

Diseño, Ajuste y Calibración de un Banco de Pruebas para Modelos de Adhesión sometidos a Fuerzas  
Normales

Jhon Edinson Hernández Arciniegas, y Juan Sebastián Herrera Delgado

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

MSc, DSc William Pinto Hernández

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2022

## **Dedicatoria**

*A Dios, que me ha dado fuerza, voluntad, sabiduría y valentía para enfrentar todos los retos que se presentaron en el camino.*

*A mis padres que fueron el motor de la realización de toda esta trayectoria y los que más me impulsaron a seguir adelante dándome su apoyo tanto económico como motivacional.*

*A mi abuela Amira que siempre me apoyó con cualquier plato de comida que necesitaba cuando estudiaba.*

*A mis compañeros de carrera, mis colegas que tanto me apoyaron y nos apoyamos para cumplir este sueño, este paso de nuestras vidas.*

*A mis familiares y amigos más cercanos que fueron cómplices de los buenos y malos tiempos.*

***Juan Sebastián Herrera Delgado***

## **Dedicatoria**

*A mis padres, mi hermano y mis nonos, que me han dado apoyo y fuerzas en todo este camino recorrido y me dieron los ánimos que necesitaba para afrontar cualquier reto que se me presento.*

*A mis tíos Marisol y Lucho, que fueron las personas que me impulsaron, creyeron en mí brindándome esta gran oportunidad de estudiar y culminar mis estudios académicos.*

*A mis amigos Jesús Becerra e Ingrid Rangel, que me brindaron su apoyo, en los momentos que más los necesite, haciendo posible este sueño.*

*A mis compañeros de carrera, Juan Herrera, Andrés Navarro, Jhon Rojas, Luz Muñoz, Eilyn Cadena, Valeria Jaraba y demás compañeros, que compartimos muchos momentos y nos apoyamos mutuamente para lograr este objetivo, teniéndolos presentes en todo momento.*

***Jhon Edinson Hernández Arciniegas***

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	11
1. Justificación.....	13
2. Objetivos .....	14
2.1 Objetivo General.....	14
2.2 Objetivos Especificos.....	14
3. Marco Teórico .....	15
3.1 Modelo De Raous .....	15
3.2 Comportamiento del modelo de Raous .....	16
3.2.1 Comportamiento del modelo según la rigidez .....	16
3.2.2 Comportamiento del modelo según la viscosidad.....	17
3.2.3 Comportamiento del modelo según la energía de decohesión.....	18
3.3 LabVIEW .....	18
3.4 Algoritmo Levenberg Marquardt.....	19
4. Diseño conceptual.....	21
4.1. Requerimientos y especificaciones del banco .....	21
4.2. Planteamiento de alternativas .....	22
4.3. Evaluación de alternativas .....	25
4.4 Sensores utilizados.....	25
4.4.1 Galga extensiométrica .....	26
4.4.2 Sensor Fotoeléctrico de Distancia Wenglor .....	27
5. Metodología.....	29

5.1 Fase I: Construcción y calibración de un anillo de tensión .....	29
5.1.1 Diseño y construcción .....	29
5.1.2 Calibración del anillo .....	32
5.2 Fase II: Calibración del sensor Wenglor .....	34
5.3 Fase III: Construcción de una configuración experimental.....	37
5.3.1 Viga .....	37
5.3.2 Base .....	39
5.3.3 Platinas de sujeción de la viga .....	40
5.3.4 Estudio de fuerzas aplicadas la estructura .....	42
5.3.5 Probetas .....	42
5.3.6 Sujeción inferior del banco.....	43
5.3.7 Ensamblaje de todas las piezas .....	44
6. Análisis de resultados.....	46
6.2. Calibración del modelo de Raous .....	49
6.2.1 Análisis del comportamiento de la fuerza vs desplazamiento del modelo calibrado.....	49
6.2.2 Análisis del comportamiento de la fuerza vs desplazamiento del modelo calibrado.....	51
7. Conclusiones.....	53
Referencias Bibliográficas .....	55

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Requerimientos y especificaciones del banco</i> .....	21
Tabla 2 <i>Desarrollo de la matriz de calidad</i> .....	22
Tabla 3 <i>Evaluación de alternativas</i> .....	25
Tabla 4 <i>Puntos de ruptura del adhesivo</i> .....	48
Tabla 5 <i>Características calibradas del adhesivo</i> .....	49

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>DCL superficies en contacto</i> .....	15
Figura 2 <i>Comportamiento del modelo según el cambio de la rigidez</i> .....	16
Figura 3 <i>Comportamiento del modelo según el cambio de la viscosidad</i> .....	17
Figura 4 <i>Comportamiento del modelo según el cambio de energía de decohesion</i> .....	18
Figura 5 <i>Alternativa A</i> .....	23
Figura 6 <i>Alternativa B</i> .....	23
Figura 7 <i>Alternativa C</i> .....	24
Figura 8 <i>Sensor De Tensión BF350-3AA</i> .....	26
Figura 9 <i>Sensor de distancia fotoeléctrico Wenglor HN24MGV-P24</i> .....	27
Figura 10 <i>Bosquejo del banco de pruebas seleccionado.</i> .....	27
Figura 11 <i>Anillo sensor de tensión.</i> .....	30
Figura 12 <i>Análisis resistencia a la tensión con 400 N de fuerza</i> .....	30
Figura 13 <i>Ubicación de las galgas extensiométricas y conexión del puente completo de Wheatstone</i> ..	31
Figura 14 <i>Montaje del anillo en la prensa para su calibración</i> .....	32
Figura 15 <i>Programación LabVIEW</i> .....	33
Figura 16 <i>Comportamiento de Fuerza vs Voltaje</i> .....	34
Figura 17 <i>Esquema General del Acondicionador de Señal</i> .....	35
Figura 18 <i>Esquema del Acondicionador de Señal</i> .....	35
Figura 19 <i>Distancia Vs Voltaje</i> .....	36
Figura 20 <i>Modelo CAD del banco</i> .....	37

