultados en tres tipos diferentes de gráficas, para proporcionar al usuario la información captada durante la prueba y poder obtener las primeras conclusiones acerca de la fuerza de adherencias de la muestra evaluada, por tanto, en estas últimas ventanas se muestran el valor del esfuerzo máximo alcanzado, el cual se calcula teniendo en cuenta la ecuación (4), la máxima deformación o desplazamiento logrados; y como un último parámetro o dato a ingresar, se permite al usuario reportar las observaciones finales pertinentes, las cuales también se almacenan en el archivo de salida.

Para tener una mejor concepción de lo descrito se publican las siguientes figuras, tomadas también de las pruebas preliminares hechas con el equipo.

Figura 42. Gráficas suministradas por el Software.



Fuente: El autor.

Como puede observarse las pantallas se muestran una seguida de la otra por medio de la acción del botón con la leyenda “SIGUIENTE”, además en una ventana de diálogo se da la libertad al usuario de guardar los datos.

### 5.3 SUBVIS IMPLEMENTADOS.

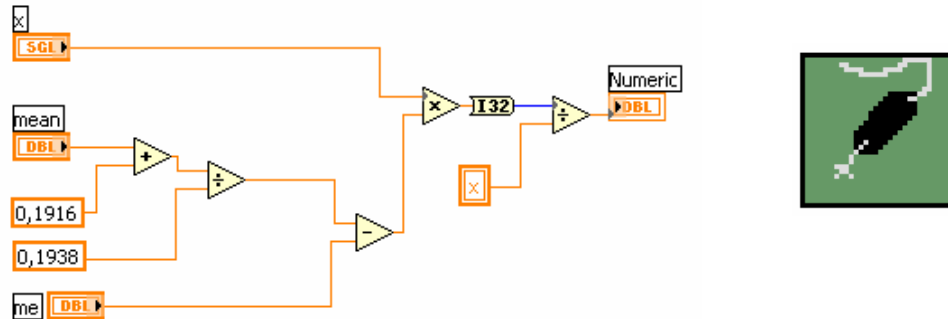
Como se mencionó en la calibración de los transductores, las ecuaciones características de estos son llevadas al **VI** principal por medio de **subVIs**, a continuación se presentan con su respectiva descripción.

Cabe mencionar, que un **subVI** es una subrutina que ha sido introducida en el **VI** principal para cumplir con tareas específicas y de alguna manera hacer más amena la presentación del diagrama de bloques de la aplicación.

Los diferentes **subVIs** implementados se presentan a continuación, dando a conocer la función para la cual fue empleado cada uno de ellos.

**5.3.1. SubVI para el Extensómetro.** En la figura 43 se muestra es **subVI** empleado para la lectura del desplazamiento obtenida por medio del extensómetro, este **subVI** recibe en su entrada el voltaje proveniente de la tarjeta de adquisición de datos y entrega en la salida la lectura de la longitud, por tanto, como es de esperarse, en el **subVI** se encuentra la ecuación característica del extensómetro.

Figura 43. SubVI para el extensómetro.

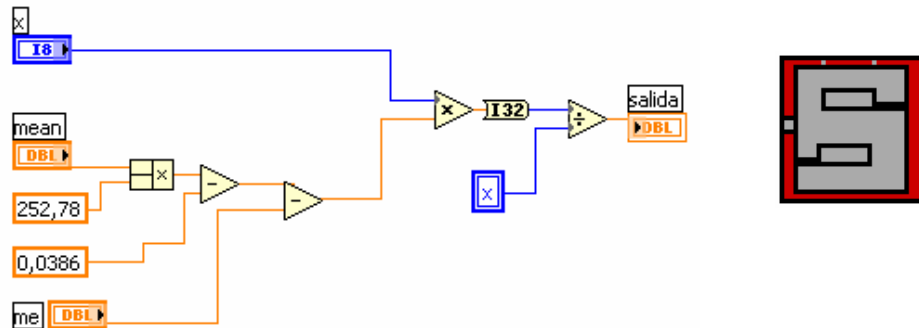


Fuente: El autor.

Los datos arrojados por este **subVI**, se emplean para crear las diferentes gráficas que se pueden apreciar en la interfaz gráfica, además estos valores de desplazamiento se reportan en el archivo de salida como se menciona más adelante.

**5.3.2. SubVI para la Celda de carga.** El voltaje presente en la celda de carga se procesa mediante **software** a través de este **subVI**, en el cual se tiene la ecuación hallada en el inciso 5.1.2, para que teniendo como entrada el voltaje, genere el valor de kg-f a los cuales equivale el valor de tensión presente en la entrada analógica **A12**.

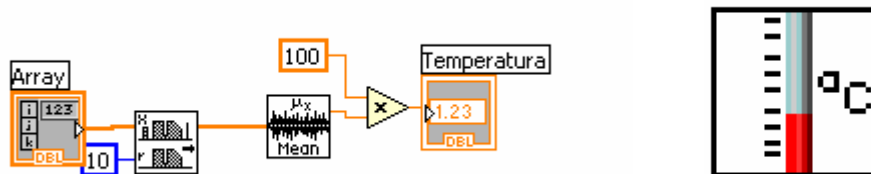
Figura 44. SubVI para la celda de carga.



Fuente: El autor.

**5.3.3. SubVI para la Lectura de temperatura.** Al igual que para los anteriores transductores, se realizó un subvi para la medición de temperatura, la cual se visualiza en la interfaz gráfica y además, se lleva al **subvi** para reporte de datos; el nivel de tensión presente en el canal o entrada analógica **A10**, posteriormente se multiplica por la constante nombrada en el inciso 5.1.3, para obtener de esta manera la lectura de temperatura del recinto o lugar donde se realiza el **test**.

Figura 45. SubVI para la lectura de temperatura.

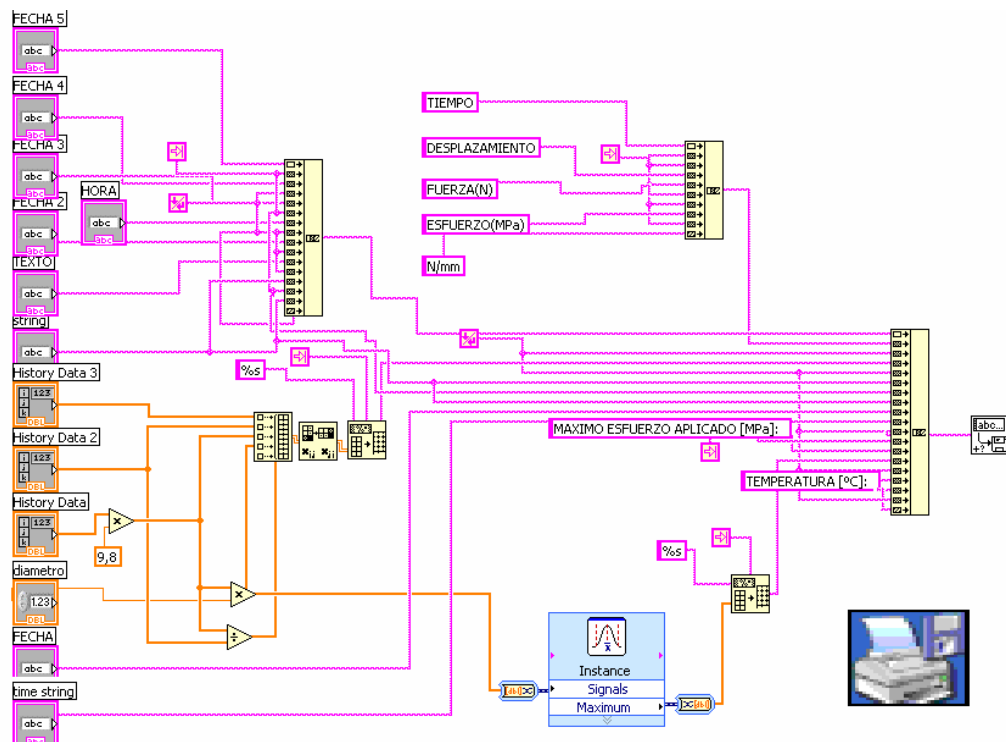


Fuente: El autor.

**5.3.4. SubVI para el Reporte de resultados.** Este subvi toma los resultados de la prueba los cuales se obtienen de los diferentes transductores, posteriormente, los empaqueta para formar un archivo compacto y organizado en el cual se encuentran los valores de desplazamiento, fuerza, esfuerzo, y tensión que se van presentando a medida que transcurre la prueba, además entrega la lectura del esfuerzo máximo alcanzado durante el **test**, calculado según la ecuación (4) del inciso 2.5.

Cabe mencionar que el archivo generado es un archivo en formato texto cuyo nombre puede ser dado por el operario o persona idónea que realiza las pruebas.

**Figura 46. SubVI para el reporte de resultados.**



Fuente: El autor.

## 6. PRUEBAS REALIZADAS CON EL EQUIPO DE TRACCIÓN

En este capítulo se presentan al lector, algunos resultados obtenidos con la automatización del equipo de tracción; aplicando el procedimiento para el **test pull-off** a recubrimientos metálicos de cobre y de níquel electrodepositados por varios métodos.

Antes de conocer los resultados que se obtuvieron es necesario conocer como se realizaron las primeras pruebas al equipo, así como la forma de realizar la introducción de las muestras en el equipo y su posterior sujeción con los accesorios para tal fin.

Por tanto, se presenta en este capítulo el pegamento empleado para obtener el desprendimiento de las capas recubiertas, de la misma manera en que se muestran apartes de los archivos generados por el **software** y algunas curvas o gráficas obtenidas para ciertas probetas.

### 6.1. TIPO DE DOLLY EMPLEADO.

En primera instancia se contaba con **dollies** con una superficie de contacto pequeña, como se observa en la parte superior de la figura 47, lo cual produjo que los recubrimientos no se desprendieran al momento de realizar el **test**, razón por la cual se hizo necesario aumentar el área de contacto aumentando el diámetro de los mismos, dando como resultado el tipo de **dolly** mostrado en la parte inferior de la figura 47.

**Figura 47. Dollies Empleados.**



Fuente: El autor.

## **6.2. PEGAMENTOS EMPLEADOS.**

Una vez superado el problema con el tipo de **dolly** a usar, se presentó el problema del principal insumo usado en las pruebas para determinar adherencia en recubrimientos metálicos: el pegamento, de cuyas características depende en gran parte el resultado satisfactorio de las pruebas, como ya se ha mencionado.

Inicialmente, se realizaron pruebas fallidas con el pegamento CA40 de 3M, ya que la fuerza de adherencia de este pegamento resultó ser menor que la fuerza de adherencia del recubrimiento. Por esta razón se hizo necesaria la búsqueda de un pegamento que brindara las características deseadas, encontrando, que con el pegamento epóxico de dos partes, disponible comercialmente bajo el nombre: Sintesolda; se lograba un desprendimiento de la capa recubierta, por lo menos para electrorecubrimientos por corriente directa hechos sobre sustratos de la aleación zamac.

En el lado izquierdo de la figura 48 se presenta el pegamento empleado inicialmente mientras en el lado derecho, se muestra una fotografía del pegamento epóxico de dos partes.

**Figura 48.** Pegamentos Empleados.



Fuente: El autor.

### **6.3. PROBETAS USADAS.**

En lo referente a las probetas que se usaron en las pruebas, es importante destacar que las mismas fueron elaboradas en un material denominado zamac, el cual es una aleación de zinc, aluminio y cobre, y sobre estas probetas se realizaron los recubrimientos de cobre y níquel.

Se destaca además, que para la obtención de las probetas con recubrimientos de níquel, se hace necesario hacer un primer recubrimiento de cobre para luego, sobre esta capa, depositar la capa de níquel; por tanto las probetas recubiertas con níquel poseen una mayor fuerza de adherencia lo que conlleva a emplear un pegamento con más fuerza adhesiva.

De la misma manera, se tiene el mismo procedimiento para recubrir las probetas de latón o dorado.

Por otro lado, en la parte central de la figura 49, se presenta una probeta de níquel, al lado izquierdo la de cobre y por último, al lado derecho de la figura, la probeta de latón, diferenciándolas también por su color.

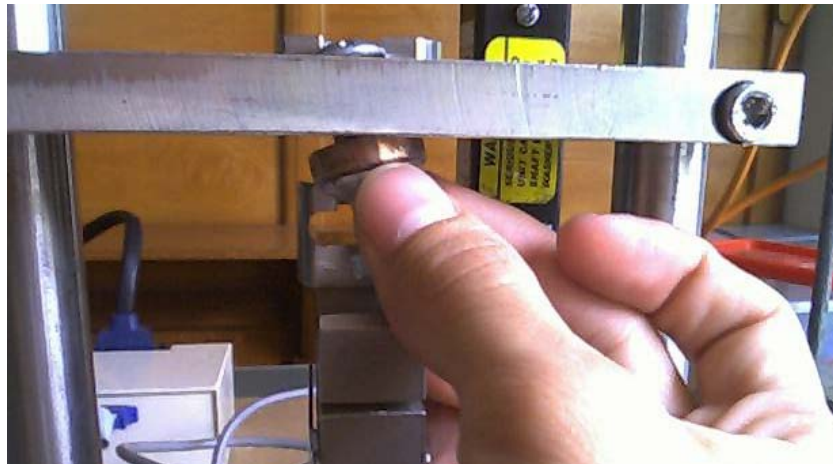
**Figura 49.** Probetas de Cobre, Níquel y Latón.



Fuente: El autor.

Con todo lo anterior, se procede a realizar las pruebas a recubrimientos sobre zamac, para lo cual, luego de realizar la labor de pegado del **dolly** junto a la probeta y esperar a cumplir el tiempo de curado del pegamento empleado, se introduce el conjunto **dolly**-probeta en el equipo de tal manera que el accesorio para sujeción ubicado en la plataforma fija, asegure en la parte superior a la muestra, y el accesorio ubicado en la celda de carga aloje en su cavidad la parte faltante de la muestra; teniendo presente, que en un principio quede libre de presión. Para ilustrar lo mencionado se proporciona la siguiente fotografía (figura 50).

**Figura 50.** Ubicación de la Muestra Bajo Prueba.



Fuente: El autor.

Realizado el procedimiento anterior, y teniendo todos los conectores y cables en sus respectivos lugares, se enciende el equipo donde se aloja el **hardware** y se corre la aplicación desarrollada en **LabVIEW®**, descrita en el capítulo 5.

Digitando los valores solicitados por el **software**, se continúa con el **test**, hasta la etapa final, la cual se da si se cumple cualquiera de tres condiciones, detectadas por la aplicación implementada, así:

- Hay desprendimiento, ya sea de pegamento o del recubrimiento.
- El tiempo de la prueba ha superado los 100 segundos sugeridos por la norma ASTM 4541 mencionada en el capítulo 2.
- Se pulsa el botón de parada de emergencia denominado “DETENER”.

#### 6.4 RESULTADOS OBTENIDOS.

En este punto, se presentan los resultados obtenidos para una probeta con sustrato de zamac y recubrimiento de cobre, electrodepositada mediante la técnica de corriente directa, y un tiempo de electrodeposición de 8 minutos, a la cual se le realizó el ensayo tensil adhiriéndola a un **dolly** de 18 mm. de diámetro.

Las figura 51 presenta fotografías de la muestra antes y después de la prueba, pudiéndose observar que hubo desprendimiento de la capa recubierta; así mismo, en la tabla 6 se da a conocer un fragmento del archivo de salida donde se puede apreciar, que el **software** proporciona las lecturas de tiempo, desplazamiento, fuerza, esfuerzo, y el valor de fuerza sobre desplazamiento a medida que avanza la prueba, además de la fuerza máxima alcanzada durante el **test**, y la temperatura del lugar.

**Figura 51.** Resultados para una Probeta con Recubrimiento de Cobre.



Fuente: El autor.

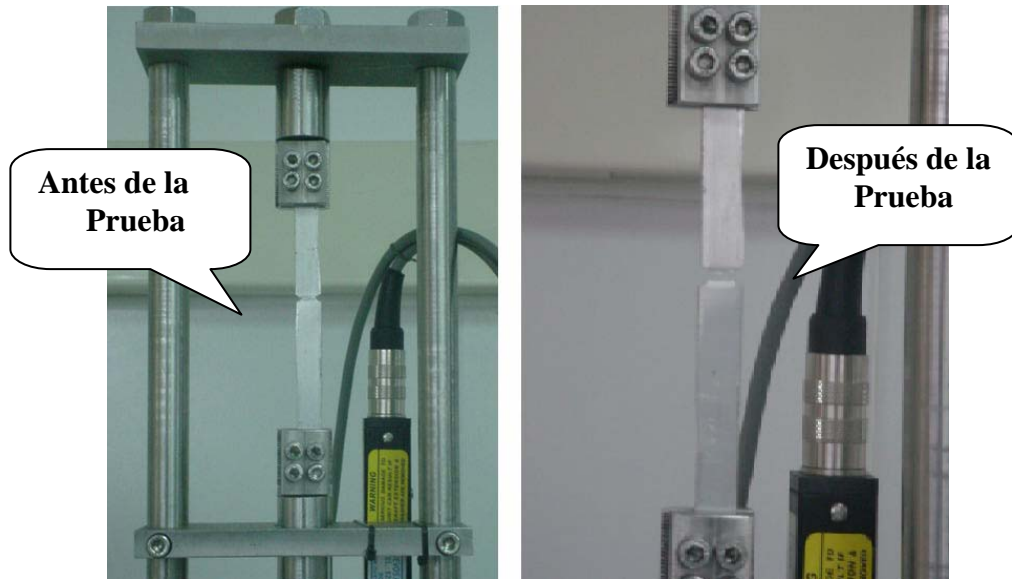
**Tabla 6.** Fragmento del archivo de salida para Prueba de Adherencia.