Figura 21	<i>Viga cuadrada de 1 in<sup>2</sup></i> .....	38
Figura 22	<i>Tuercas de 5/16'' soldadas</i> .....	38
Figura 23	<i>Dimensiones de la base</i> .....	39
Figura 24	<i>Resultado de la base</i> .....	40
Figura 25	<i>Diseño de platinas de sujeción de la viga</i> .....	41
Figura 26	<i>Resultado de las platinas de sujeción</i> .....	41
Figura 27	<i>Simulación de las fuerzas aplicadas en el diseño experimental</i> .....	42
Figura 28	<i>Probetas en acero inoxidable</i> .....	43
Figura 29	<i>Base y horquilla para la sujeción inferior del banco</i> .....	44
Figura 30	<i>Montaje del banco experimental</i> .....	44
Figura 31	<i>Montaje del banco de pruebas en la prensa hidráulica</i> .....	45
Figura 32	<i>Comportamiento del adhesivo en función del desplazamiento</i> .....	46
Figura 33	<i>Comportamiento del adhesivo en función de la fuerza</i> .....	47
Figura 34	<i>Fuerza Vs desplazamiento</i> .....	47
Figura 35	<i>Comportamiento de la fuerza de reacción experimental vs modelo</i> .....	50
Figura 36	<i>Resultados globales de las variables del modelo de Raous calibrado</i> .....	52

## Resumen

**Título:** Diseño, Ajuste y Calibración de un Banco de Pruebas para Modelos de Adhesión Sometidos a Fuerzas Normales\*

**Autor:** Jhon Edinson Hernández Arciniegas, y Juan Sebastián Herrera Delgado\*\*

**Palabras Clave:** Fuerza normal, Adhesivo, LabVIEW, SolidWorks, Ingeniería inversa.

**Descripción:** Mediante una configuración experimental, este proyecto implementó un banco de pruebas ajustable de fuerzas normales para el estudio y digitalización del comportamiento de un adhesivo. Para esto, se hizo primeramente la construcción del banco y aplicó el proceso de ingeniería inversa que llevó a cabo la simulación, mediante el software SolidWorks, conociendo así los momentos y esfuerzos máximos que puede soportar la representación de una viga empotrada. Esto permitió la confiabilidad del banco de pruebas y su versatilidad al momento de aplicar diferentes adhesivos a su configuración. Para la adquisición de los datos se utilizó instrumentación junto con el software LabVIEW, dichos datos contribuyeron a la obtención de las propiedades del adhesivo para los diferentes modelos de adhesión.

## **Abstract**

**Title:** Adjustment and Calibration of the Adhesion Model Under Normal Forces

**Author(s):** Jhon Edinson Hernández Arciniegas, y Juan Sebastián Herrera Delgado

**Key Words:** Normal force, Adhesive, SolidWorks, LabView, Reverse engineering

**Description:** Through an experimental configuration, this project implemented an adjustable normal force test bench for the study and digitization of the behavior of an adhesive. For this, the construction of the bench was first made and the reverse engineering process that carried out the simulation was applied, using the SolidWorks software, thus knowing the maximum moments and forces that the representation of an embedded beam can withstand. This allowed for the reliability of the test bench and its versatility when applying different adhesives to your setup. For the acquisition of the data, instrumentation was used together with the Labview software, these data contributed to obtaining the properties of the adhesive for the different adhesion models.

## Introducción

Los adhesivos son importantes en los sistemas de unión entre dos sustratos de igual o diferente naturaleza, por ejemplo, los sustratos aceros-cerámicos. Estos enlaces adhesivos tienen dos características fundamentales que son necesarias conocer y definir al momento de ser aplicado, las cuales son la adhesión y cohesión. La adhesión es la fuerza que se ejerce para mantener unido el adhesivo al sustrato y la cohesión se encarga de mantener una conexión entre las partículas del adhesivo proporcionando mayor resistencia. (MARIO, n.d.)

En general, los adhesivos son utilizados principalmente para soportar esfuerzos cortantes, sin embargo, en la práctica una cierta cantidad se ven sometidos a la acción de carga normal.

Es importante conocer las propiedades mecánicas considerando el contacto entre un cuerpo deformable y una superficie rígida, ya que, permite analizar la función, disposición y los tipos de adhesivo que generará un aporte fundamental al momento de utilizarlos, porque se tiene en cuenta la resistencia a la fractura, elongación, módulo de elasticidad y límite elástico que es la máxima tensión que tiene el adhesivo para que recupere su forma al momento de retirarlo. (Fragoso-Tarasco, 2021)

Teniendo en cuenta los bajos estudios e información correspondiente a las aplicaciones de los adhesivos cuando estos están sometidos a cargas normales, se requiere hacer el proceso de caracterización de las propiedades mecánicas de los mismos, por lo tanto, se propone el desarrollo de un banco de pruebas donde se haga la recolección de información con el uso de instrumentación que permita conocer las variables relacionadas al modelo de Raous y así contribuir con el avance tecnológico de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Para lograrlo, se debe asegurar que el banco ejerza una fuerza en la dirección normal de la junta adhesiva, con el fin de que la componente normal del desplazamiento predomine sobre la tangencial, es decir, despreciar los efectos de los esfuerzos cortantes y de cizallamiento.

La investigación se realizó mediante 3 fases metodológicas, iniciando por la recolección de información, el diseño y construcción de una configuración experimental el cual tuvo sus inconvenientes por cuanto el adhesivo fue exigente y no fue compatible, se hicieron las respectivas consultas enfocadas en la aplicación de carga normal en adhesivos, recopilada de libros, artículos y proyectos de investigación utilizada para el análisis del estudio y se utilizó un adhesivo epoxico monocomponente a base de cianocrilato conocido comercialmente como SÚPER GLUE, al ser menos resistente y lograr el punto de ruptura compatible con el montaje del banco de prueba.

La segunda fase, correspondió al objetivo dos, simular y evaluar el modelo de Raous, realizado a través del software Matlab y por último la tercera fase trata sobre el ajuste y calibración del modelo a partir del algoritmo de mínimos cuadrados no lineales de Levenberg-Marquardt.

## 1. Justificación

Entre los adhesivos más convencionales y de fácil acceso se encuentra el Cianocrilato de Metilo, tiene en su estructura dos grupos estabilizadores de carga negativa (ciano y carbonilo). Al exponer a una superficie, experimenta una reacción química que se conoce como polimerización aniónica, que está catalizada por trazas de impurezas básicas (óxidos metálicos, hidróxidos, etc.), el producto de esta reacción (un polímero) se solidifica rápidamente uniendo superficies de manera efectiva, con el fin de modelar el comportamiento y relacionarlo al modelo de adhesión de Raous. (Federico, 2022)

Teniendo en cuenta las características que el adhesivo posee, se evalúa el comportamiento mecánico ante cargas normales, por el cual se construyó un banco de pruebas que permitiera realizar ensayos, donde las cargas normales puedan ser garantizadas; esto mediante la construcción de platinas de sujeción la cual se pueden ajustar y adecuar en las direcciones correctas.

La calibración correcta del banco permite dar un siguiente paso a este proceso del estudio de los adhesivos, al levantamiento de información experimental tal como fuerza, desplazamiento relativo y su dependencia temporal.

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo General

Fabricar un banco de pruebas para la caracterización de las propiedades mecánicas de un adhesivo sometido a cargas normales, mediante el uso de instrumentación y procesamiento de información que contribuya en el avance tecnológico de la universidad industrial de Santander (UIS).

### 2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir una configuración experimental para evaluar las características mecánicas del adhesivo sometido a cargas normales.
- Simular y evaluar el comportamiento del modelo de Raous para cargas normales utilizando el software computacional Matlab.
- Calibrar y ajustar el modelo de Raous mediante el método de mínimos cuadrados no lineales de Levenberg Marquardt con respecto al comportamiento del adhesivo.

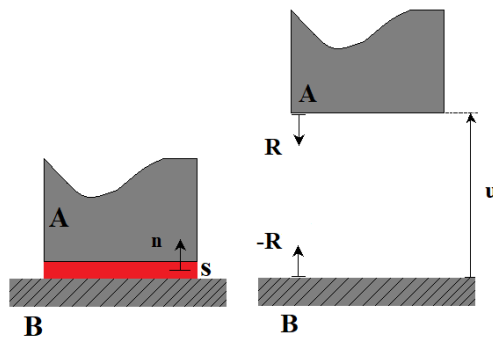
### 3. Marco Teórico

#### 3.1 Modelo De Raous

El modelo de adhesión propuesto por Raous tiene como objetivo mostrar restricciones mecánicas resultantes de condiciones operativas que proporciona tener predicciones de posibles variables constitutivas, como la fuerza de reacción de adhesión, la velocidad de degradación de la adhesión y variables de daño. Se debe tener en cuenta que el aspecto del diseño donde se aplicará el modelo es clave para las condiciones experimentales que facilitará el proceso de valoración de parámetros. (Raous, 2011).

#### Figura 1

*DCL superficies en contacto*



Dada la figura 1 a continuación, se detallan las variables de contacto propuesta por los autores

El desplazamiento de un punto del material del cuerpo **A** localizado en su límite se denota como ***u***, en cuanto al vector normal unitario en cada punto de la interfaz del material “S” será determinado como ***n*** y la fuerza de reacción recíproca que surge es ***R***. Todo esto da lugar al desplazamiento relativo del movimiento horizontal de A conocido como ***U<sub>n</sub>*** que es el producto punto entre desplazamiento ***u*** y el vector ***n***. Lo mismo será la componente normal de la fuerza de reacción ***r<sub>n</sub>***, la cual es el producto punto entre el ***R*** y ***n***.

$$r_n + \beta^2 C_n U_n \leq 0; \quad U_n \leq 0$$

$$\beta = - \left[ \frac{1}{b} (\beta C_n U_n^2 - w) \right]^{\frac{1}{p}}$$

*Nota : Fórmula planteada por (Raous, 2011)*

Donde (Cn) es rigidez, (w) el límite de la energía de descohesión, (b) la viscosidad, ( $\beta$ ) la variable de daño, (Un) el desplazamiento relativo entre los cuerpos y (p) coeficiente de potencia.