FECHA	jueves, 29 de septiembre de 2005			
HORA DE				
INICIO	14:50:33			
COMENTARIOS	CU 18mm 8min			
*****	*****			
TIEMPO	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA(N)	ESFUERZO(MPa)	N/mm
0	0,0054	2,8	0,08738	518,518505
0,517	0,0112	6,3	0,196604	562,50002
0,864	0,0167	10,5	0,327674	628,742531
1,21	0,0215	15,68	0,489326	729,302304
1,558	0,028	22,26	0,694668	794,999968
1,905	0,0328	30,66	0,956807	934,756087
....				
....				
16,128	0,1959	750,679996	23,426471	3831,95519
16,475	0,2005	769,439998	24,011914	3837,60604
16,823	0,2062	786,660002	24,549299	3815,03389
17,169	0,2097	800,380006	24,977459	3816,78586
17,517	0,3306	693,280002	21,635189	2097,03574
*****HORA DE FINALIZACION 14:50:56				
MAXIMO ESFUERZO APLICADO[MPa]	24,977459			
TEMPERATURA [°c]	26.4			

Fuente: El autor.

Como se mencionó en apartados anteriores, el equipo cuenta con accesorios para realizar pruebas de tracción a alambres y microprobetas, por esto, en las siguientes imágenes se dan a conocer algunos resultados obtenidos al evaluar una microprobeta de aluminio, de la misma forma, se presenta un pequeño fragmento del archivo generado por el **software**.

**Figura 52.** Resultados de la prueba de tracción a una microprobeta de aluminio.



Fuente: El autor.

**Tabla 7.** Fragmento del Archivo de Salida de la Prueba de Tracción.

FECHA Miércoles, 24 de agosto de 2005					
HORA INICIAL 04:25:55 p.m.		57,754000	28,347700	370,442854	
COMENTARIOS		57,811000	28,346800	370,485713	
MICROPROBETA AGOSTO 24		57,866000	28,348200	370,528573	
***** *****		57,936000	28,347700	370,557146	
TIEMPO	DESPL [mm]	FUERZA[kgf]	57,991000	28,348499	370,557146
0,000000	26,989799	0,371429	58,074000	28,349701	370,542860
0,000000	26,990299	0,757143	58,133000	28,353001	370,528573
0,211000	26,990200	1,157143	58,198000	28,353600	370,457145
0,343000	26,990000	1,557143	58,253000	28,357100	369,942858
0,424000	26,990200	1,957143	58,316000	28,356001	368,557142
57,690000	28,346701	370,414280	58,376000	28,355801	366,714286
		***	***HORA FINAL	04:28:38	p.m.

Fuente: El autor.

Como puede verse en el archivo de salida, la terminación del **test** se produjo cuando el desplazamiento fue de 28.355801mm. y la fuerza medida fue de 370,557146 kg-f. Con estos valores, se produjo una fractura en la parte central de la probeta de aluminio, como se observa en el lado derecho de la figura 52.

Con esta prueba, se ve además, la funcionalidad del equipo de tracción objeto de este trabajo de grado, y la eficacia de los accesorios hechos para llevar a cabo la ejecución de ensayos para alambres, cables o microprobetas.

## 7. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

La fuerza de adherencia en recubrimientos metálicos es una propiedad difícil de cuantificar, por ello, se hace necesario desarrollar equipos o instrumentos con los cuales sea posible determinarla teniendo presente, que estos equipos deben cumplir con determinados estándares propuestos por organizaciones y asociaciones internacionales.

Con la ejecución de este trabajo de grado, se logró automatizar un equipo para determinar fuerza de adherencia en recubrimientos metálicos por medio del **test pull-off**, o ensayo tensil, este equipo proporciona las lecturas necesarias para llevar a cabo un análisis acerca de esta propiedad, importante para la adaptación de la técnica de corriente pulsante inversa (**PRC** por sus siglas en inglés), en los procesos de electrorecubrimiento de herrajes y hebillas de aleación zamac en la empresa FANTAXIAS Ltda.

Lo que se presenta como resultado de esta tesis, es un equipo automatizado, capaz de medir o cuantificar la fuerza de adherencia en recubrimientos hechos por técnicas de galvanoplastia, el cual posee las características de ser robusto y compacto en su parte física, apto para entregar datos y visualización del progreso de las pruebas tanto en tiempo real como en un archivo de salida en formato texto, empleando una interfaz gráfica amigable desarrollada en **software** de alto nivel y todo esto aprovechando una tarjeta de adquisición de datos que usa un puerto PCI de un computador personal para la comunicación con el equipo encargado de acondicionar las señales provenientes de los transductores que captan las variables presentes en el proceso, a saber: fuerza, desplazamiento y temperatura.

Con las pruebas realizadas, se encontró la utilidad del equipo, para determinar la fuerza de adherencia en recubrimientos metálicos, usando el ensayo tensil; este equipo, puede ser reproducido o fabricado a un costo menor que el de una máquina universal de ensayos; además, puede ser empleado para realizar pruebas de adherencia en recubrimientos poliméricos y orgánicos así como pruebas de tracción, según se requiera.

Con respecto al **hardware** con el cual se realizó el equipo de tracción, la utilización de la tarjeta de adquisición de datos NI-DAQ6221mx proporciona una gran ventaja en lo referente al **hardware** necesario para el acondicionamiento de las señales, ya que no es necesario que éste posea componentes de difícil manejo o consecución en el mercado local, lo cual conlleva a una automatización orientada en su mayor parte al control y manejo de variables por computador.

Aunque no se presentó como un objetivo primordial en el desarrollo de la tesis, se logró observar, que algunos de los factores influyentes en la fuerza de adherencia para recubrimientos metálicos son: el tipo de técnica empleada para realizar el recubrimiento, el pegamento empleado para unir la probeta al **dolly** o elemento de fijación y el diámetro de la probeta.

Con respecto a lo anterior, se puede mencionar, que la técnica de electrodeposición empleada en la realización de los cupones o probetas es importante, ya que el espesor de las capas y la calidad de estas, son factores determinantes para que mediante la ejecución del ensayo tensil se obtenga un desprendimiento de las mismas, y proveer una lectura del máximo esfuerzo necesario para lograrlo. De la misma manera, el uso de pegamentos del tipo epóxico de dos partes garantiza que el desprendimiento ocurra, esto se observó luego de ensayar diferentes tipos de pegamentos acrílicos y no obtener los resultados esperados.

Durante la ejecución de la prueba es indispensable aplicar la fuerza de manera concéntrica, razón por la cual se observó con detenimiento y se halló que los accesorios creados para tal fin presentan ciertas falencias, permitiendo que se presenten pequeños ángulos de desnivel entre la muestra y el accesorio; por tal motivo las lecturas de esfuerzo pueden tener cierto margen de error.

Algunas ruedas dentadas o engranajes poseen daños en su estructura (dientes dañados), presentes en el equipo con que se inició la automatización, los cuales no se corrigieron debido a la complejidad para desarmar el equipo y para no ocasionar posibles desajustes mecánicos en el mismo; lo que se tiene con esta falla, es que las lecturas de fuerza y desplazamiento puedan ser erróneas en cierto momento, es decir cuando el movimiento de la plataforma móvil está siendo generado por el paso de estos dientes dañados en el sistema de engranajes.

La calibración de los transductores empleando **software** y **hardware** es muy importante; de esto depende que los datos usados en la generación de las respectivas gráficas que se presentan en la interfaz implementada, sean confiables, correctos y cuenten con la precisión necesaria para realizar el posterior análisis empleando el archivo en formato texto (\*.txt), por tanto no se hará necesaria la repetición de pruebas, lo que conllevaría una pérdida valiosa de tiempo.

Es de especial importancia tener en cuenta las normas ASTM que rigen la forma de realizar el ensayo tensil en el momento de hacer una actualización o modernización del equipo de tracción, pues este equipo quedará a disposición del grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente de la Universidad Industrial de Santander, para uso científico y por ende debe garantizarse que se cumpla con estos estándares internacionales.

## 8. RECOMENDACIONES

- La tarjeta de adquisición de datos empleada en la automatización del equipo, NI-DAQ6221mx, es un dispositivo costoso y delicado, por tanto se hace necesario tener los debidos cuidados con su uso y manejo para prolongar la vida útil de esta, debido a que una falla o avería causaría el detenimiento, por tiempo indeterminado del análisis de muestras.
- Con el fin de brindar una mejor precisión en los resultados, se recomienda hacer una calibración del equipo con elementos debidamente calibrados o estandarizados como: pesos normalizados, pie de rey de precisión, termómetros electrónicos o digitales, ya que de esto depende en gran medida que las lecturas de las variables que se requieren para determinar la fuerza de adherencia sean las correctas.
- Debido a que el equipo de tracción en el cual se basó este trabajo de grado, se desarrolló hace varios años, y que parte del equipo inicial se mantuvo para realizar la automatización; adicionalmente, el equipo ha sido transportado entre varias ciudades; por estas razones el equipo puede haber sufrido desajustes en su parte mecánica, todo esto sugiere, que para una posterior modernización, sean cambiados ciertos engranajes que poseen dientes averiados, así como la celda de carga, todo con el fin de evitar un funcionamiento erróneo.
- Una de las desventajas que presenta la máquina de tracción, es la falta de sistemas que permitan determinar cuando las muestras sufren algún tipo de desalineamiento de las muestras en el momento de la ejecución del **test pull-off**, lo cual representa un problema, ya que la fuerza aplicada a las muestras

deben ser totalmente concéntrica; por todo esto, si se desea hacer una actualización de la máquina, se recomienda o sugiere, diseñar sistemas que puedan determinar ángulos de desnivel, ya sea empleando métodos de reconocimiento visual automáticos u otros que se tengan al alcance o se desarrollen con el paso del tiempo.

## BIBLIOGRAFÍA

MOLERA SOLÁ, Peré. Recubrimientos de los metales. Santa Fé de Bogotá, Editorial Alfa Omega, 1999. p. 11-20.

BURNS, R. M. y BRADLEY, W. W. Protective coatings for metals. New York, Publishing Corporation, 1959. p. 238-241, 290-291, 490-495.

SARD, Richard, LEIDHEISER, Henry y OGBURN, Fielding. Properties of electrodeposits: their measurement and significance. New Jersey, The Electrochemical Society, 1960. p. 273-306.

LOWENHEIM, Frederick. Modern electroplating. New York, The Electrochemical Society, 1963. p. 48-50, 105, 302, 679-682.

MANDICH, N. N. Pulse and pulse-reverse electroplating. En: Journal of Metal Finishing. Vol. 98, (Jan. 2000). p. 375-380.

DUNCAN, Bruce, ARRANZ, Elena, CROCKER, Louise, URQUHART, Jeannie. Tests for Adhesion Strength. En: National Physical Laboratory Materials Centre NPL Report MATC (A), (Feb. 2004). p.15-18.

DUNCAN, Bruce, CROCKER, Louise. Review of Tests for Adhesion Strength. En: National Physical Laboratory Materials Centre NPL Report MATC (A), (Dec. 2001). p.14-20.

MENDEZ LARROTA, Lucia, JIMENEZ OSORIO, Oscar, Automatización de la Máquina de Tracción Lenta, Bucaramanga, 2002, 172p. Trabajo de grado (Ingeniería Electrónica). Universidad Industrial de Santander UIS. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.

GARCIA BETANCOURT, Ramón E., Implementación de una Metodología para Evaluar la Adhesión en Recubrimientos, Tunja, 2003, 75p. Trabajo de Grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC. Escuela de Física.

GREGORY, B. A. Instrumentación eléctrica y sistemas de medida. Barcelona, Editorial Gustavo Pili S.A., 1984. p.232-236.

MALVINO, A. P. Principios de Electrónica. Barcelona, Editorial Mc Graw Hill, 1993. p. 933-945

RASHID, M. H. Electrónica de Potencia. Circuitos, dispositivos y Aplicaciones. Madrid. Editorial PRENTICE HALL Hispanoamericana S.A., 1993. p. 51-66.

CHAPMAN, Stephen J. Máquinas Eléctricas. Madrid. Editorial Mc Graw Hill. 2000. p. 527-577.

<http://www.national.com>

[www.ni.com](http://www.ni.com)

<http://www.coinsur.com>

<http://www.ni.com/pdf/products>

[www.elcometer.com](http://www.elcometer.com)

<http://www.defelsko.com/adhesiometer.htm>

<http://www.nace.org/nace/>

## ANEXOS

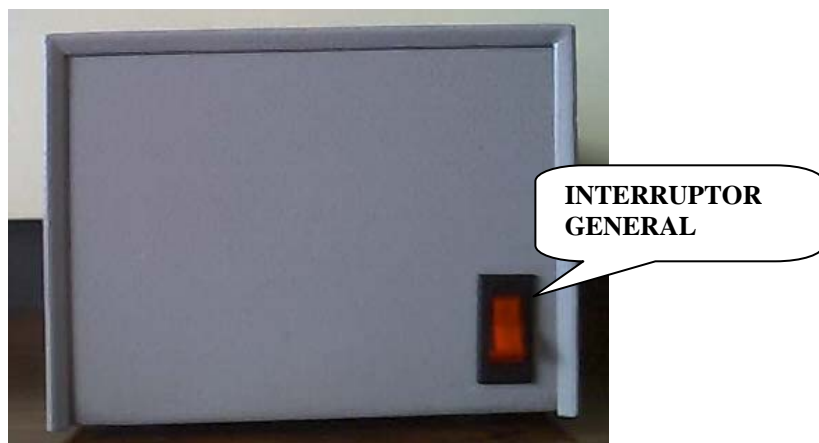
### ANEXO A. MANUAL DEL USUARIO DEL EQUIPO DE TRACCIÓN

Con la finalidad de orientar al usuario con el procedimiento que debe realizarse para llevar cabo pruebas con el equipo de Tracción, se presenta a continuación un manual del usuario.

Como punto de partida, se describirá el equipo acondicionador de señales, seguido por la descripción del equipo de tracción, para ir avanzando hasta llegar a presentar la forma de realizar el test **pull-off**.

En la figura A1 se presenta la vista frontal del acondicionador de señales donde solo se cuenta, como puede observarse con el interruptor general.

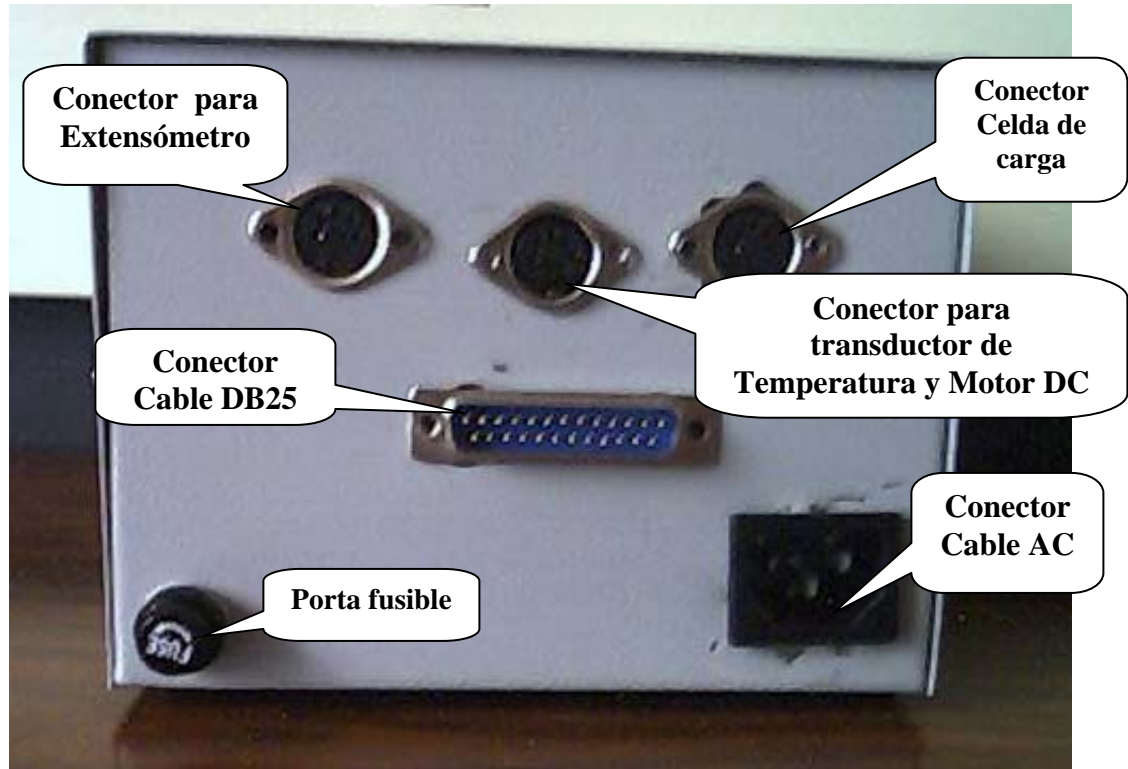
**Figura A1.** Vista frontal del equipo acondicionador de Señales



Fuente: El autor.

A continuación, en la figura A2 se aprecia la vista de la parte trasera del acondicionador de señales, pudiéndose observar los diferentes puntos de conexión de los transductores y el conector de la tarjeta de adquisición de datos.

**Figura A2.** Vista de la parte trasera del acondicionador de señales.



Fuente: El autor.

### **A.1 CONEXIONES BÁSICAS.**

Como puede verse en la anterior imagen, el equipo utiliza los siguientes elementos externos para su funcionamiento:

- Cable DB25 hembra-hembra: utilizado para conectar el acondicionador de

señales y el accesorio o bloque de terminales CB68-LP que última instancia se conecta a la tarjeta DAQ6221mx, alojada en el interior del PC, para descargar datos al PC por puerto serie.

- Cable redondo con terminal macho para conectar el motor DC y el transductor de temperatura.
- Conector para el cable proveniente de la celda de carga.
- Conector para el cable proveniente del transductor de desplazamiento o extensómetro.
- Conector para cable de potencia o cable AC mediante el cual se suministra el voltaje de la red de 110 VAC al equipo.
- Portafusibles, en cuyo interior se encuentra un fusible de 250V/2A, con el cual se da seguridad al equipo en caso de un cortocircuito.

#### NOTA IMPORTANTE



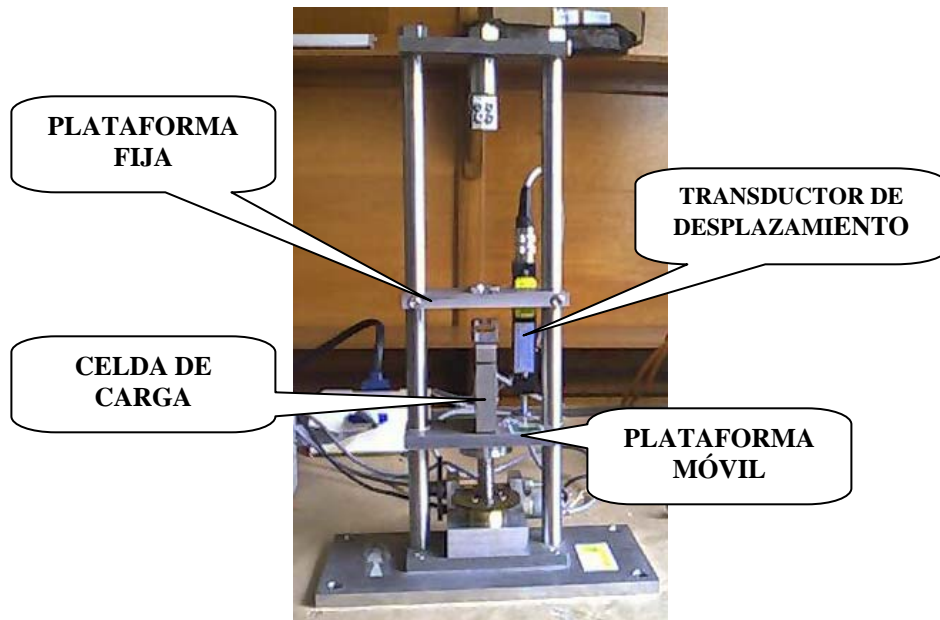
**Antes de encender el equipo acondicionador de señales, es importante que los cables se encuentren en sus respectivos sitios con el fin de evitar daños irreversibles a los transductores empleados para suministrar las lecturas de fuerza, desplazamiento y temperatura.**

## A.2 EQUIPO DE TRACCIÓN.

El equipo de tracción al cual hace referencia este manual de usuario, está constituido principalmente por dos columnas metálicas de acero inoxidable, con forma cilíndrica y con un diámetro de 1 pulgada, las cuales están ancladas en una base, también metálica, y brindan soporte a tres plataformas, una de ellas móvil, sobre la cual se encuentra el transductor de fuerza o celda de carga.

En la figura A3 puede observarse la estructura del equipo de tracción, así como los transductores de desplazamiento y fuerza.

**Figura A3.** Equipo de tracción.



Fuente: El autor.

Este equipo posee básicamente dos accesorios que garantizan la sujeción de las probetas en el momento de realizar las pruebas de adherencia a recubrimientos

metálicos, mostrados en el lado izquierdo de la figura A4, y dos accesorios más para las pruebas de tracción como se observa en la mencionada figura.

**Figura A4.** Accesorios para las diferentes pruebas.



**Fuente:** El Autor.

Una vez identificado el tipo de prueba a realizar y los accesorios que se emplearán, se procede a seleccionar las muestras a ensayar. Para las pruebas de adherencia, las probetas a usar deben tener la forma observada en la figura A5 y deben poseer un diámetro entre 18 y 20 mm.

**Figura A5.** Probetas



Fuente: El autor.

Para este tipo de probetas, se cuenta además con un accesorio denominado **dolly**, (Figura A6), mediante el cual se adhiere la probeta, con el pegamento epóxico, a la cara plana del mismo para poder realizar la prueba.

**Figura A6.** Dolly Empleado.



Fuente: El autor.

Para realizar las pruebas con el fin de determinar la fuerza de adherencia de recubrimientos metálicos, teniendo las probetas y los **dollies**, se procede a

realizar el proceso de desengrase de la probeta con el fin de eliminar toda suciedad que no permita la buena ejecución de la prueba, como residuos del recubrimiento, huellas, capas de óxido y partículas de polvo, entre otros. Este desengrase puede hacerse por ultrasonido o con acetona según se disponga por la persona a cargo.

Luego del debido desengrase, las probetas son unidas a los dollies con el pegamento que se haya escogido, sea epóxico de dos partes o adhesivo acrílico; como los mostrados en la figura A7.

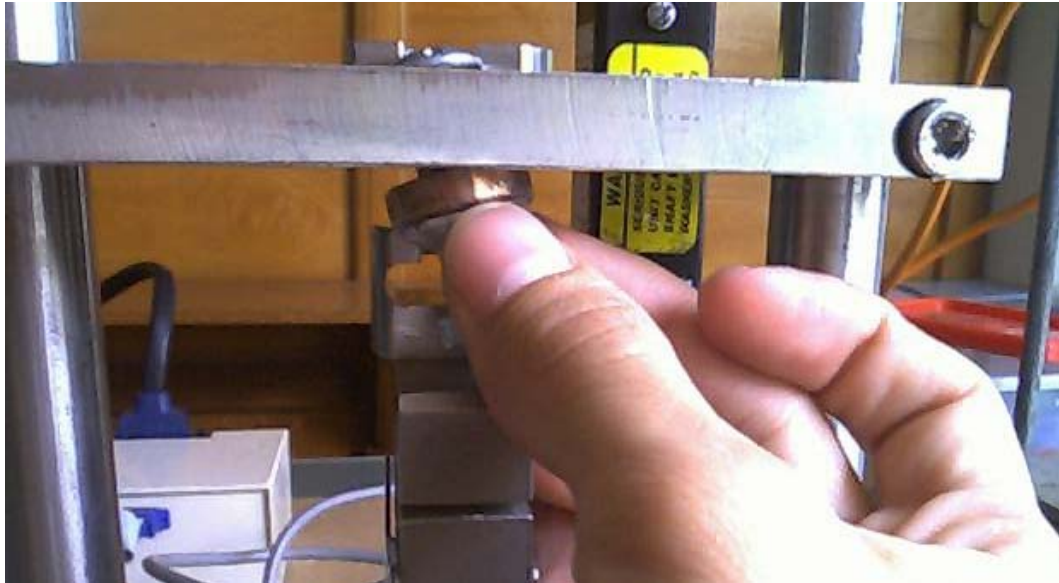
**Figuras A7.** Pegamentos Empleados.



Fuente: El autor.

Pasado el tiempo de curado, dado por el fabricante del pegamento, se procede a llevar el conjunto **dolly**-probeta al equipo de tracción, donde se aloja en la cavidad dispuesta para tal fin, entre la plataforma móvil y la plataforma fija como se observa en la figura A8.

**Figura A8** Ubicación de la Muestra Bajo Prueba.



Fuente: El autor.

### **A3. INICIO DE LA PRUEBA**

En este momento, se procede a encender el acondicionador de señales, teniendo los cables conectados en los lugares correspondientes, posteriormente, se abre la aplicación hecha en el **software** de alto nivel **LabVIEW®**; al abrirse esta aplicación aparecerá en la pantalla del computador persona (PC), la siguiente ventana, presentada en la figura A9:

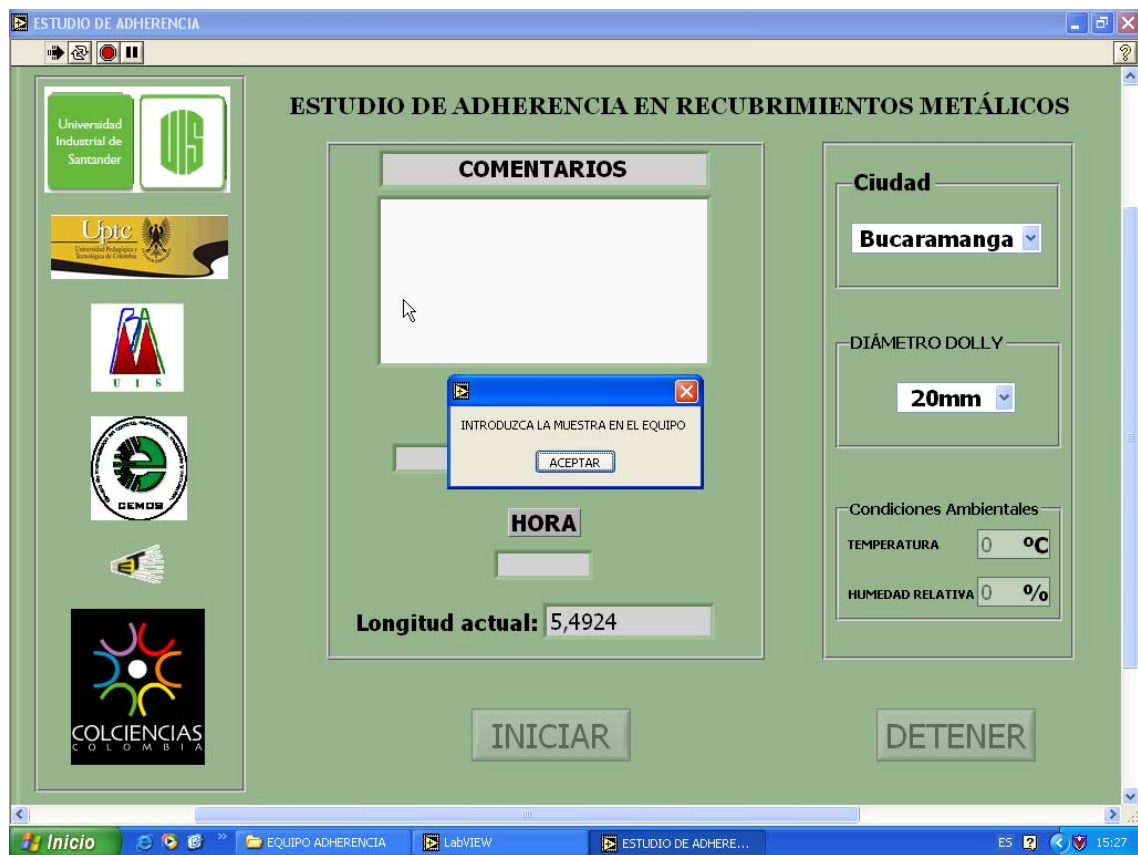
Figura A9. Pantalla Inicial.



Fuente: El autor.

Al dar **click** sobre el icono en forma de flecha (**RUN**) ubicado en la parte superior izquierda de figura A9, se da inicio al desplazamiento de la plataforma móvil hasta que se tenga la separación necesaria entre las plataformas, en este caso el software está configurado para 16mm., cumplida esta condición aparecerá un mensaje indicando que la muestra puede introducirse en el equipo como puede verse en la figura A10.

Figura A10. Mensaje de inicio de la prueba.



Fuente: El autor.

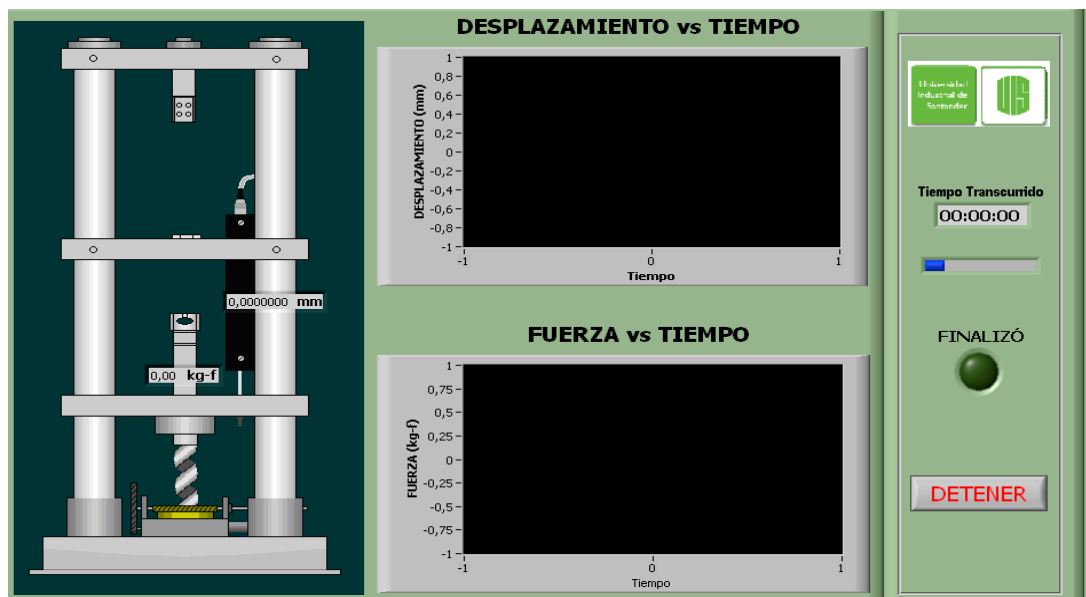
Al introducir la muestra y hacer click en el botón “ACEPTAR”; en el espacio titulado “COMENTARIOS”, se procede a digitar la información que se considere importante para la prueba, entre otras las siguientes:

- Nombre del operario que realiza la prueba.
- Tipo de recubrimiento a ensayar (Cobre, Zinc, Latón).
- Tipo de técnica con la cual se hizo la electrodeposición (**PC, PCR, DC**).
- Propietario de la muestras.

**NOTA:** Los datos: ciudad donde se realiza la prueba, y diámetro del **dolly** se seleccionan en la parte derecha de la pantalla, donde aparecen por defecto Bucaramanga y diámetro 20 mm. respectivamente. La temperatura y humedad relativa son datos que el software genera automáticamente.

Con los datos suministrados al software y haciendo click en el botón “INICIAR”, se da comienzo a la toma de datos, se puede observar gráficamente el progreso de la prueba (figura A11), la cual se detiene de manera automática si se cumple cualquiera de tres condiciones: hubo desprendimiento ya sea de capa metálica o pegamento, el tiempo de la prueba ha superado los 100 segundos sugeridos por la Norma ASTM 4541 o al dar **click** sobre el botón de emergencia marcado con la leyenda “DETENER” en letras de color rojo.

**Figura A11.** Progreso de la Prueba.



Fuente: El autor.

Una vez finalizada la prueba, se detiene el motor y se muestra la gráfica de Fuerza contra Deformación indicando los valores máximos alcanzados, tanto para fuerza como para desplazamiento según se observa en la figura A12.

**Figura A12.** Gráfica de Fuerza vs. Deformación

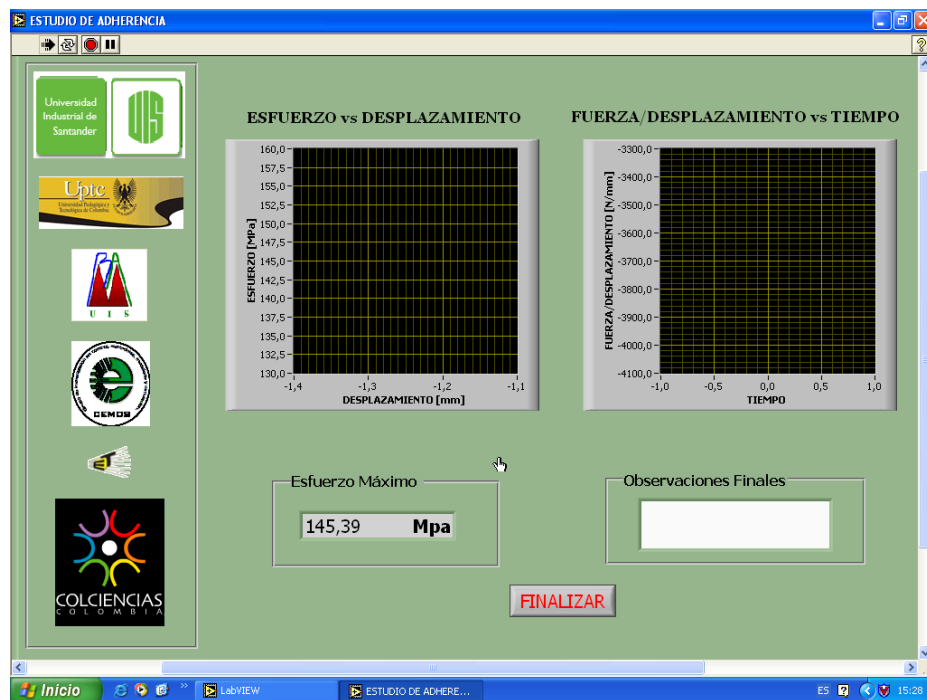


Fuente: El autor.

Al hacer click en el botón “**SIGUIENTE**”, se presentan las gráficas de Esfuerzo contra desplazamiento y fuerza/desplazamiento contra tiempo.

Además se proporciona al usuario la posibilidad de introducir en el reporte de datos, algunas observaciones finales que se estimen pertinentes.

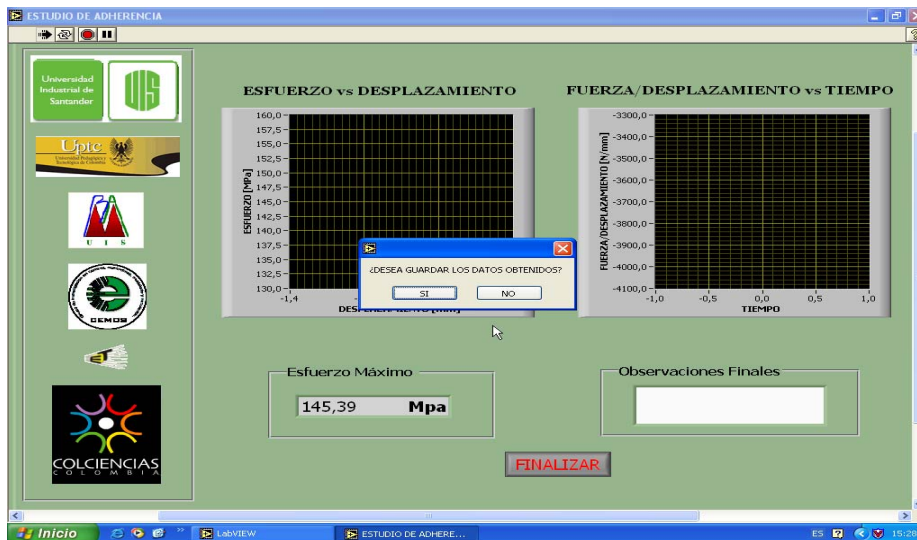
Figura A13. Pantalla Final.