### 3.2 Comportamiento del modelo de Raous

A continuación, se muestra los comportamientos de las variables de adhesión propuestas por Raous

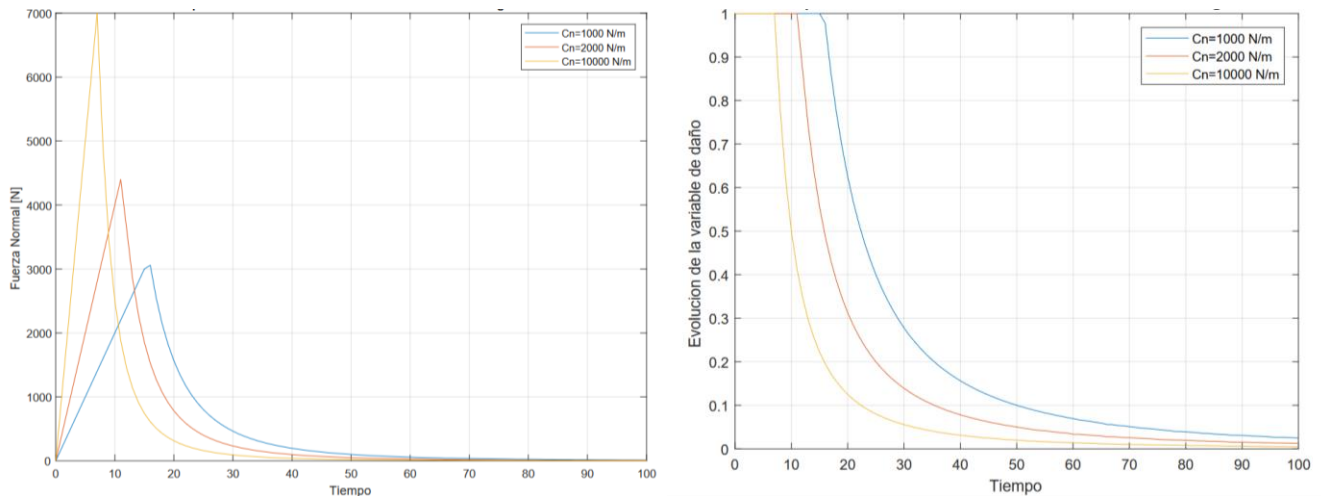
#### 3.2.1 Comportamiento del modelo según la rigidez

Teniendo variación en la rigidez “Cn” de la ecuación de Raous y ajustando los datos, se obtiene:

$p = 1$ ; *Exponente*,  $C_n = 1000; 2000; 10000$ ; *Rigidez*,  $\beta = 100$ ; *Viscosidad*,  $w_{ener} = 10000$ ; *Energía de decohesión*.

### Figura 2

*Comportamiento del modelo según el cambio de la rigidez*



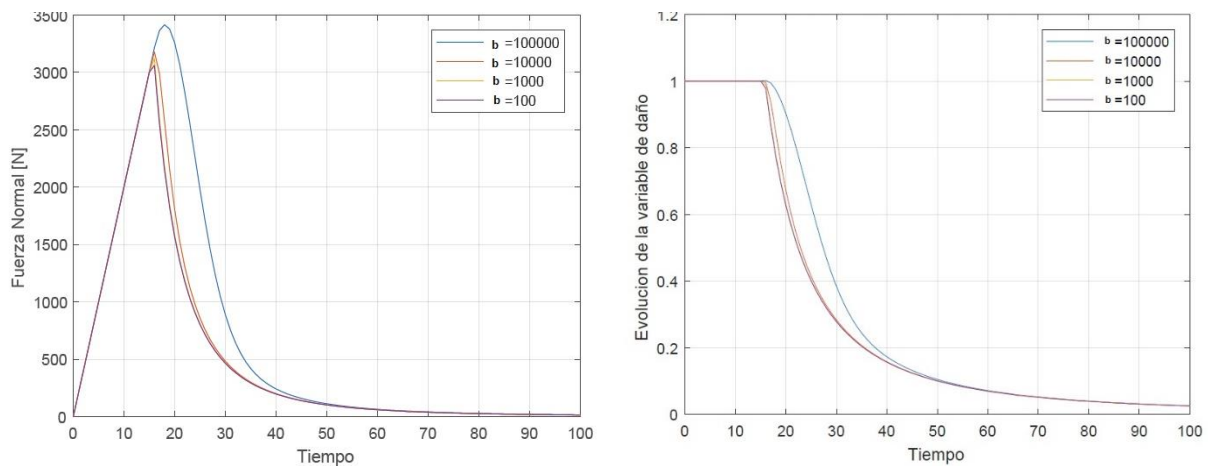
En la figura 2 se tiene la evolución de la fuerza normal respecto al tiempo haciendo cambios en la rigidez, se evidencia que en cuanto más rigidez tenga el material, alcanza más rápido la energía de ruptura o limite por ende se activa la variable de daño. Todo esto bajo la consideración de la energía de decohesión y viscosidad constante.

### 3.2.2 Comportamiento del modelo según la viscosidad

Teniendo variación en la viscosidad “b” de la ecuación de Raous y ajustando los datos, se obtiene:  $p = 1$ ; Exponente,  $C_n = 1000$ ; Rigidez,  $\beta = 1e^5, 1e^4, 1e^3, 1e^2$ ; Viscosidad,  $w_{ener} = 10000$ ;  $1 * C_{val}$ ; 1.025; Energía de decohesión.