Fuente: El autor.

Al hacer click sobre el botón finalizar, se da por finalizada la prueba y se pregunta al usuario si desea guardar los datos obtenidos (figura A14.), los cuales son almacenados en un archivo con formato texto (\*.txt) con el nombre y dirección indicadas por el usuario, en el caso de contestar de manera afirmativa a la pregunta; de lo contrario los datos se perderán.

Figura A14. Prueba finalizada.



Fuente: El autor.

Cabe mencionar que en el archivo de salida aparecen los datos o parámetros necesarios para realizar el posterior análisis por la persona idónea así como información general de la prueba, los datos que se reportan son:

- Fecha, hora de inicio y de finalización de la prueba.
- Comentarios digitados por el usuario.
- Datos de tiempo[s], desplazamiento [mm], fuerza [N], esfuerzo [MPa]. y fuerza/desplazamiento [N/mm].
- Observaciones finales.
- Temperatura del lugar donde se hizo la prueba.

**NOTA:** Para realizar otra prueba basta con retirar la anterior muestra, marcarla y almacenarla, colocar otra en su lugar y hacer **click** sobre el icono **RUN** o con la combinación de teclas **CRTL+R**. y continuar con el proceso descrito anteriormente.

## **ANEXO B. HOJAS DE DATOS**

En el presente anexo se dan a conocer las hojas de datos de los diferentes dispositivos usados en la automatización del equipo de tracción, así:

- **ANEXO B.1. TARJETA NI-DAQ6221mx.**
- **ANEXO B.2. CELDA DE CARGA.**
- **ANEXO B.3. POTENCIÓMETRO LINEAL LP802-50.**
- **ANEXO B.4. AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN INA116.**
- **ANEXO B.5 AMPLIFICADOR OPERACIONAL OPA277.**
- **ANEXO B.6 TRANSDUCTOR DE TEMPERATURA LM35.**
- **ANEXO B.7 PUENTE H L298H.**
- **ANEXO B.8 REFERENCIA DE VOLTAJE REF102**

## ANEXO B.1. TARJETA NI-DAQ6221mx.

# Low-Cost M Series Multifunction DAQ 16-Bit, 250 kS/s, up to 80 Analog Inputs

### M Series – Low Cost

- 16, 32, or 80 analog inputs at 16-bit, 250 kS/s
- Up to 4 analog outputs at 16-bit, 833 kS/s (6  $\mu$ s full-scale settling time)
- Programmable input range ( $\pm 10$ ,  $\pm 5$ ,  $\pm 1$ ,  $\pm 0.2$  V) per channel
- Up to 48 TTL/CMOS digital I/O lines (up to 32 hardware-timed at 1 MHz)
- Two 32-bit, 80 MHz counter/timers
- Digital triggering
- NI-MCal calibration technology for improved measurement accuracy
- 6 DMA channels for fast data throughput
- NI-DAQmx measurement services software for simplified configuration and measurements
- 3-year warranty

### Operating Systems

- Windows 2000/NT/XP

### Recommended Software

- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio

### Other Compatible Software

- Visual Studio.NET
- C/C++/C#
- NI SignalExpress

### Measurement Services Software (included)

- NI-DAQmx



Family	Bus	Analog Inputs	Analog Input Resolution (bits)	Analog Outputs	Output Resolution (bits)	Max Output Rate (kS/s)	Output Range (V)	Digital I/O	Correlated (Clocked) DIO
NI 6220	PCI, PXI	16	16	–	–	–	–	24	8, up to 1 MHz
NI 6221	PCI, PXI	16	16	2	16	833	$\pm 10$	24	8, up to 1 MHz
NI 6224	PCI, PXI	32	16	–	–	–	–	48	32, up to 1 MHz
NI 6225	PCI, PXI	80	16	2	16	833	$\pm 10$	24	8, up to 1 MHz
NI 6229	PCI, PXI	32	16	4	16	833	$\pm 10$	48	32, up to 1 MHz

Table 1. NI Low-Cost M Series Selection Guide

### Overview and Applications

National Instruments low-cost M Series devices provide optimized functionality for cost-sensitive applications. They are ideal for applications including data logging and control, and measure sensors and high voltages when used in conjunction with NI signal conditioning. Synchronize the operations of multiple devices using the RTSI bus or PXI trigger bus.

### Recommended Accessories

Signal conditioning is required for sensor measurements or voltage inputs greater than 10 V. National Instruments SCXI is a versatile, high-performance signal conditioning platform, optimized for high-channel-count applications. NI SCC provides portable, flexible signal conditioning options on a per-channel basis. For applications not requiring signal conditioning, refer to Table 2 for recommended cabling and accessories.

### Recommended Software

National Instruments recommends using the latest version of NI-DAQmx measurement services software for application development in LabVIEW, LabWindows/CVI, and Measurement Studio. To check for the newest version of NI-DAQmx, go to [ni.com/support/daq/versions](http://ni.com/support/daq/versions). For custom driver development, use the Measurement Hardware DDK or customized register-level programming. M Series devices are compatible with the

following versions (or later ones) of NI application software: LabVIEW, LabWindows/CVI, or Measurement Studio version 7.x; SignalExpress 1.x; VI Logger 2.0; or LabVIEW with the LabVIEW Real-Time Module 7.1. M Series devices do not work with the legacy Traditional NI-DAQ driver.

System Description	Terminal Block $\Omega$	Cable
High Performance	SCB-68, BNC-2110, TBX-68	SHC68-68-EPM
Basic Shielding	SCB-68, BNC-2110, TBX-68	SHC68-68

Table 2. Recommended Accessories (Two cables and accessories are required to access all pins on the NI 6224, 6225, and 6229 devices)

### Ordering Information

PCI	
NI PCI-6220 .....	779065-01
NI PCI-6221 .....	779066-01
NI PCI-6224 .....	779067-01
NI PCI-6225 .....	779295-01
NI PCI-6229 .....	779068-01

PXI	
NI PXI-6220 .....	779112-01
NI PXI-6221 .....	779113-01
NI PXI-6224 .....	779114-01
NI PXI-6225 .....	779296-01
NI PXI-6229 .....	779115-01

Includes NI-DAQmx software..



# Low-Cost M Series Multifunction DAQ 16-Bit, 250 kS/s, up to 80 Analog Inputs

## Frequency Generator

Number of channels.....	1
Base clocks.....	10 MHz, 100 kHz
Dividers.....	1 to 16
Base clock accuracy.....	50 ppm
Output can be available on any PFI or RTSI terminal.	

## Phase-Locked Loop (PLL)

Number of PLLs.....	1
Reference signal.....	PXI_STAR, PXI_CLK10, RTSI <I. 7>
Output of PLL.....	80 MHz timebase; other signals derived from 80 MHz timebase including 20 MHz and 100 kHz timebases

## External Digital Triggers

Source.....	Any PFI, RTSI, PXI_TRIG, PXI_STAR
Polarity.....	Software-selectable for most signals
Analog input function.....	Start Trigger, Reference Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Convert Clock, Sample Clock Timebase
Analog output function.....	Start Trigger, Pause Trigger, Sample Clock, Sample Clock Timebase
Counter/timer functions.....	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down
Digital waveform generation (DW) function.....	Sample Clock
Digital waveform acquisition (DI) function.....	Sample Clock

## Device-To-Device Trigger Bus

PCI devices.....	RTSI <I. 7> <sup>1</sup>
PXI devices.....	PXI_STAR, PXI_TRIG <I. 7>, PFI_STAR
Output selections.....	10 MHz Reference Clock; frequency generator output; many internal signals
Debounce filter settings.....	125 ns, 6.425 $\mu$ s, 2.54 ms, disabled; high and low transitions; selectable per input

<sup>1</sup> In other sections of this document, RTSI refers to RTSI <I. 7> for PCI devices or PFI\_TRIG <I. 7> for PXI devices.

## Bus Interface

PCI or PFI.....	3.3 V or 5 V signal environment
DMA channels.....	6, analog input, analog output, digital input, digital output, counter/timer 0, counter/timer 1

## Power Requirements

Current draw from bus during no-load condition	
+5 V.....	0.02 A
+3.3 V.....	0.25 A
+12 V.....	0.15 A
Current draw from bus during AI and AO overvoltage condition	
+5 V.....	0.02 A
+3.3 V.....	0.25 A
+12 V.....	0.25 A

Power available from +5 V terminal.....	1 A max, each connector, with self-resetting fuse
Other power limit for PXI devices.....	Current drawn from +5 V terminals and all PFI/PFI/P2 terminals should not exceed 2 A

## Physical

Dimensions	
PCI.....	9.7 by 15.5 cm (3.8 by 6.1 in.)
PXI.....	Standard 3U PXI
I/O connector	
Ni 6220/Ni 6221.....	1 68-pin VHDCI
Ni 6224/Ni 6225/Ni 6228.....	2 68-pin VHDCI

## Maximum Working Voltage<sup>1</sup>

Channel-to-earth.....	11 V, Installation Category I
Channel-to-channel.....	11 V, Installation Category I

<sup>1</sup> Maximum working voltage refers to the signal voltage plus the common-mode voltage.

## Environmental

Operating temperature.....	0 to 55 °C
Storage temperature.....	-20 to 70 °C
Relative Humidity.....	10 to 80%, noncondensing
Maximum altitude.....	2,000 m
Pollution Degree (indoor use only).....	2

## Safety

This product is designed to meet the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1
- CAN/CSA C22.2 No. 61010-1

For UL and other safety certifications, refer to the product label, or visit [ni.com/certification](http://ni.com/certification), search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

## Electromagnetic Compatibility

Emissions.....	EN 55011 Class A at 10 m; FCC Part 15A above 1 GHz
Immunity.....	EN 61326:1997 + A2:2001, Table 1

CE, C-Tick, and FCC Part 15 (Class A) Compliant

For EMC compliance, operate this device with shielded cabling.

## CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as amended for CE marking, as follows:

Low-Voltage Directive (safety).....	73/23/EEC
Electromagnetic Compatibility	
Directive (EMC).....	89/336/EEC

Refer to the Declaration of Conformity (DoC) for this product for any additional regulatory compliance information. To obtain the DoC for this product, visit [ni.com/certification](http://ni.com/certification), search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

## ANEXO B.2. CELDA DE CARGA.

### Model 615

### S-Type Load Cells

**NEW!**



#### Features

- Capacities: 50 kg - 1000 kg (110 lbs - 2204 lbs)
- Nickel plated alloy steel construction
- Tension or compression applications
- Suitable for hanging scales
- Ideal for conversion of mechanical to electronic scales
- IP67 Environmental Protection

Tedea-Huntleigh's competitively priced model 615 S-type load cells do not compromise performance or accuracy. Their low cost, however, makes electronic weighing practical for many companies which formerly could find no economic justification for it.

Tedea-Huntleigh's model 615 S-type load cells are unique force measuring transducers. They combine high accuracy with long-term stability, meeting and exceeding the most stringent requirements of contemporary electronic weighing. This model will withstand wash down and high humidity conditions without impairment of performance.

The model 615 in nickel plated steel is protected to IP67 requirements. It provides an affordable solution where less severe conditions are encountered.

The 600 series of S-type load cells are ideal for converting mechanical weighbridges and platform scales into electronic scales and may also be used in platform scales, hopper weighing, force measurement and many other industrial applications. They should be considered for any tension application.



EXCELLENCE IN LOAD CELLS

#### Contact Info

E-mail  
[sales@tedea-huntleigh.com](mailto:sales@tedea-huntleigh.com)  
 Website  
[www.tedea-huntleigh.com](http://www.tedea-huntleigh.com)

20530 PLUMMER STREET  
 CHATSWORTH, CA 91311  
 USA

TEL: 800.625.2616  
 FAX: 818.701.2799

**Europe**  
 Tedea-Huntleigh  
 Europe Ltd.  
 37 Portmanmoor  
 Road  
 Cardiff  
 CF24 SHE

**International**  
 Tedea-Huntleigh Inter-  
 national Ltd.  
 5 Hozoran St.  
 New Industrial Zone  
 P.O. Box 8381, Netanya  
 42506

**China**  
 Beijing Tedea-Huntleigh  
 No. 16 Hong Da Bei Lu  
 Da Xing County, Beijing  
 Economic & Technology  
 Development Area,  
 Beijing 100176  
 Tel: +86-10-67881604-

**Germany**  
 Tedea-Huntleigh  
 GmbH.  
 Mumlingweg 18  
 D-64297  
 Darmstadt-  
 Eberstadt

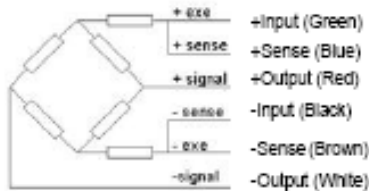
**France**  
 SEEA sa  
 16 Rue Francis  
 Vovelle  
 28000 Chartres  
 France

# Model 615

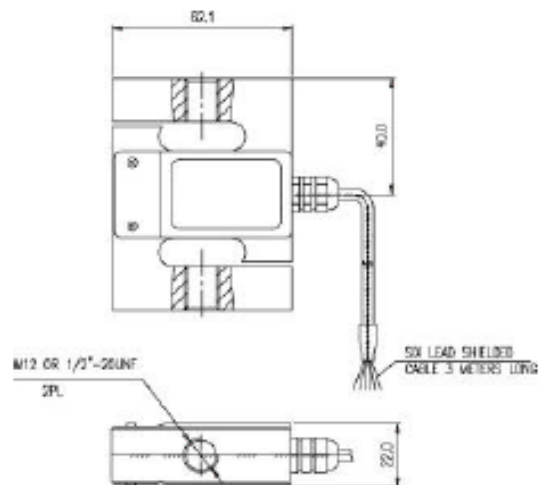
# S-Type Load Cells

GRADE	E	F	G	UNITS
Rated Capacity	50, 100, 150, 200, 300, 500, 750, 1000			kg
Rated Output	2.0			mV/V
Rated Output Tolerance	0.002			± mV/V
Zero Balance	0.02			± mV/V
Total Error Per OIML R60	0.05	0.03	0.02	±% of Rated Output
Zero Return (30 min.)	0.05	0.03	0.017	±% of load
Temperature Effect: On Zero	0.01	0.006	0.004	±% of Rated Output / °C
Temperature Effect: On Output	0.003	0.0014	0.0012	±% of Load / °C
Temperature Effect: Compensated	-10 to +40			°C
Temperature Effect: Safe	-30 to +70			°C
Maximum Safe Static Overload (central loading)	150			% of Rated Capacity
Ultimate Static Overload (central loading)	300			% of Rated Capacity
Excitation: Recommended	10			VAC or VDC rms
Excitation: Maximum	15			VAC or VDC rms
Input Impedance	400 ± 20			Ohms
Output Impedance	350 ± 3			Ohms
Insulation Resistance	>2000			Mega Ohms
Cable Length	3			m
Weight (nominal)	0.7			kg
Cable Type	3 meters, 6 conductors, 26 AWG, braid shield, PVC jacket			
Color Code	+exc-grn, +sig-red, +sen-blu -exc-brw, -sig-wht, -sen-blk			
Construction	Electroless nickel plated alloy steel			
Compensation Circuit Type	Balanced			
Environmental Protection	IP 67			
Outline Dimension Drawings	168.000.00-3			

### Balanced Compensation



### Outline Dimensions All Capacities (in mm)



## ANEXO B.3. POTENCIÓMETRO LINEAL LP802-50.

# SHORT STROKE LINEAR POTENTIOMETERS FOR DISPLACEMENT MEASUREMENT

### LP802 Series 25 to 150 mm (1 to 6") Ranges

- ✓ Rugged Construction and Shaft Seals for Protection in Factory Environments
- ✓ Precious Metal Wipers Insure High Performance and Low Noise
- ✓ Plastic Film Element Reduces Wear for Extremely Long Life



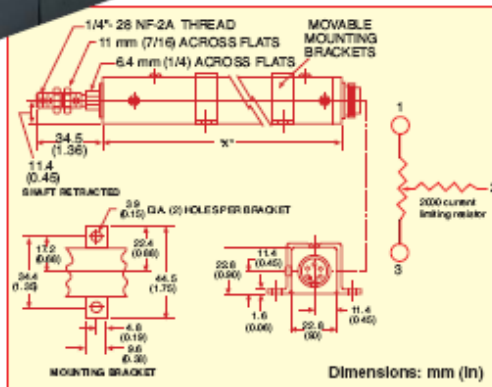
DP41-E meter, \$545.  
See Section D.

LP802  
**\$350**



LP802-25, \$350, shown smaller than actual size.

The OMEGA® LP802 Series linear potentiometers are used to measure linear position or displacement up to 150 mm (6") in a wide variety of manufacturing and process equipment. These units feature front and rear bearings, anodized extruded aluminum housings, stainless steel shafts and precious metal wipers and contacts for long, trouble-free life in harsh factory environments. Based on a conductive plastic film element, the LP802 provides high resolution, absolute position measurement without external signal conditioners.



### SPECIFICATIONS

Linearity:  $\pm 1\%$  FS

Hysteresis:  $\pm 0.025$  mm (0.001")

Repeatability:  $\pm 0.012$  mm (0.0005")

Incremental Sensitivity: 0.00127 mm (0.00005")

Power Rating: 0.75 watts/stroke inch

Temp. Range: -65 to 105°C (-85 to 221°F)

Operating Force: 450 g (1 lb) maximum

Shaft: 6 mm (0.236") diameter with 1/4-28 threaded end adaptor

Life: 100 million operations minimum at travel rate of 250 mm (10")/second

**MOST POPULAR MODELS HIGHLIGHTED!**

### To Order (Specify Model Number)

MODEL NO.	PRICE	ELECTRICAL TRAVEL		MECHANICAL TRAVEL		"X" DIMENSION (NOMINAL)		RESISTANCE (OHMS)	COMPATIBLE METERS*
		mm	in.	mm	in.	mm	in.		
LP802-25	\$350	25.00	1.00	30.5	1.20	103.0	4.05	1500 $\pm 20\%$	DP25-E, DP41-E
LP802-50	350	50.00	2.00	55.9	2.20	128.0	5.05	3000 $\pm 20\%$	DP25-E, DP41-E
LP802-75	350	75.00	3.00	80.0	3.15	151.0	5.95	4500 $\pm 20\%$	DP25-E, DP41-E
LP802-100	350	100.0	4.00	105.4	4.15	176.0	6.95	6000 $\pm 20\%$	DP25-E, DP41-E
LP802-150	350	150.0	5.96	156.2	6.15	227.0	8.95	9000 $\pm 20\%$	DP25-E, DP41-E

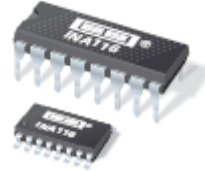
Comes with complete operator's manual.

Ordering Example: LP802-25 linear potentiometer with 25 mm (1") stroke, \$350.

\*See Section D for compatible meters.

DISPLACEMENT

## ANEXO B.4. AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN INA116.



INA116

### Ultra Low Input Bias Current INSTRUMENTATION AMPLIFIER

#### FEATURES

- LOW INPUT BIAS CURRENT: 3fA typ
- BUFFERED GUARD DRIVE PINS
- LOW OFFSET VOLTAGE: 2mV max
- HIGH COMMON-MODE REJECTION: 84dB (G = 10)
- LOW QUIESCENT CURRENT: 1mA
- INPUT OVER-VOLTAGE PROTECTION:  $\pm 40V$

#### APPLICATIONS

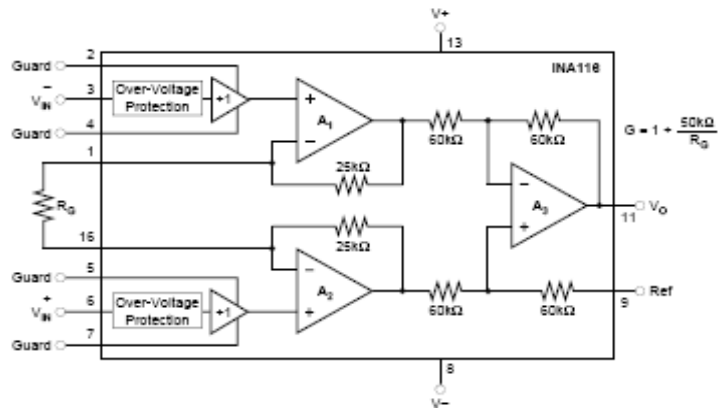
- LABORATORY INSTRUMENTATION
- pH MEASUREMENT
- ION-SPECIFIC PROBES
- LEAKAGE CURRENT MEASUREMENT

#### DESCRIPTION

The INA116 is a complete monolithic FET-input instrumentation amplifier with extremely low input bias current. *Difet*<sup>®</sup> inputs and special guarding techniques yield input bias currents of 3fA at 25°C, and only 25fA at 85°C. Its 3-op amp topology allows gains to be set from 1 to 1000 by connecting a single external resistor.

Guard pins adjacent to both input connections can be used to drive circuit board and input cable guards to maintain extremely low input bias current.

The INA116 is available in 16-pin plastic DIP and SOL-16 surface-mount packages, specified for the -40°C to +85°C temperature range.



Difet<sup>®</sup>, Burr-Brown Corporation

International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 9730 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85709 • Tel: (520) 748-1111 • Twa: 910-952-1111  
Internet: <http://www.burr-brown.com/> • FAXline: (800) 548-6133 (US/Canada Only) • Cable: BBRCORP • Telex: 969-8481 • FAX: (520) 888-1610 • Immediate Product Info: (800) 548-9132

# SPECIFICATIONS

AT  $T_A = +25^\circ\text{C}$ ,  $V_S = \pm 15\text{V}$ ,  $R_L = 10\text{k}\Omega$ , unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	INA118P, U			INA118PA, UA			UNITS	
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX		
<b>INPUT</b>									
Offset Voltage, RTI	$T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{MIN}}$ to $T_{\text{MAX}}$ $V_S = \pm 4.5\text{V}$ to $\pm 18\text{V}$		$\pm 0.5 \pm 0.5/G$	$\pm 2 \pm 2/G$	*	*	$\pm 5 \pm 5/G$	mV	
Initial					*	*			
vs Temperature				See Typical Curve		*	*		
vs Power Supply				$\pm 10 \pm 15/G$	$\pm 50 \pm 100/G$	*	*	$\pm 100 \pm 200/G$	$\mu\text{V/V}$
Long-Term Stability				$\pm 1 \pm 5/G$		*	*		$\mu\text{V/mo}$
Bias Current				$\pm 3$	$\pm 25$	*	*	$\pm 100$	$\mu\text{A}$
vs Temperature				See Typical Curve		*	*		
Offset Current				$\pm 1$	$\pm 25$	*	*	$\pm 100$	$\mu\text{A}$
vs Temperature				See Typical Curve		*	*		
Impedance, Differential				$> 10^{10}/G, 2$		*	*		$\Omega/\text{pF}$
Common-Mode			$> 10^{10}/7$		*	*		$\Omega/\text{pF}$	
Common-Mode Voltage Range		(V+)-4 (V-)+4	(V+)-2 (V-)+2.4		*	*		V	
Safe Input Voltage					*	*		V	
Common-Mode Rejection	$V_{\text{CM}} = \pm 11\text{V}$ , $\Delta R_S = 1\text{k}\Omega$ $G = 1$ $G = 10$ $G = 100$ $V_{\text{CM}} = \pm 5\text{V}$ , $G = 1000$								
		80	89	73	*	*		dB	
		84	92	78	*	*		dB	
		86	94	80	*	*		dB	
	86	94	80	*	*		dB		
<b>NOISE</b>									
Voltage Noise, RTI	$G = 1000$ , $R_S = 0\Omega$								
$f = 1\text{kHz}$			28		*	*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$	
$f_0 = 0.1\text{Hz}$ to $10\text{Hz}$				2		*	*	$\mu\text{V}/\text{p}$	
Current Noise									
$f = 1\text{kHz}$			0.1		*	*		$\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$	
<b>GAIN</b>									
Gain Equation			$1 + (50\text{k}\Omega/R_G)$		*	*		V/V	
Range of Gain		1		1000	*	*	*	V/V	
Gain Error	$G = 1$ $G = 10$ $G = 100$ $G = 1000$		$\pm 0.01$	$\pm 0.05$	*	*	$\pm 0.1$	%	
			$\pm 0.25$	$\pm 0.4$	*	*	$\pm 0.5$	%	
			$\pm 0.35$	$\pm 0.5$	*	*	$\pm 0.7$	%	
			$\pm 1.25$		*	*		%	
Gain vs Temperature <sup>(1)</sup>	$G = 1$ $G = 10$ $G = 100$ $G = 1000$		$\pm 5$	$\pm 10$	*	*	$\pm 20$	ppm/°C	
50k $\Omega$ Resistance <sup>(1)(2)</sup>			$\pm 25$	$\pm 100$	*	*	$\pm 100$	ppm/°C	
Nonlinearity			$\pm 0.0005$	$\pm 0.005$	*	*	$\pm 0.01$	% of FSR	
			$\pm 0.001$	$\pm 0.005$	*	*	$\pm 0.01$	% of FSR	
		$\pm 0.001$	$\pm 0.005$	*	*	$\pm 0.01$	% of FSR		
		$\pm 0.005$		*	*		% of FSR		
<b>GUARD OUTPUTS</b>									
Offset Voltage			$\pm 15$	$\pm 50$	*	*	*	mV	
Output Impedance			650		*	*		$\Omega$	
Current Drive			$+2/-0.05$		*	*		mA	
<b>OUTPUT</b>									
Voltage Positive	$R_L = 10\text{k}\Omega$	(V+) -1	(V+) -0.7		*	*		V	
Negative		(V-) +0.35	(V-) +0.2		*	*		V	
Load Capacitance Stability	$R_L = 10\text{k}\Omega$		1000		*	*		pF	
Short-Circuit Current			$\pm 5/-12$		*	*		mA	
<b>FREQUENCY RESPONSE</b>									
Bandwidth, -3dB	$G = 1$ $G = 10$ $G = 100$ $G = 1000$		800		*	*		kHz	
			500		*	*		kHz	
			70		*	*		kHz	
			7		*	*		kHz	
Slew Rate	$G = 10$ to $200$		0.8		*	*		V/ $\mu\text{s}$	
Settling Time, 0.01%	$10\text{V Step}$ , $G = 1$ $G = 10$ $G = 100$ $G = 1000$		22		*	*		$\mu\text{s}$	
			25		*	*		$\mu\text{s}$	
			145		*	*		$\mu\text{s}$	
			400		*	*		$\mu\text{s}$	
Output Overload Recovery	50% Overdrive		20		*	*		$\mu\text{s}$	
<b>POWER SUPPLY</b>									
Voltage Range		$\pm 4.5$	$\pm 15$	$\pm 18$	*	*	*	V	
Current	$V_{\text{IN}} = 0\text{V}$		$\pm 1$	$\pm 1.4$	*	*	*	mA	
<b>TEMPERATURE RANGE</b>									
Specification		-40		85	*	*	*	°C	
Operating		-40		125	*	*	*	°C	
$\theta_{\text{JA}}$			80		*	*	*	°C/W	

\* Specification same as INA118P

NOTE: (1) Guaranteed by wafer test. (2) Temperature coefficient of the "50k $\Omega$ " term in the gain equation.



INA116

## ANEXO B.5 AMPLIFICADOR OPERACIONAL OPA277.

**OPA277**  
**OPA2277**  
**OPA4277**

For most current data sheet and other product information, visit [www.burr-brown.com](http://www.burr-brown.com)

---

### High Precision OPERATIONAL AMPLIFIERS

---

#### FEATURES

- ULTRA LOW OFFSET VOLTAGE: 10 $\mu$ V
- ULTRA LOW DRIFT:  $\pm 0.1\mu$ V/ $^{\circ}$ C
- HIGH OPEN-LOOP GAIN: 134dB
- HIGH COMMON-MODE REJECTION: 140dB
- HIGH POWER SUPPLY REJECTION: 130dB
- LOW BIAS CURRENT: 1nA max
- WIDE SUPPLY RANGE:  $\pm 2$ V to  $\pm 18$ V
- LOW QUIESCENT CURRENT: 800 $\mu$ A/amp
- SINGLE, DUAL, AND QUAD VERSIONS
- REPLACES OP-07, OP-77, OP-177

#### APPLICATIONS

- TRANSDUCER AMPLIFIER
- BRIDGE AMPLIFIER
- TEMPERATURE MEASUREMENTS
- STRAIN GAGE AMPLIFIER
- PRECISION INTEGRATOR
- BATTERY POWERED INSTRUMENTS
- TEST EQUIPMENT

#### DESCRIPTION

The OPA277 series precision op amps replace the industry standard OP-177. They offer improved noise, wider output voltage swing, and are twice as fast with half the quiescent current. Features include ultra low offset voltage and drift, low bias current, high common-mode rejection, and high power supply rejection. Single, dual, and quad versions have identical specifications for maximum design flexibility.

OPA277 series op amps operate from  $\pm 2$ V to  $\pm 18$ V supplies with excellent performance. Unlike most op amps which are specified at only one supply voltage, the OPA277 series is specified for real-world applications; a single limit applies over the  $\pm 5$ V to  $\pm 15$ V supply range. High performance is maintained as the amplifiers swing to their specified limits. Because the initial offset voltage ( $\pm 20\mu$ V max) is so low, user adjustment is usually not required. However, the single version (OPA277) provides external trim pins for special applications.

OPA277 op amps are easy to use and free from phase inversion and overload problems found in some other op amps. They are stable in unity gain and provide excellent dynamic behavior over a wide range of load conditions. Dual and quad versions feature completely independent circuitry for lowest crosstalk and freedom from interaction, even when overdriven or overloaded.

Single (OPA277) and dual (OPA2277) versions are available in 8-pin DIP and SO-8 surface-mount packages. The quad (OPA4277) comes in 14-pin DIP and SO-14 surface-mount packages. All are fully specified from  $-40^{\circ}$ C to  $+85^{\circ}$ C and operate from  $-55^{\circ}$ C to  $+125^{\circ}$ C.

International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6730 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 746-1111  
 Fax: 910-652-1111 • Internet: <http://www.burr-brown.com/> • Cable: BBRCORP • Telex: 066-6491 • FAX: (520) 869-1510 • Immediate Product Info: (800) 549-6132

## SPECIFICATIONS: $V_S = \pm 5V$ to $V_S = \pm 15V$

At  $T_A = +25^\circ\text{C}$ , and  $R_L = 2\text{k}\Omega$ , unless otherwise noted.

**Boldface** limits apply over the specified temperature range,  $-40^\circ\text{C}$  to  $+85^\circ\text{C}$ .

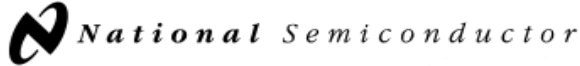
PARAMETER	CONDITION	OPA277P, U OPA2277P, U			OPA277PA, UA OPA2277PA, UA OPA4277PA, UA			UNITS	
		MIN	TYP <sup>(1)</sup>	MAX	MIN	TYP <sup>(1)</sup>	MAX		
<b>OFFSET VOLTAGE</b> Input Offset Voltage: $V_{OS}$ OPA277P, U (high grade, single) OPA2277P, U (high grade, dual) All PA, UA Versions Input Offset Voltage Over Temperature OPA277P, U (high grade, single) OPA2277P, U (high grade, dual) All PA, UA Versions Input Offset Voltage Drift $dV_{OS}/dT$ OPA277P, U (high grade, single) OPA2277P, U (high grade, dual) All PA, UA Versions Input Offset Voltage: (all models) vs Time vs Power Supply PSRR $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$ Channel Separation (dual, quad)	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$ $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$ $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$ $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$ $V_S = \pm 2V$ to $\pm 18V$ $V_S = \pm 2V$ to $\pm 18V$ dc		$\pm 10$ $\pm 10$	$\pm 20$ $\pm 25$		$\pm 20$ $\pm 50$		$\mu\text{V}$ $\mu\text{V}$ $\mu\text{V}$	
				$\pm 30$ $\pm 50$			$\pm 100$		$\mu\text{V}$ $\mu\text{V}$ $\mu\text{V}$
			$\pm 0.1$ $\pm 0.1$	$\pm 0.15$ $\pm 0.25$			$\pm 0.15$ $\pm 1$		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
			0.2 $\pm 0.3$	$\pm 0.5$ $\pm 0.5$		*	*	$\pm 1$ $\pm 1$	
<b>INPUT BIAS CURRENT</b> Input Bias Current $I_B$ $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$ Input Offset Current $I_{OS}$ $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$			$\pm 0.5$ $\pm 1$ $\pm 0.5$	$\pm 1$ $\pm 2$ $\pm 1$ $\pm 2$		*	$\pm 2.8$ $\pm 4$ $\pm 2.8$ $\pm 4$	nA nA nA nA	
<b>NOISE</b> Input Voltage Noise, $f = 0.1$ to $10\text{Hz}$ Input Voltage Noise Density, $f = 10\text{Hz}$ $e_n$ $f = 100\text{Hz}$ $f = 1\text{kHz}$ $f = 10\text{kHz}$ Current Noise Density, $f = 1\text{kHz}$ $i_n$			0.22 0.035 12 8 8 8			*	*	$\mu\text{Vp-p}$ $\mu\text{Vrms}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$	
<b>INPUT VOLTAGE RANGE</b> Common-Mode Voltage Range $V_{CM}$ Common-Mode Rejection CMRR $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$	$V_{CM} = (V-) + 2V$ to $(V+) - 2V$ $V_{CM} = (V-) + 2V$ to $(V+) - 2V$	$(V-) + 2$ 130 128	140	$(V+) - 2$	*	115 115	*	V dB dB	
<b>INPUT IMPEDANCE</b> Differential Common-Mode	$V_{CM} = (V-) + 2V$ to $(V+) - 2V$		100    3 250    3			*	*	M $\Omega$    pF G $\Omega$    pF	
<b>OPEN-LOOP GAIN</b> Open-Loop Voltage Gain $A_{OL}$ $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$	$V_O = (V-) + 0.5V$ to $(V+) - 1.2V$ , $R_L = 10\text{k}\Omega$ $V_O = (V-) + 0.5V$ to $(V+) - 1.5V$ , $R_L = 2\text{k}\Omega$ $V_O = (V-) + 0.5V$ to $(V+) - 1.5V$ , $R_L = 2\text{k}\Omega$	126 126	140 134		*	*	*	dB dB dB	
<b>FREQUENCY RESPONSE</b> Gain-Bandwidth Product GBW Slew Rate SR Settling Time, 0.1% 0.01% Overload Recovery Time Total Harmonic Distortion + Noise THD+N	$V_S = \pm 15V$ , $G = 1$ , 10V Step $V_S = \pm 15V$ , $G = 1$ , 10V Step $V_{OH} \cdot G = V_S$ 1kHz, $G = 1$ , $V_O = 3.5\text{Vrms}$		1 0.8 14 16 3 0.002			*	*	MHz V/ $\mu\text{s}$ $\mu\text{s}$ $\mu\text{s}$ $\mu\text{s}$ %	
<b>OUTPUT</b> Voltage Output $V_O$ $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$ $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$ Short-Circuit Current $I_{SC}$ Capacitive Load Drive $C_{LOAD}$	$R_L = 10\text{k}\Omega$ $R_L = 10\text{k}\Omega$ $R_L = 2\text{k}\Omega$ $R_L = 2\text{k}\Omega$	$(V-) + 0.5$ $(V-) + 0.5$ $(V-) + 1.5$ $(V-) + 1.5$	$\pm 35$	$(V+) - 1.2$ $(V+) - 1.2$ $(V+) - 1.5$ $(V+) - 1.5$	*	*	*	V V V V mA	
			See Typical Curve		*	*	*		

The information provided herein is believed to be reliable; however, BURR-BROWN assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. BURR-BROWN assumes no responsibility for the use of this information, and all use of such information shall be entirely at the user's own risk. Prices and specifications are subject to change without notice. No patent rights or licenses to any of the circuits described herein are implied or granted to any third party. BURR-BROWN does not authorize or warrant any BURR-BROWN product for use in life support devices and/or systems.