**Figura 3**

*Comportamiento del modelo según el cambio de la viscosidad*



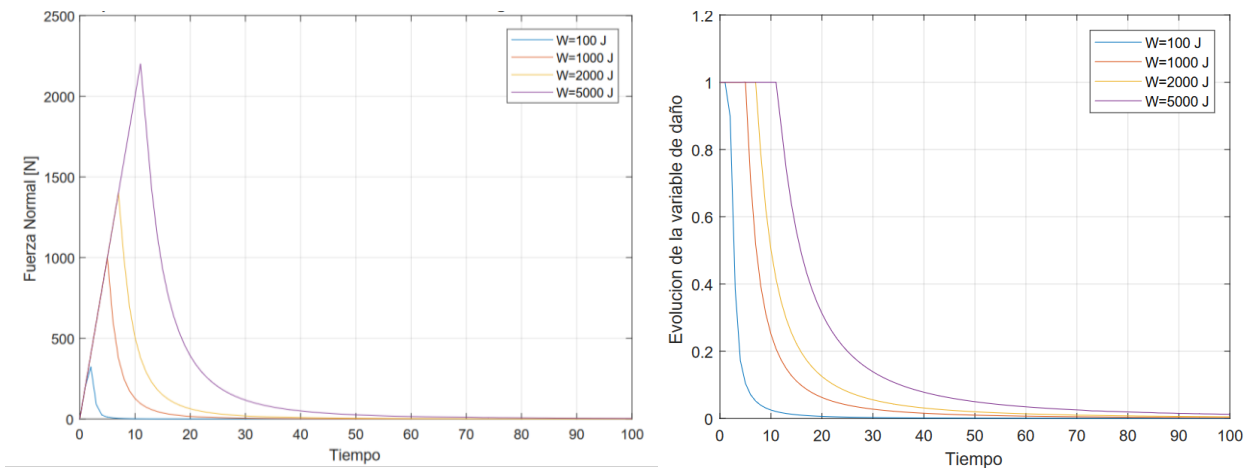
En la figura 3 se observa como el cambio de viscosidad afecta la ruptura del material, es decir, cuanta menos viscosidad tenga, la fuerza de ruptura es menor y su relación con la variable de daño no tiene suficiente relevancia en base a la viscosidad, es casi el mismo comportamiento para todas.

### 3.2.3 Comportamiento del modelo según la energía de decohesión

Teniendo variación en la energía de decohesión “w” de la ecuación de Raous y ajustando los datos, se obtiene:  $p = 1$ ; *Exponente*,  $C_n = 1000$ ; *Rigidez*,  $\beta = 100$ ; *Viscosidad*,  $w_{ener} = 1e^2; 1e^3; 2e^3; 5e^3$ ; *Energía de decohesión*.

#### Figura 4

*Comportamiento del modelo según el cambio de energía de decohesión*



En la figura 4 se contempla el comportamiento de la fuerza respecto al cambio en la energía de decohesión y esta energía es la que dice el límite el cual el material iniciaría la falla, esta información es útil para poder caracterizar el comportamiento de materiales adhesivos. En función de esa energía, la variable de daño entra en accionamiento más rápido o lento.

### 3.3 LabVIEW

El software computacional LabVIEW ayuda a desarrollar mediante un lenguaje de programación visual la adquisición de datos de ingeniería y el desarrollo de todo tipo de sistemas, como por ejemplo la automatización de manufactura, control o seguimiento de una máquina y/o proceso industrial.

### 3.4 Algoritmo Levenberg Marquardt

El algoritmo de Levenberg-Marquardt es una combinación de dos algoritmos de minimización numérica, descenso de gradiente y Gauss-Newton. El método de Levenberg-Marquardt es similar al descenso de gradiente cuando los parámetros están lejos de ser óptimos, y a Gauss-Newton cuando los parámetros están cerca de ser óptimos.

La complicación del método de mínimos cuadrados surge cuando se ajusta un modelo matemático parametrizado a un conjunto de puntos de datos minimizando la suma de los errores cuadráticos entre la función del modelo y el conjunto de puntos de datos.

La función que se busca minimizar es el error medio cuadrático definido por la siguiente relación:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2$$

Se requiere un algoritmo de solución iterativo para el problema de los mínimos cuadrados ya que, estos algoritmos reducen la suma de los errores cuadráticos entre la función del modelo y los puntos de datos a través de una serie de actualizaciones bien seleccionadas de los valores de los parámetros del modelo.

Basado en el libro *Inverse Heat Transfer, Fundamentals and Applications*, el algoritmo está expresado por las siguientes ecuaciones:

$$\Omega^k = \text{diag}[(J^k)^T W^{-1} J^k]$$

Donde diferentes versiones de Levenberg-Marquardt pueden ser encontradas y dependen en la selección de la matriz diagonal  $\Omega^k$ .

El siguiente sistema lineal de ecuaciones algebraicas es obtenido por el proceso iterativo del método de Levenberg-Marquardt.

$$[(J^k)^T W^{-1} J^k + \rho^k \Omega^k] \Delta P^k = (J^k)^T W^{-1} [Y - F(P^k)]$$

Donde:

$$F(P^k) = [F_1(P^k), F_2(P^k), \dots, F_i(P^k)]^T$$

$$\Delta P^k = P^{k+1} - P^k$$

Este método nos ayuda a minimizar el error de los resultados obtenidos al utilizar el modelo Raous.

## 4. Diseño conceptual

### 4.1. Requerimientos y especificaciones del banco

La finalidad del proyecto es la realización y construcción del banco de pruebas calibrado y adecuado para hacer ensayos con adhesivos como, por ejemplo: el Policloropreno, Acetato de Polivinilo o Cianocrilato de metilo. Se requiere realizar los estudios para la recopilación de información de fuerza y desplazamiento relativo entre las superficies de adherencia, esto en relación con la ecuación del modelo de Raous para encontrar la rigidez, energía de decohesión y viscosidad; con la finalidad de poder ver las características que tiene el adhesivo en estudio.

Las limitaciones de espacio requieren sistemas prácticos y compactos con una larga vida útil y fácil mantenimiento. Para poder observar el comportamiento y comprender el funcionamiento, es necesario visualizar claramente los resultados en tiempo real de la prueba.