OPA277, 2277, 4277

## ANEXO B.6 TRANSDUCTOR DE TEMPERATURA LM35.



November 2000

### LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

#### General Description

The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, whose output voltage is linearly proportional to the Celsius (Centigrade) temperature. The LM35 thus has an advantage over linear temperature sensors calibrated in ° Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from its output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of  $\pm 1/4^\circ\text{C}$  at room temperature and  $\pm 3/4^\circ\text{C}$  over a full  $-55$  to  $+150^\circ\text{C}$  temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The LM35's low output impedance, linear output, and precise inherent calibration make interfacing to readout or control circuitry especially easy. It can be used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As it draws only  $60\ \mu\text{A}$  from its supply, it has very low self-heating, less than  $0.1^\circ\text{C}$  in still air. The LM35 is rated to operate over a  $-55^\circ$  to  $+150^\circ\text{C}$  temperature range, while the LM35C is rated for a  $-40^\circ$  to  $+110^\circ\text{C}$  range ( $-10^\circ$  with improved accuracy). The LM35 series is available pack-

aged in hermetic TO-46 transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface mount small outline package and a plastic TO-220 package.

#### Features

- Calibrated directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear + 10.0 mV/°C scale factor
- 0.5°C accuracy guaranteeable (at +25°C)
- Rated for full  $-55^\circ$  to  $+150^\circ\text{C}$  range
- Suitable for remote applications
- Low cost due to wafer-level trimming
- Operates from 4 to 30 volts
- Less than  $60\ \mu\text{A}$  current drain
- Low self-heating,  $0.08^\circ\text{C}$  in still air
- Nonlinearity only  $\pm 1/4^\circ\text{C}$  typical
- Low impedance output,  $0.1\ \Omega$  for 1 mA load

#### Typical Applications

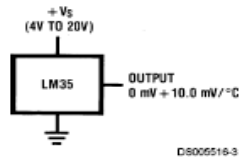
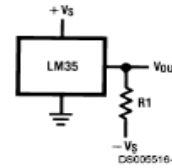


FIGURE 1. Basic Centigrade Temperature Sensor  
( $+2^\circ\text{C}$  to  $+150^\circ\text{C}$ )



Choose  $R_1 = -V_S/50\ \mu\text{A}$   
 $V_{OUT} = +1,500\ \text{mV}$  at  $+150^\circ\text{C}$   
 $= +250\ \text{mV}$  at  $+25^\circ\text{C}$   
 $= -550\ \text{mV}$  at  $-55^\circ\text{C}$

FIGURE 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor

### Absolute Maximum Ratings (Note 10)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	+35V to -0.2V
Output Voltage	+6V to -1.0V
Output Current	10 mA
Storage Temp.:	
TO-46 Package,	-60°C to +180°C
TO-92 Package,	-60°C to +150°C
SO-8 Package,	-65°C to +150°C
TO-220 Package,	-65°C to +150°C
Lead Temp.:	
TO-46 Package,	
(Soldering, 10 seconds)	300°C

TO-92 and TO-220 Package, (Soldering, 10 seconds)	260°C
SO Package (Note 12)	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C
ESD Susceptibility (Note 11)	2500V
Specified Operating Temperature Range: $T_{MIN}$ to $T_{MAX}$ (Note 2)	
LM35, LM35A	-55°C to +150°C
LM35C, LM35CA	-40°C to +110°C
LM35D	0°C to +100°C

### Electrical Characteristics

(Notes 1, 6)

Parameter	Conditions	LM35A			LM35CA			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	$\pm 0.2$	$\pm 0.5$		$\pm 0.2$	$\pm 0.5$		°C
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	$\pm 0.3$			$\pm 0.3$		$\pm 1.0$	°C
	$T_A = T_{MAX}$	$\pm 0.4$	$\pm 1.0$		$\pm 0.4$	$\pm 1.0$		°C
	$T_A = T_{MIN}$	$\pm 0.4$	$\pm 1.0$		$\pm 0.4$		$\pm 1.5$	°C
Nonlinearity (Note 8)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	$\pm 0.18$		$\pm 0.35$	$\pm 0.15$		$\pm 0.3$	°C
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	+10.0	+9.9, +10.1		+10.0		+9.9, +10.1	mV/°C
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1$ mA	$T_A = +25^\circ\text{C}$	$\pm 0.4$	$\pm 1.0$		$\pm 0.4$	$\pm 1.0$		mV/mA
	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	$\pm 0.5$		$\pm 3.0$	$\pm 0.5$		$\pm 3.0$	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	$\pm 0.01$	$\pm 0.05$		$\pm 0.01$	$\pm 0.05$		mV/V
	$4V \leq V_S \leq 30V$	$\pm 0.02$		$\pm 0.1$	$\pm 0.02$		$\pm 0.1$	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5V, +25^\circ\text{C}$	56	67		56	67		μA
	$V_S = +5V$	105		131	91		114	μA
	$V_S = +30V, +25^\circ\text{C}$	56.2	68		56.2	68		μA
	$V_S = +30V$	105.5		133	91.5		116	μA
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4V \leq V_S \leq 30V, +25^\circ\text{C}$	0.2	1.0		0.2	1.0		μA
	$4V \leq V_S \leq 30V$	0.5		2.0	0.5		2.0	μA
Temperature Coefficient of Quiescent Current		+0.39		+0.5	+0.39		+0.5	μA/°C
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of <i>Figure 1</i> , $I_L = 0$	+1.5		+2.0	+1.5		+2.0	°C
Long Term Stability	$T_J = T_{MAX}$ , for 1000 hours	$\pm 0.08$			$\pm 0.08$			°C

## Electrical Characteristics

(Notes 1, 6)

Parameter	Conditions	LM35			LM35C, LM35D			Units (Max.)
		Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	Typical	Tested Limit (Note 4)	Design Limit (Note 5)	
Accuracy, LM35, LM35C (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	$\pm 0.4$	$\pm 1.0$		$\pm 0.4$	$\pm 1.0$		$^\circ\text{C}$
	$T_A = -10^\circ\text{C}$	$\pm 0.5$			$\pm 0.5$		$\pm 1.5$	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$	$\pm 0.8$	$\pm 1.5$		$\pm 0.8$		$\pm 1.5$	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MIN}}$	$\pm 0.8$		$\pm 1.5$	$\pm 0.8$		$\pm 2.0$	$^\circ\text{C}$
Accuracy, LM35D (Note 7)	$T_A = +25^\circ\text{C}$				$\pm 0.6$	$\pm 1.5$		$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MAX}}$				$\pm 0.9$		$\pm 2.0$	$^\circ\text{C}$
	$T_A = T_{\text{MIN}}$				$\pm 0.9$		$\pm 2.0$	$^\circ\text{C}$
Nonlinearity (Note 8)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	$\pm 0.3$		$\pm 0.5$	$\pm 0.2$		$\pm 0.5$	$^\circ\text{C}$
Sensor Gain (Average Slope)	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	$+10.0$	$+9.8,$ $+10.2$		$+10.0$		$+9.8,$ $+10.2$	mV/ $^\circ\text{C}$
Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1$ mA	$T_A = +25^\circ\text{C}$	$\pm 0.4$	$\pm 2.0$		$\pm 0.4$	$\pm 2.0$		mV/mA
	$T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$	$\pm 0.5$		$\pm 5.0$	$\pm 0.5$		$\pm 5.0$	mV/mA
Line Regulation (Note 3)	$T_A = +25^\circ\text{C}$	$\pm 0.01$	$\pm 0.1$		$\pm 0.01$	$\pm 0.1$		mV/V
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	$\pm 0.02$		$\pm 0.2$	$\pm 0.02$		$\pm 0.2$	mV/V
Quiescent Current (Note 9)	$V_S = +5\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56	80		56	80		$\mu\text{A}$
	$V_S = +5\text{V}$	<b>105</b>		<b>158</b>	<b>91</b>		<b>138</b>	$\mu\text{A}$
	$V_S = +30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	56.2	82		56.2	82		$\mu\text{A}$
	$V_S = +30\text{V}$	<b>105.5</b>		<b>161</b>	<b>91.5</b>		<b>141</b>	$\mu\text{A}$
Change of Quiescent Current (Note 3)	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}, +25^\circ\text{C}$	0.2	2.0		0.2	2.0		$\mu\text{A}$
	$4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$	<b>0.5</b>		<b>3.0</b>	<b>0.5</b>		<b>3.0</b>	$\mu\text{A}$
Temperature Coefficient of Quiescent Current		$+0.39$		$+0.7$	$+0.39$		$+0.7$	$\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
Minimum Temperature for Rated Accuracy	In circuit of Figure 1, $I_L = 0$	$+1.5$		$+2.0$	$+1.5$		$+2.0$	$^\circ\text{C}$
Long Term Stability	$T_J = T_{\text{MAX}}$ , for 1000 hours	$\pm 0.08$			$\pm 0.08$			$^\circ\text{C}$

**Note 1:** Unless otherwise noted, these specifications apply:  $-55^\circ\text{C} \leq T_J \leq +150^\circ\text{C}$  for the LM35 and LM35A;  $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq +110^\circ\text{C}$  for the LM35C and LM35CA; and  $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +100^\circ\text{C}$  for the LM35D.  $V_S = +5\text{Vdc}$  and  $I_{\text{LOAD}} = 50 \mu\text{A}$ , in the circuit of Figure 2. These specifications also apply from  $+2^\circ\text{C}$  to  $T_{\text{MAX}}$  in the circuit of Figure 1. Specifications in **boldface** apply over the full rated temperature range.

**Note 2:** Thermal resistance of the TO-46 package is  $400^\circ\text{C}/\text{W}$ , junction to ambient, and  $24^\circ\text{C}/\text{W}$  junction to case. Thermal resistance of the TO-92 package is  $180^\circ\text{C}/\text{W}$  junction to ambient. Thermal resistance of the small outline molded package is  $220^\circ\text{C}/\text{W}$  junction to ambient. Thermal resistance of the TO-220 package is  $90^\circ\text{C}/\text{W}$  junction to ambient. For additional thermal resistance information see table in the Applications section.

**Note 3:** Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output due to heating effects can be computed by multiplying the internal dissipation by the thermal resistance.

**Note 4:** Tested Limits are guaranteed and 100% tested in production.

**Note 5:** Design Limits are guaranteed (but not 100% production tested) over the indicated temperature and supply voltage ranges. These limits are not used to calculate outgoing quality levels.

**Note 6:** Specifications in **boldface** apply over the full rated temperature range.

**Note 7:** Accuracy is defined as the error between the output voltage and  $10\text{mV}/^\circ\text{C}$  times the device's case temperature, at specified conditions of voltage, current, and temperature (expressed in  $^\circ\text{C}$ ).

**Note 8:** Nonlinearity is defined as the deviation of the output-voltage-versus-temperature curve from the best-fit straight line, over the device's rated temperature range.

**Note 9:** Quiescent current is defined in the circuit of Figure 1.

**Note 10:** Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its rated operating conditions. See Note 1.

**Note 11:** Human body model,  $100 \text{ pF}$  discharged through a  $1.5 \text{ k}\Omega$  resistor.

**Note 12:** See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" or the section titled "Surface Mount" found in a current National Semiconductor Linear Data Book for other methods of soldering surface mount devices.

## ANEXO B.7 PUENTE H L298N.



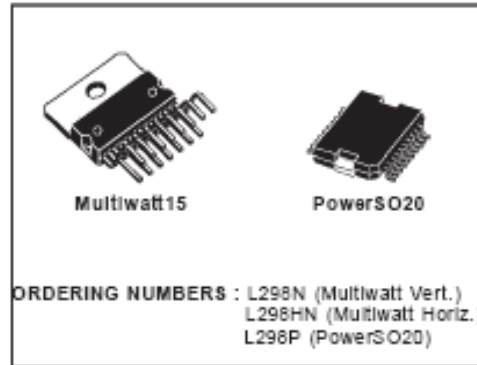
L298

### DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

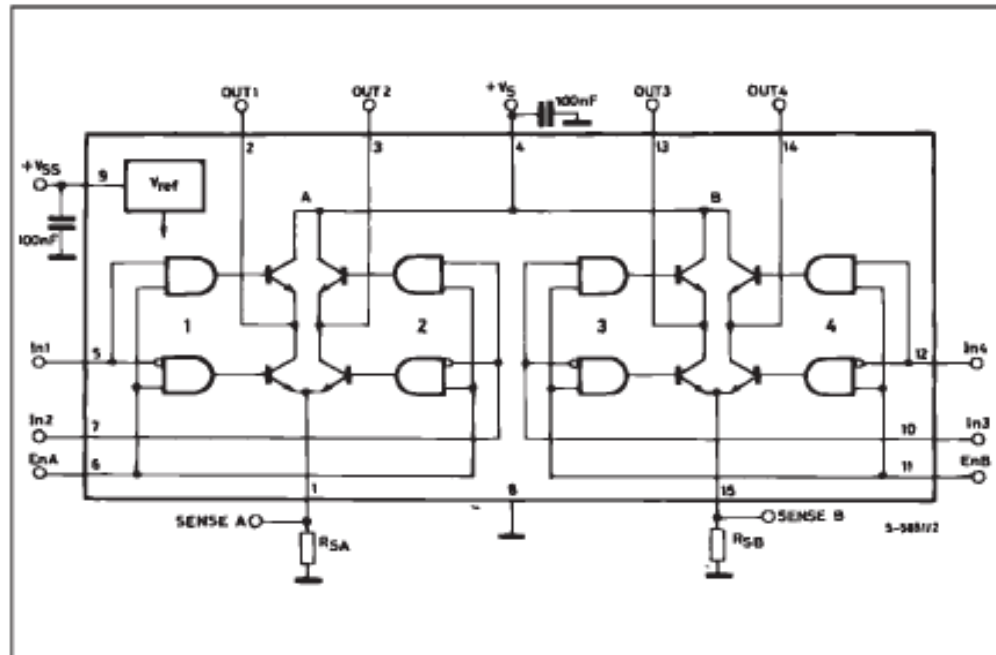
#### DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

#### BLOCK DIAGRAM

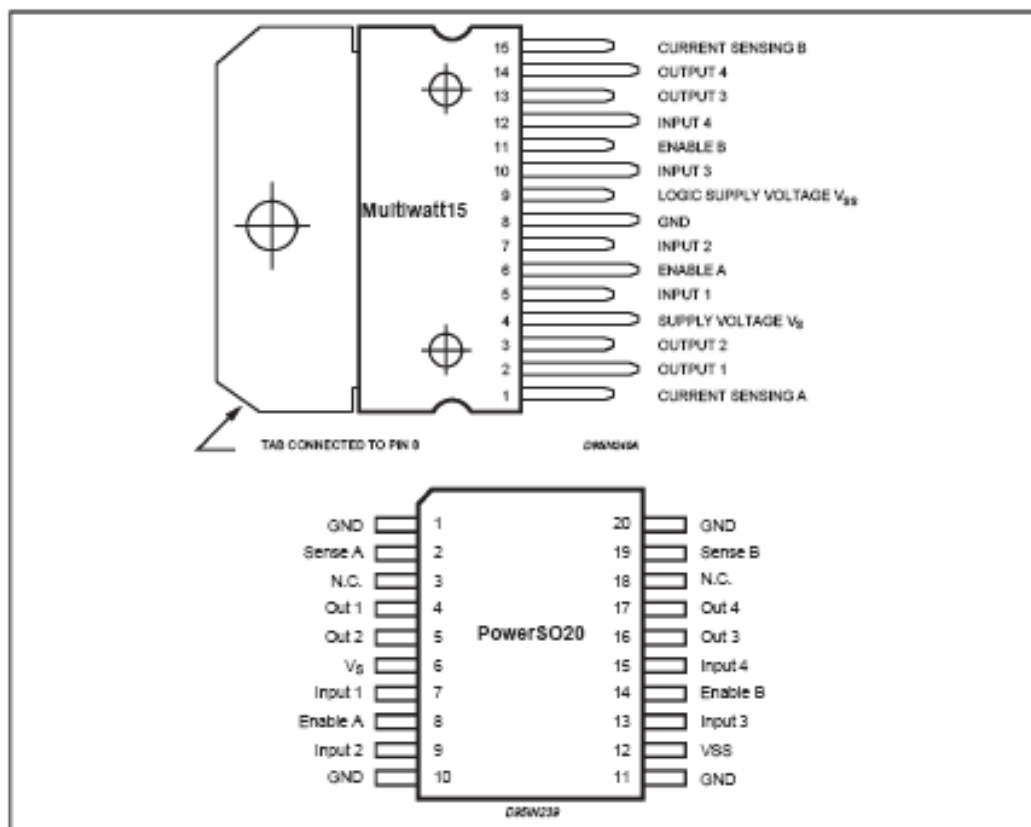


## L298

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_S$	Power Supply	50	V
$V_{SS}$	Logic Supply Voltage	7	V
$V_i, V_{en}$	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
$I_O$	Peak Output Current (each Channel)		
	- Non Repetitive ( $t = 100\mu s$ )	3	A
	- Repetitive (80% on -20% off; $t_{on} = 10ms$ )	2.5	A
	-DC Operation	2	A
$V_{sena}$	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
$P_{tot}$	Total Power Dissipation ( $T_{case} = 75^\circ C$ )	25	W
$T_{op}$	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^\circ C$
$T_{stg}, T_j$	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^\circ C$

### PIN CONNECTIONS (top view)



### THERMAL DATA

Symbol	Parameter		PowerSO20	Multiwatt15	Unit
$R_{th(j-case)}$	Thermal Resistance Junction-case	Max.	-	3	$^\circ C/W$
$R_{th(j-amb)}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max.	13 (*)	35	$^\circ C/W$

(\*) Mounted on aluminum substrate

## ANEXO B.8 REFERENCIA DE VOLTAJE REF102



REF102

### Precision VOLTAGE REFERENCE

#### FEATURES

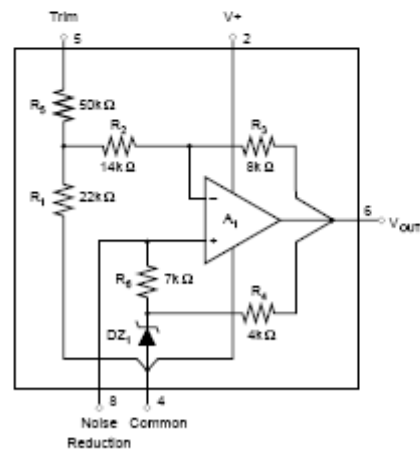
- +10V  $\pm 0.0025V$  OUTPUT
- VERY LOW DRIFT: 2.5ppm/ $^{\circ}C$  max
- EXCELLENT STABILITY: 5ppm/1000hr typ
- EXCELLENT LINE REGULATION: 1ppm/V max
- EXCELLENT LOAD REGULATION: 10ppm/mA max
- LOW NOISE: 5 $\mu$ Vp-p typ, 0.1Hz to 10Hz
- WIDE SUPPLY RANGE: 11.4VDC to 36VDC
- LOW QUIESCENT CURRENT: 1.4mA max
- PACKAGE OPTIONS: HERMETIC TO-99, PLASTIC DIP, SOIC

#### APPLICATIONS

- PRECISION-CALIBRATED VOLTAGE STANDARD
- D/A AND A/D CONVERTER REFERENCE
- PRECISION CURRENT REFERENCE
- ACCURATE COMPARATOR THRESHOLD REFERENCE
- DIGITAL VOLTMETERS
- TEST EQUIPMENT
- PC-BASED INSTRUMENTATION

#### DESCRIPTION

The REF102 is a precision 10V voltage reference. The drift is laser-trimmed to 2.5ppm/ $^{\circ}C$  max (CM grade) over the industrial temperature range and 5ppm/ $^{\circ}C$  max (SM grade) over the military temperature range. The REF102 achieves its precision without a heater. This results in low power, fast warm-up, excellent stability, and low noise. The output voltage is extremely insensitive to both line and load variations and can be externally adjusted with minimal effect on drift and stability. Single supply operation from 11.4V to 36V and excellent overall specifications make the REF102 an ideal choice for demanding instrumentation and system reference applications.



# SPECIFICATIONS

## ELECTRICAL

At  $T_A = +25^\circ\text{C}$  and  $V_S = +15\text{V}$  power supply, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	REF102A, R			REF102B, S			REF102C, M			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
OUTPUT VOLTAGE Initial vs Temperature <sup>(1)</sup> vs Supply (Line Regulation) vs Output Current (Load Regulation) vs Time M Package P, U Packages <sup>(2)</sup> Trim Range <sup>(3)</sup> Capacitive Load, max	$T_A = 25^\circ\text{C}$  $V_S = 11.4\text{V to }36\text{V}$  $I_L = 0\text{mA to }+10\text{mA}$ $I_L = 0\text{mA to }-5\text{mA}$ $T_A = 25^\circ$	9.99		10.01	9.995		10.005	9.9975		10.0025	V
					10		5			2.5	ppm/°C
					2		1			1	ppm/V
					20		10			10	ppm/mA
					40		20			20	ppm/mA
					5		*			*	ppm/1000hr
			20		*			*	ppm/1000hr		
		±3			*			*		%	
			1000		*			*		pF	
NOISE	(0.1Hz to 10Hz)		5		*			*		μVp-p	
OUTPUT CURRENT		+10, -5			*			*		mA	
INPUT VOLTAGE RANGE		+11.4		+36	*		*	*		V	
QUIESCENT CURRENT	( $I_{out} = 0$ )			+1.4			*		*	mA	
WARM-UP TIME <sup>(4)</sup>	(To 0.1%)		15		*			*		μs	
TEMPERATURE RANGE Specification REF102A, B, C REF102R, S											
		-25		+85	*		*	*		°C	
		-55		+125	*		*	*		°C	

\* Specifications same as REF102AR.

NOTES: (1) The "box" method is used to specify output voltage drift vs temperature. See the Discussion of Performance section. (2) Typically 5ppm/1000hrs after 168hr powered stabilization. (3) Trimming the offset voltage affects drift slightly. See Installation and Operating Instructions for details. (4) With noise reduction pin floating. See Typical Performance Curves for details.

The information provided herein is believed to be reliable; however, BURR-BROWN assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. BURR-BROWN assumes no responsibility for the use of this information, and all use of such information shall be entirely at the user's own risk. Prices and specifications are subject to change without notice. No patent rights or licenses to any of the circuits described herein are implied or granted to any third party. BURR-BROWN does not authorize or warrant any BURR-BROWN product for use in life support devices and/or systems.

## **ANEXO C. NORMAS ASTM**

En este anexo se presentan apartes de las normas internacionales de **American Society for Testing and Materials ASTM**, tenidas en cuenta para la realización de este trabajo de grado; estas son:

- **ANEXO C.1 NORMA ASTM D4541-02 Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers.**
- **ANEXO C.2. NORMA ASTM C633-01 Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings.**
- **ANEXO C.3. NORMA ASTM 6251-01 Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding.**

# ANEXO C.1 NORMA ASTM D4541-02



Designation: D 4541 – 02

## Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 4541; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope

1.1 This test method covers a procedure for evaluating the pull-off strength (commonly referred to as adhesion) of a coating on rigid substrates such as metal, concrete or wood. The test determines either the greatest perpendicular force (in tension) that a surface area can bear before a plug of material is detached, or whether the surface remains intact at a prescribed force (pass/fail). Failure will occur along the weakest plane within the system comprised of the test fixture, adhesive, coating system, and substrate, and will be exposed by the fracture surface. This test method maximizes tensile stress as compared to the shear stress applied by other methods, such as scratch or knife adhesion, and results may not be comparable.

1.2 Pull-off strength measurements depend upon both material and instrumental parameters. Results obtained by each test method may give different results. Results should only be assessed for each test method and not be compared with other instruments. There are five instrument types, identified as Test Methods A-E. It is imperative to identify the test method used when reporting results.

1.3 This test method uses a class of apparatus known as portable pull-off adhesion testers.<sup>2</sup> They are capable of applying a concentric load and counter load to a single surface so that coatings can be tested even though only one side is accessible. Measurements are limited by the strength of adhesion bonds between the loading fixture and the specimen surface or the cohesive strengths of the adhesive, coating layers, and substrate.

1.4 This test can be destructive and spot repairs may be necessary.

1.5 The values stated in MPa (inch-pound) units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appro-*

*priate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

D 2651 Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding<sup>3</sup>

D 3933 Guide for Preparation of Aluminum Surfaces for Structural Adhesives Bonding (Phosphoric Acid Anodizing)<sup>3</sup>

D 3980 Practice for Interlaboratory Testing of Paint and Related Materials<sup>4</sup>

#### 2.2 ANSI Standard:

N512 Protective Coatings (Paints) for the Nuclear Industry<sup>5</sup>

#### 2.3 ISO Standard:

4624 Paints and Varnish—Pull-Off Test for Adhesion<sup>5</sup>

### 3. Summary of Test Method

3.1 The general pull-off test is performed by securing a loading fixture (dolly, stud) normal (perpendicular) to the surface of the coating with an adhesive. After the adhesive is cured, a testing apparatus is attached to the loading fixture and aligned to apply tension normal to the test surface. The force applied to the loading fixture is then gradually increased and monitored until either a plug of material is detached, or a specified value is reached. When a plug of material is detached, the exposed surface represents the plane of limiting strength within the system. The nature of the failure is qualified in accordance with the percent of adhesive and cohesive failures, and the actual interfaces and layers involved. The pull-off strength is computed based on the maximum indicated load, the instrument calibration data, and the original surface area stressed. Pull-off strength results obtained using different devices may be different because the results depend on instrumental parameters (see Appendix X1).

### 4. Significance and Use

4.1 The pull-off strength of a coating is an important performance property that has been used in specifications. This

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D01 on Paint and Related Coatings, Materials, and Applications and is the direct responsibility of Subcommittee D01.46 on Industrial Protective Coatings.

Current edition approved Feb. 10, 2002. Published April 2002. Originally published as D 4541 – 93. Last previous edition D 4541 – 95<sup>1</sup>.

<sup>2</sup> The term adhesion tester may be somewhat of a misnomer, but its adoption by two manufacturers and at least two patents indicates continued usage.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.06.

<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 06.01.

<sup>5</sup> Available from American National Standards Institute, 11 W. 42nd St., 13th Floor, New York, NY 10036.

test method serves as a means for uniformly preparing and testing coated surfaces, and evaluating and reporting the results. This test method is applicable to any portable apparatus meeting the basic requirements for determining the pull-off strength of a coating.

4.2 Variations in results obtained using different devices or different substrates with the same coating are possible (see Appendix X1). Therefore, it is recommended that the type of apparatus and the substrate be mutually agreed upon between the interested parties.

4.3 The purchaser or specifier shall designate a specific test method, that is, A, B, C, D or E, when calling out this standard.

## 5. Apparatus

5.1 *Adhesion Tester*, commercially available, or comparable apparatus specific examples of which are listed in Annex A1-Annex A5.

5.1.1 *Loading Fixtures*, having a flat surface on one end that can be adhered to the coating and a means of attachment to the tester on the other end.

5.1.2 *Detaching Assembly* (adhesion tester), having a central grip for engaging the fixture.

5.1.3 *Base*, on the detaching assembly, or an annular bearing ring if needed for uniformly pressing against the coating surface around the fixture either directly, or by way of an intermediate bearing ring. A means of aligning the base is needed so that the resultant force is normal to the surface.

5.1.4 Means of moving the grip away from the base in as smooth and continuous a manner as possible so that a torsion free, co-axial (opposing pull of the grip and push of the base along the same axis) force results between them.

5.1.5 *Timer*, or means of limiting the rate of stress to less than 1 MPa/s (150 psi/s) so that the maximum stress is obtained in less than about 100 s. A timer is the minimum equipment when used by the operator along with the force indicator in 5.1.6.

NOTE 1—Obtaining the maximum stress in 100 s or less by keeping the maximum rate of shear to less than 1 MPa/s (150 psi/s) is valid for the levels of pull-off strength measured with these types of apparatuses.

5.1.6 *Force Indicator and Calibration Information*, for determining the actual force delivered to the loading fixture.

5.2 *Solvent*, or other means for cleaning the loading fixture surface. Finger prints, moisture, and oxides tend to be the primary contaminants.

5.3 *Fine Sandpaper*, or other means of cleaning the coating that will not alter its integrity by chemical or solvent attack. If any light sanding is anticipated, choose only a very fine grade abrasive (400 grit or finer) that will not introduce flaws or leave a residue.

5.4 *Adhesive*, for securing the fixture to the coating that does

not affect the coating properties. Two component epoxies<sup>6</sup> and acrylics<sup>7</sup> have been found to be the most versatile.

5.5 *Magnetic or Mechanical Clamps*, if needed, for holding the fixture in place while the adhesive cures.

5.6 *Cotton Swabs*, or other means for removing excess adhesive and defining the adhered area. Any method for removing excess adhesive that damages the surface, such as scoring (see 6.7), must generally be avoided since induced surface flaws may cause premature failure of the coating.

5.7 *Circular Hole Cutter* (optional), to score through to the substrate around the loading fixture.

## 6. Test Preparation

6.1 The method for selecting the coating sites to be prepared for testing depends upon the objectives of the test and agreements between the contracting parties. There are, however, a few physical restrictions imposed by the general method and apparatus. The following requirements apply to all sites:

6.1.1 The selected test area must be a flat surface large enough to accommodate the specified number of replicate tests. The surface may have any orientation with reference to gravitational pull. Each test site must be separated by at least the distance needed to accommodate the detaching apparatus. The size of a test site is essentially that of the secured loading fixture. At least three replications are usually required in order to statistically characterize the test area.

6.1.2 The selected test areas must also have enough perpendicular and radial clearance to accommodate the apparatus, be flat enough to permit alignment, and be rigid enough to support the counter force. It should be noted that measurements close to an edge may not be representative of the coating as a whole.

6.2 Since the rigidity of the substrate affects pull-off strength results and is not a controllable test variable in field measurements, some knowledge of the substrate thickness and composition should be reported for subsequent analysis or laboratory comparisons. For example, steel substrate of less than 3.2 mm ( $\frac{1}{8}$ -in.) thickness usually reduce pull-off strength results compared to 6.4 mm ( $\frac{1}{4}$ -in.) thick steel substrates.

6.3 Subject to the requirements of 6.1, select representative test areas and clean the surfaces in a manner that will not affect integrity of the coating or leave a residue. Surface abrasion may introduce flaws and should generally be avoided. A fine abrasive (see 5.3) should only be used if needed to remove loose or weakly adhered surface contaminants.

6.4 Clean the loading fixture surface as indicated by the apparatus manufacturer. Failures at the fixture-adhesive interface can often be avoided by treating the fixture surfaces in accordance with an appropriate ASTM standard practice for preparing metal surfaces for adhesive bonding.

NOTE 2—Guides D 2651 and D 3933 are typical of well-proven methods for improving adhesive bond strengths to metal surfaces.

<sup>6</sup> Araldite Adhesive, available from Ciba-Geigy Plastics, Duxford, Cambridge, CB2 4QA, England, Hysol Epoxy Patch Kit 907, available from Hysol Div., The Dexter Corp., Willow Pass Rd., Pittsburg, CA 94565, and Scotch Weld Adhesive 1838B/A, available from 3M, Adhesives, Coatings and Sealers Div., 3M Center, St. Paul, MN 55144, have been found satisfactory for this purpose.

<sup>7</sup> Versiloc 201 and 204 with accelerator, available from Lord Corp., Industrial Adhesive Div., 2000 W. Grandview Blvd., P.O. Box 10038, Erie, PA 16514, have been found satisfactory for this purpose.

# ANEXO C.2. NORMA ASTM C633-01



Designation: C 633 – 01

## Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation C 633; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

### 1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the degree of adhesion (bonding strength) of a coating to a substrate or the cohesion strength of the coating in a tension normal to the surface. The test consists of coating one face of a substrate fixture, bonding this coating to the face of a loading fixture, and subjecting this assembly of coating and fixtures to a tensile load normal to the plane of the coating. It is adapted particularly for testing coatings applied by thermal spray, which is defined to include the combustion flame, plasma arc, two-wire arc, high-velocity oxygen fuel, and detonation processes for spraying feedstock, which may be in the form of, wire, rod, or powder.

NOTE 1—Thermal spray coating materials include ceramics, such as metal oxides or carbides, and metals. In some cases, a coating is formed of different spray materials, such as an oxide layer sprayed onto a sprayed metal-bonding layer. The substrate generally is a metal, but may be a ceramic, such as an oxide or graphite.

1.2 Usually this test method is performed at ambient temperature. Higher temperature testing is restricted by the need for a suitable adhesive bonding agent. For certain fundamental investigations, it is suggested that very low (cryogenic) temperature be used.

1.3 This test method is limited to testing thermal spray coatings that can be applied in thickness greater than 0.015 in. (0.38 mm). The limitation is imposed because an adhesive bonding agent is used in the test. Those bonding agents established so far for this method tend to penetrate thermal spray coatings and may invalidate results unless the coatings are thick enough to prevent penetration through the coating. Further development may establish that thin layers of certain types of especially dense coatings may be tested satisfactorily. Alternatively, new adhesive bonding agents that would allow reduction of the minimum thickness limitation may become available.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appro-*

*priate safety and health limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines<sup>2</sup>

### 3. Significance and Use

3.1 This test method is recommended for quality control, acceptance testing; or it may help to develop or qualify a thermal spray operator's equipment and procedure or to aid in developing thermal spray coatings with improved adhesion and integrity.

3.2 This test method is useful for comparing adhesion or cohesion strengths of coatings of similar types of thermal spray materials. The test should not be considered to provide an intrinsic value for direct use in making calculations, such as to determine if a coating will withstand specific environmental stresses. Because of residual stresses in thermal spray coatings, actual strength depends upon the shape of the particular coated part. Also, in use, a coating may be stressed in a more complex manner than is practical for a standard test.

### 4. Apparatus

4.1 A tension testing machine shall conform to the requirements of Practices E 4. The loads used in determining the adhesion or tensile strength shall be within the loading range of the testing machine, as defined in Practices E 4. Permissible variation shall be less than 1.0 %. It shall be possible to apply increasing tensile load at a constant rate of cross-head travel between 0.030 in./min (0.013 mm/s) and 0.050 in./min (0.021 mm/s). The machine shall include a load-indicating device that registers the maximum load applied before rupture occurs.

4.2 Self-aligning devices, for applying the tensile load to the assembly of the coating and fixtures, shall not permit eccentric load or bending moment to the specimen. Self-alignment is often provided by the manufacturer as an integral part of the testing machine. An alternative, satisfactory apparatus is shown in Fig. 1, which also shows methods of connecting the self-aligning apparatus to an assembled test specimen.