A continuación, se muestra una tabla con los requerimientos y especificaciones del banco que se consideran para el proceso de diseño.

**Tabla 1**

*Requerimientos y especificaciones del banco*

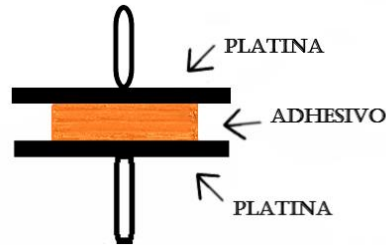
ASPECTO TECNICOS	OPERACIÓN Y USO	VIDA UTIL
Compacta	Fácil de transportar	Resistente a la corrosión
Garantizar cargas normales	Exactitud en la toma de datos	Fácil mantenimiento
Medición desplazamiento relativo	Fácil armado y desarmado	
Medición de fuerza		

**Tabla 2***Desarrollo de la matriz de calidad*

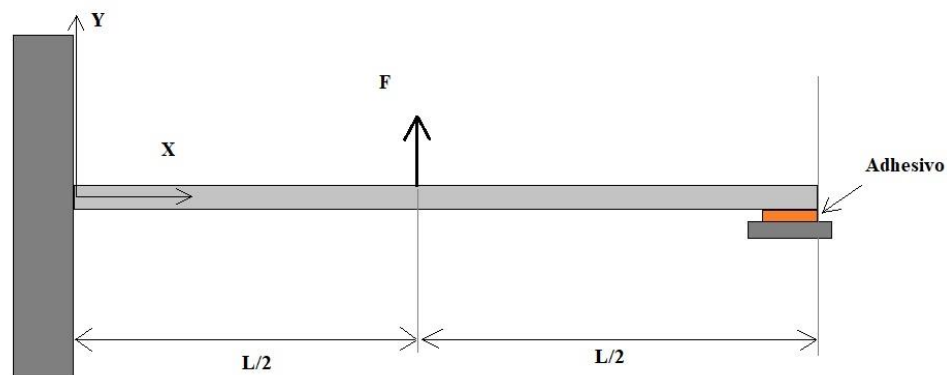
			Estructura rígida	Versatilidad	Costo del equipo	Confiabilidad de lectura de datos	Tiempo medio entre fallas
Aspecto	Sencilla	4		1	3		
	Compacta	1	7	7	3		
	Buen Aspecto	3	1	1	7		
Operación y uso	El costo debe ser bajo	9	3	9	9	7	3
	Facil de transportar	7		3	3		
	Exactitud en la toma de datos	10	7	9			
	Fácil Armado y Desarmado	8	9	7		3	9
Vida útil	Operación simple	2	1	3		3	
	Resistente A La Corrosion	5		1		9	
	Facil Mantenimiento	6	3	7		7	9
	Total		199	315	138	180	153

**4.2. Planteamiento de alternativas**

Se plantearon tres opciones: La alternativa “(A)” ilustrada en la figura 5 se plantea un montaje convencional lo cual facilita la opción de movilidad, es sencilla de instalar y muy ligera. Debido a que se instala directamente en la prensa hidráulica, se hace redundante el uso de instrumentación externa para la medición de las variables objetivas que son la fuerza y desplazamiento relativo. No obstante, se pueden presentar pequeños desalineamientos que generen distribuciones de esfuerzo no uniformes en el adhesivo o incluso la ruptura del material, lo cual se puede asumir que, esta opción no garantiza cargas normales.

**Figura 5***Alternativa A*

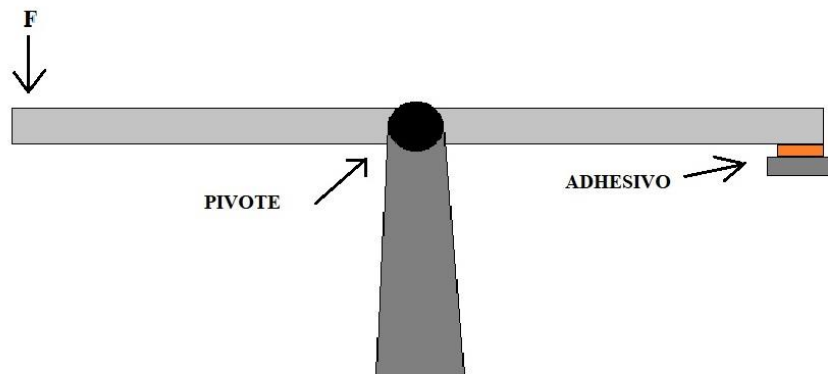
Dado que se necesita una carga normal se plantea la configuración “(B)” en la figura 6 que consta de una viga estáticamente indeterminada. Esta viga está compuesta por una sección cuadrada homogénea empotrada de manera que sea restringido el movimiento en el plano XY. La viga estará empotrada en su extremo izquierdo y simplemente apoyada por una platina que se une a través de una capa adhesiva en su extremo libre. Si consideramos que la platina unida es lo suficientemente pequeña comparada a la longitud de la viga, se puede decir que tenemos una fuerza normal actuando en el punto de aplicación del adhesivo. Con esta alternativa podemos adecuar las condiciones necesarias para medir el desplazamiento relativo entre los sustratos.

**Figura 6***Alternativa B*

Como tercera opción, la alternativa “C” ilustrada en la figura 7 se propone un sistema de viga homogénea pivotada en el centro. Su extremo derecho estará simplemente apoyado por una platina que se une a través de una capa adhesiva y en serie el sensor de fuerza, teniendo espacio para la aplicación de la fuerza en su extremo izquierdo. Para este estudio de la fuerza normal aplicada es necesario que la viga sea lo suficientemente larga en comparación con el punto de aplicación del adhesivo para que no presente problemas de angularidad y tampoco fuerzas de cizallamiento. Esta opción tiene la libertad de mejorar la velocidad de aplicación de carga y se puede ajustar las condiciones necesarias para medir el movimiento relativo entre los sustratos.

### Figura 7

#### *Alternativa C*



### 4.3. Evaluación de alternativas

**Tabla 3**

*Evaluación de alternativas*

Criterio de evaluación	%	Alternativa A		Alternativa B		Alternativa C	
		Nota	Ponderación	Nota	Ponderación	Nota	Ponderación
Estructura rídiga	29	3	0,8601	4	1,1468	5	1,4335
Versatilidad	45	3	1,3614	5	2,269	2	0,9076
Confiabilidad lectura de datos	26	3	0,7779	5	1,2965	5	1,2965
Total	100		2,9994		4,7123		3,6376

Presentando las alternativas en la tabla 3, y evaluando los requerimientos propuestos, se llega a la decisión de utilizar la alternativa (B), ya que este cumple con los parámetros que son: medición de desplazamiento relativo entre los sustratos, aplicación de carga normal en el adhesivo y medición de dicha carga.

### 4.4 Sensores utilizados

Debido a que se debe medir la fuerza de reacción normal que experimenta en la junta adhesiva, es necesaria la instalación de un sensor de fuerza en serie con dicha junta. De acuerdo con el funcionamiento de la configuración experimental, se requiere un dispositivo que pueda medir carga cuasi-estática, sea ligero, insensible a las condiciones ambientales, de fácil operación y económico. En el mercado se puede encontrar diferentes tipos de sensores de fuerza tales como: transductores de fuerza de diafragmas, fuelles, electromecánicos, piezoeléctricos y galgas extensiométricas, entre otros. Las galgas extensométricas cumplen muy de cerca todos los requisitos mencionados anteriormente, además de que es el más asequible

en el mercado, por lo que se procede a diseñar una celda de carga con una configuración de puente de Wheatstone completo para el análisis de tensión.

Se necesitó elaborar un dispositivo para medir fuerza, por lo que se construyó una pieza en la que se puedan usar celdas de carga y por medio de deformaciones/voltajes poder medir la fuerza requerida.

#### **4.4.1 Galga extensiométrica**

Tiene la propiedad de ser piezorresistiva y se utiliza para la medición de voltaje al haber una deformación, referente a la Figura 8, la galga tiene una resistencia variable de  $349 \pm 0.1 \Omega$ , coeficiente de sensibilidad 2.0 y límite de deformación de 10% de su longitud. Longitud de galga 6.9mm ancho 3.1 mm.

#### **Figura 8**

*Sensor De Tensión BF350-3AA*



*Nota.* ArdoBot, (s.f.)

Se hace necesaria la instalación de un sensor para medir el desplazamiento relativo entre los sustratos, que sea preciso y económico. Existen varios tipos de sensores que permiten medir las magnitudes de distancia como los inductivos, capacitivos y fotoeléctricos, dentro de estos, se acomoda más a nuestro requerimiento los fotoeléctricos debido a que permite medir distancia en un rango mayor a los capacitivos y no requiere de un material específico como los inductivos. Además, este sensor se encuentra disponible en los laboratorios de la escuela de ingeniería mecánica de la universidad.

#### 4.4.2 Sensor Fotoeléctrico de Distancia Wenglor

Para el desarrollo de pruebas el Wenglor-HN24MGV-P24 que se muestra en la Figura 9, es un sensor fotoeléctrico de tipo reflectivo. Rango de trabajo entre 55 y 155mm con una linealidad de 1% con resolución de 0.5 mm. Este tipo de sensor fue utilizado para la medición del desplazamiento relativo del adhesivo de la alternativa B.

#### Figura 9

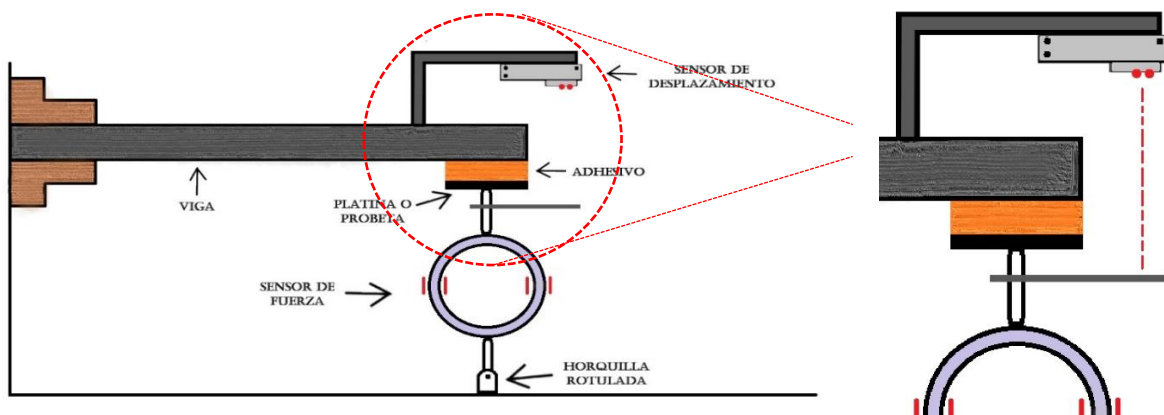
*Sensor de distancia fotoeléctrico Wenglor HN24MGV-P24*



*Nota.* (WENGLOR, n.d.)