### 5. Material

5.1 *Adhesive Bonding Agent*—A suitable adhesive bonding

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee B08 on Metallic and Inorganic Coatings and is the direct responsibility of Subcommittee B08.12 on Materials for Porcelain Enamel and Ceramic-Metal Systems.

Current edition approved March 10, 2001. Published July 2001. Originally published as C 633 – 69. Last previous edition C 633 – 79 (1999).

<sup>2</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

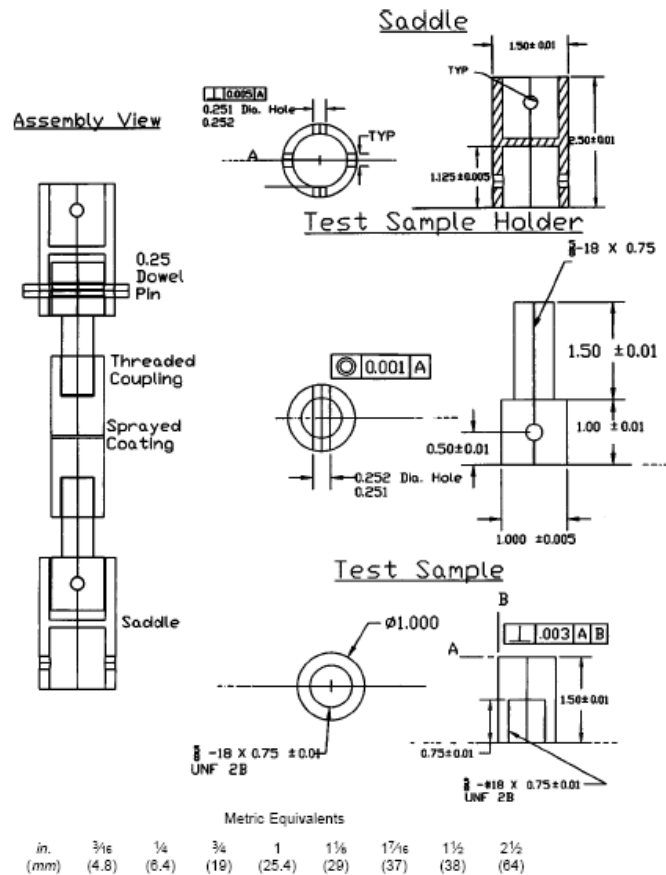


FIG. 1 Self-Aligning Device

agent shall be agreed between the purchaser and manufacturer of the coating and shall meet the following requirements.<sup>3</sup>

5.1.1 The bonding agent shall be capable of bonding the coating to the loading fixture with a tensile strength that is at least as great as the minimum required adhesion and cohesion strength of the coating.

5.1.2 The bonding agent shall be sufficiently viscous not to penetrate through a 0.015-in. (0.38-mm) thickness of the coating. Certain commercial resins that cure or harden at room temperature by means of a curing agent have been proven satisfactory. If any other bonding agent is to be used, it shall first be compared with a proven bonding agent using this test method with the desired thermal spray coating.

NOTE 2—Thermal spray coatings may have an inherent porosity. Excessive penetration of the adhesive bonding agent into this porosity may affect the results determined by this test method. Unless proved

satisfactory by comparison testing, any agent requiring elevated temperature for curing should be avoided because viscosity may decrease at high temperature, allowing penetration.

NOTE 3—When liquid epoxy bonding agents are used, there should be a procedure in place to ensure relatively consistent thickness on every sample.

5.1.3 The adhesion strength of the bonding agent shall be determined each time this test method is performed. This shall be done by using the bonding agent to attach a loading fixture to a second loading fixture, in accordance with 6.5, except that the coated substrate fixture of 6.5 is replaced with the second loading fixture.

NOTE 4—One reason for testing the bonding agent each time is to detect improper preparation of the agent if it is a two-part mix. Another reason is that adhesion strength generally decreases with age of the unused agent. If strength is lower than required, more adhesive bonding agent shall be prepared and tested, or the agent shall be discarded and replaced.

## 6. Test Specimens

6.1 *Substrate and Loading Fixtures*—Each test specimen is an assembly comprising a substrate fixture, to which the

<sup>3</sup> A list of satisfactory bonding agents is provided in the annex which follows this standard.

coating is applied, and a loading fixture. The substrate and loading fixtures shall each be circular, solid cylinders of no less than 1.5 in. in length, or as agreed upon by the manufacturer and customer. A suggested detail for either fixture is shown in Fig. 2. One end of each fixture shall be adapted for attachment to the self-aligning loading devices of the tension testing machine. Both ends of each fixture shall have faces parallel to each other and normal to the loading axis. The facing diameters shall be not less than 0.9 in. (23 mm), nor more than 1.0 in. (25 mm). The diameters of the two fixtures shall be the same and shall be measured so that the error is no greater than 0.5 %.

NOTE 5—In Appendix X1, an alternative substrate and fixture arrangement is provided that has proved cost effective and simple.

6.1.1 *Material for Substrate Fixture*—The substrate fixture shall be constructed of metal, preferably metal intended for use as the substrate for the coating. If no such substrate material is specified, the substrate fixture shall be SAE 1018 or 1020 steel.

NOTE 6—If desired because of cost or ease of fabrication, it may be suitable to attach or bond a layer of the specified substrate material to a fixture formed of any convenient metal. Such a layer of substrate material need not be metal. The layer must be substantially thicker than the possible depth of effects on the substrate, such as recrystallization or

diffusion zones, that may result from applying the coating. A layer greater than 0.1 in. (2.5 mm) thick should be sufficient.

6.1.2 *Material for Loading Fixture*—The loading fixture shall be constructed of metal, but material is otherwise optional. It is usually convenient to make the loading fixture of the same material as the substrate fixture; thus, the fixtures may be interchangeable until a coating is applied to one.

6.2 *Coating Application*—The front facing of the substrate fixture shall be prepared in the manner required by the specification for the coating. (Roughening by grit blasting or surface grinding may be typical preparations.) The coating shall be thermal sprayed onto this prepared surface.

6.3 *Coating Thickness*—The coating thickness shall be measured with a micrometer by measuring the total length of the coating fixture before and after the coating is applied. (Care must be taken to avoid contaminating the prepared surface before coating.) The final coating thickness shall be more than 0.015 in. (0.38 mm). If the coating is to be ground or machined, the as-sprayed coating shall be approximately 0.005 in. (0.13 mm) thicker to allow for removal of material. The coating thickness shall not vary across the surface by more than 0.001 in. (0.025 mm). (This thickness variation, as measured from the

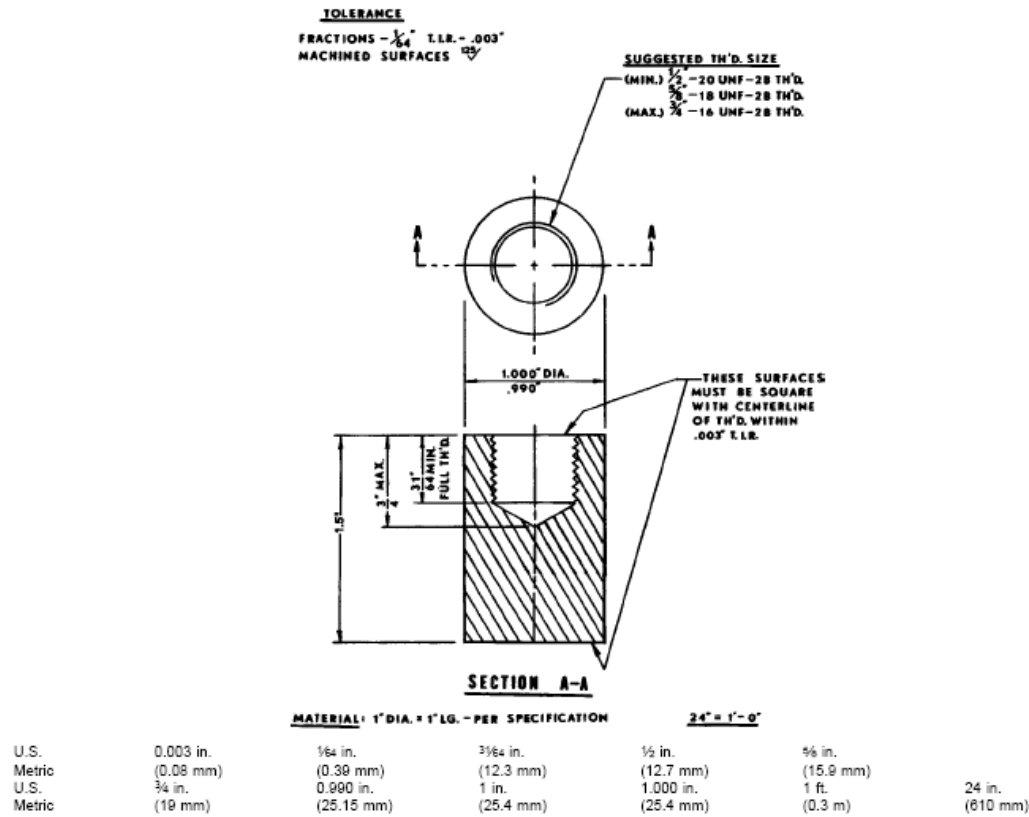


FIG. 2 Substrate and Loading Fixture

# ANEXO C.3. NORMA ASTM 6251-01



Designation: D 2651 – 01

## Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 2651; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

### INTRODUCTION

It is impossible and impractical to present a single surface-preparation method for a metal group, such as aluminum alloys, stainless steels, magnesium alloys, etc. The wide variety of individual alloys and heat treatments under each group, the fact that certain adhesives exhibit specific compatibilities with surface preparation and the complexity and nature of parts being bonded preclude the use of an all-inclusive procedure for a metal group. Procedures for aluminum alloys are well standardized, possibly because more bonding has been done with these alloys. Preliminary tests should be conducted with the specific adhesive and the exact lot of metals to determine performance. This is especially true for stainless steel. The adhesive manufacturers' recommendation should also be considered.

### 1. Scope

1.1 This guide covers procedures that have proved satisfactory for preparing various wrought metal surfaces for adhesive bonding. It does not address the preparation of cast metals.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.3 Surface preparation methods are included for:

Metal	Section
Aluminum Alloys	7
Stainless Steel	8
Carbon Steel	9
Titanium Alloys	10
Magnesium Alloys	11
Copper and Copper Alloys	12

1.4 Procedures included herein are based on the commercial practice of numerous agencies and organizations. The methods may be revised or supplemented, as necessary, to include methods based on proven performance.

1.5 The surface preparation of metal systems used for qualification and quality control testing of the adhesive should be agreed upon by both manufacturer and user.

1.6 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applica-*

*bility of regulatory limitations prior to use.*<sup>2</sup>

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

D 907 Terminology Relating to Adhesives<sup>3</sup>

D 1125 Test Methods for Electrical Conductivity and Resistivity of Water<sup>4</sup>

D 2674 Methods of Analysis of Sulfochromate Etch Solution Used in Surface Preparation of Aluminum<sup>5</sup>

D 3933 Guide for Preparation of Aluminum Surfaces for Structural Adhesives Bonding (Phosphoric Acid Anodizing)<sup>3</sup>

#### 2.2 ASM International Document:<sup>5</sup>

Metals Handbook Volume V

#### 2.3 Military Specifications:<sup>6</sup>

MIL-A-8625 Type II, Anodic Coatings for Aluminum and Aluminum Alloys

MIL-M-3171 Magnesium Alloy, Processes for Pretreatment and Prevention of Corrosion

MIL-M-45202 Magnesium Alloy, Anodic Treatment of

#### 2.4 SAE Standards:<sup>7</sup>

Aerospace Material Specification 2470—Anodic Treatment of Aluminum Base Alloy, Chromic Acid Treatment

<sup>2</sup> A surfactant that has been found suitable for this purpose consists of a 50 % mixture of a cationic and a fluorochemical surfactant such as Zonyl FSC manufactured by E.I. DuPont, Wilmington, DE 19898.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.06.

<sup>4</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 11.01.

<sup>5</sup> Available from ASM International, Metals Park, OH 44073.

<sup>6</sup> Available from Standardization Documents, Order Desk, Bldg. 4, Section D, 700 Robbins Ave., Philadelphia, PA 19111, Attn: NPODS.

<sup>7</sup> Available from the Society of Automotive Engineers (SAE), 400 Commonwealth Dr., Warrendale, PA 15096.

<sup>1</sup> This guide is under the jurisdiction of ASTM Committee D14 on Adhesives and is the direct responsibility of Subcommittee D14.80 on Metal Bonding Adhesives. Current edition approved Oct. 10, 2001. Published December 2001. Originally published as D 2651 – 67. Last previous edition D 2651 – 90 (1995).

### 3. Terminology

3.1 *Definitions*—Many of the terms in this guide are defined in Terminology D 907.

### 4. Apparatus

4.1 *Trays or Pans*, suitable for preparation of laboratory specimens and small parts. Generally in production, a series of tanks containing the necessary solutions is arranged with overhead cranes to transport parts to be prepared. Tanks should be lined with suitable materials to resist the solutions, and methods for circulating the solutions and heating with temperature controls should be included if required.

4.2 *Hooks, Baskets, Clamps*, or other holding devices, may be used to convey parts being prepared. The use of a 300 Series stainless steel for such equipment is suggested. Other metals may be used if they are resistant to the solution used.

### 5. Conditions

5.1 *Handling*—All parts during and after processing and before bonding should be handled as little as possible and only with clean, lint-free cotton or nylon fabric gloves.

5.2 Water used for preparing solutions should be distilled, steam condensate, demineralized, deionized or otherwise treated, if necessary, to obtain a condition of not more than 50 ppm of solids and have a pH between 5.5 and 10, or not more than 50 ppm of dissolved solids and not over 30 micromhos conductance (see Test Methods D 1125). Rinsing may be done by spray or by dipping in a tank in which the water is circulated and constantly being renewed by an overflow method. After removing from any rinse the water-break test is commonly used. If the water film is discontinuous, it indicates that the process is unsatisfactory and must be repeated (see 5.5.4). Other methods, such as indicator paper and contact angle, have been used to determine the effectiveness of the process. Rinsing should be sufficiently long and vigorous to assure removal of soluble residue chemicals, or particles. Critical specific temperatures are specified for the rinse water in some processes. Where not specified, temperature is not critical. The number of times a process may be repeated depends upon the amount of metal removed in relation to the tolerance requirements for the part and whether clad or bare metal is used. Generally, not more than two repeat treatments are permitted.

NOTE 1—No entirely foolproof method exists to determine bondability of a metal surface after preparation. Trial bonding followed by testing and evaluation against mechanical strength standards should be conducted to determine initial and continuous effectiveness of a method.

5.3 *Solutions*—The life of solutions should be standardized. The useful life of solutions depends upon the number and size of the parts being prepared. Solutions should be sampled periodically and analyzed for materials pertinent to the particular treatment method, such as, titration for hexavalent chromium (CrO<sub>3</sub>), iron, chlorides, aluminum, etc. A pH reading or acid content of trichloroethane vapor degreasing solution, or both, should be obtained. Standards should be established and records kept for such tests on each lot or vat of solution. Records should indicate the continuous conditions of solutions, such as amount of constituents added to bring solutions within limits, amount of contaminants present and date prepared (see Methods D 2674).

5.4 *Room Conditions* for surface preparation as well as other adhesive bonding operations should be controlled for temperatures of 18 to 24°C (65 to 75°F), relative humidity of 40 to 65 %, air-filtered to remove dust and pressure maintained at slightly higher than ambient.

5.4.1 The time and conditions between surface preparation and applying adhesive primer, if used, and bonding are critical. Usually, the time should not exceed 8 h and parts should be covered or wrapped in Kraft paper. Prepared surfaces can change their characteristics on standing and adhesives vary widely in their tolerance of adherend surface conditions. In production bonding of complicated or large parts, the time interval may exceed 8 h. Investigation should be made to determine the time limitation of the adhesive and the rate of change on the surface of the adherend. On the basis of the results of such an investigation, it may be possible to extend the length of time and establish standards for the interval between surface preparation and adhesive application to fit production schedules. Contaminating operations in the area should be avoided. Especially detrimental are paint or other spraying operations, processes using powdered materials, oil vapors from pumps and other machinery and spraying of mold release agents.

#### 5.5 Common Steps:

5.5.1 Remove ink markings or stamped identifications from the metals. This can be accomplished by wiping with a cloth wetted with a variety of commercial solvents, such as acetone, methyl ethyl ketone, lacquer thinner and naphtha.

5.5.2 The preferred degreasing method is vapor degreasing with 1,1,1-trichloroethane. Commercial vapor degreasing equipment is usually used. This equipment has a deep tank with provision for heating a chlorinated solvent to 82 to 87°C (180 to 190°F). Parts are suspended in the vapor zone above the hot liquid and allowed to remain until there is condensation and run off (approximately 5 min). This step is repeated if necessary until all visible contamination is removed. The parts are raised above the tank and allowed to dry thoroughly. Previously bonded parts, such as honeycomb core materials, are usually not degreased due to difficulty in removing residue.

5.5.3 Following vapor degreasing, mechanical or chemical cleaning methods are usually employed.

5.5.4 A water-break test is a common method used to analyze surface cleanliness. This test depends on the observation that a clean surface (one that is chemically active or polar) will hold a continuous film of water, rather than a series of isolated droplets. This is known as a water-break-free condition. A break in the water film indicates a soiled or contaminated area. Distilled water should be used in the test, and a drainage time of about 30 s should be allowed. Any trace of residual cleaning solution should be removed or a false conclusion may be made. If a water-break-free condition is not observed on the treated surface, it should not be used for bonding. The surface should be recleaned until the test is passed. If continuous failures occur, the treating process itself should be analyzed to determine the cause of the problem.

### 6. Report

6.1 The report for all methods consists of flow charts, record sheets or other methods that indicate all steps in the surface