#### Figura 10

*Bosquejo del banco de pruebas seleccionado.*



La figura anterior representa el diseño completo del banco de pruebas, donde se puede observar el empotramiento de la viga que se ancla con platinas en L, la ubicación del sensor Wenglor, el cual se acopla a la viga por medio de un soporte, el anillo sensor unido en serie con la platina-probeta y por una horquilla rotulada, que por sus grados de libertad permite ajustar la dirección de la carga aplicada

## 5. Metodología

### 5.1 Fase I: Construcción y calibración de un anillo de tensión

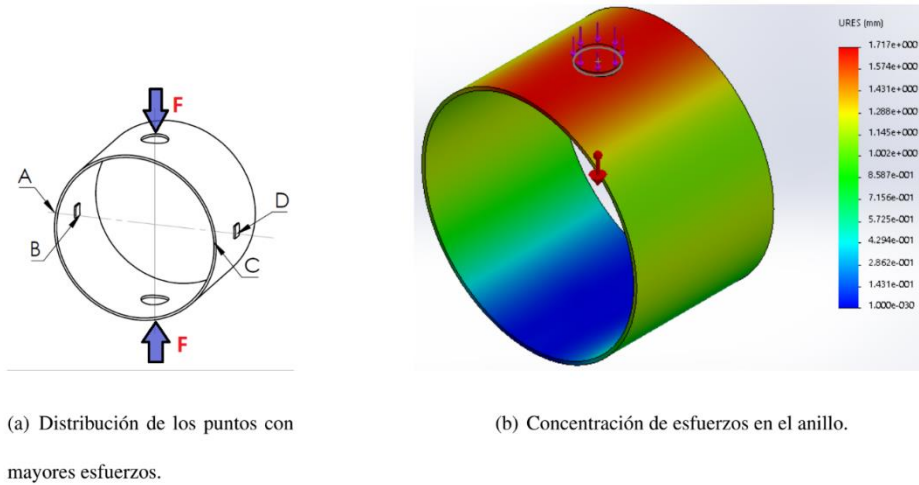
#### 5.1.1 Diseño y construcción

Para tomar datos de la fuerza que se aplica entre la viga y la probeta, se hizo la construcción de un anillo sensor de tensión, basado en resultados del Proyecto de San Miguel y Herrera (2019), los cuales indicaron que son necesarias unas galgas extensiométricas para la medición de la deformación y se usó la referencia BF350-3AA y en orden de hacer que el anillo tomara medidas de alta precisión y sensibilidad, se decidió que las galgas fueran pegadas en los lugares apropiados sobre la superficie del anillo.

Las posiciones de las galgas en el anillo, en general, deben ser donde sin concentraciones de esfuerzo, hay un alto valor de tensión para incrementar la sensibilidad y precisión de la toma de datos del anillo. Según Chen y cols. (2007), muestra que las locaciones donde hay máximos esfuerzos/tensiones y distintas concentraciones de esfuerzo/tensión son en las superficies superior(A) e inferior(C) del anillo, mas no son apropiadas para pegar las galgas. Aun así, hay un segundo lugar donde hay esfuerzos/tensiones sin concentraciones de esfuerzos/tensiones, en los puntos superficiales derechos(B) e izquierdos(D) del anillo, que son los más apropiados para pegar las galgas extensiométricas. (Figura 5).

**Figura 11**

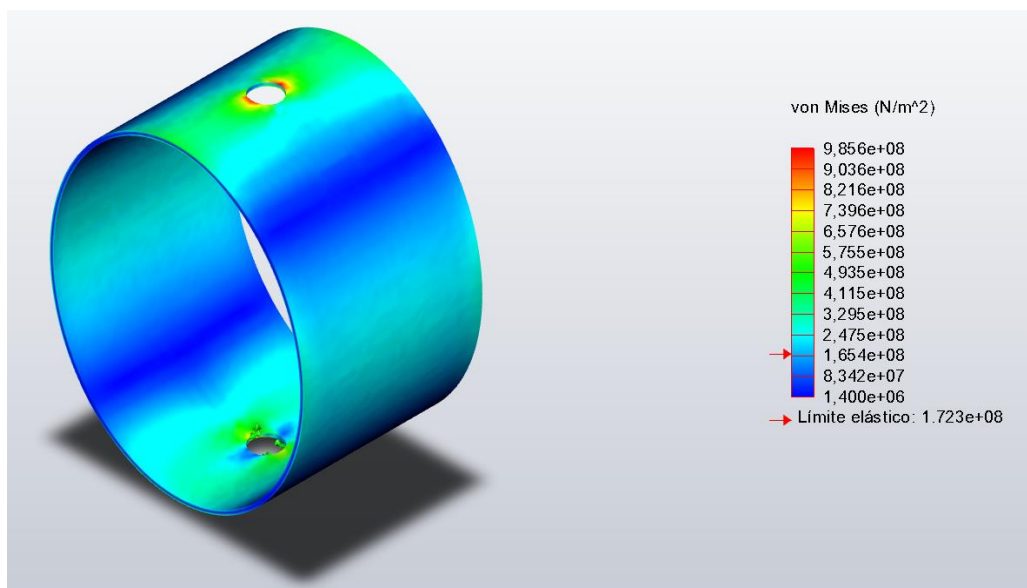
*Anillo sensor de tensión.*



*Nota.* Fuente San Miguel y Herrera (2019)

**Figura 12**

*Análisis resistencia a la tensión con 400 N de fuerza*



Como se puede observar en la figura, el límite elástico del anillo de acero inoxidable de 3 pulgadas y calibre 1.1 mm en valores de fuerza es 111.612 [kN], mientras el **Cianocrilato de Metilo** ofrece una resistencia de 12.903 [kN] y se usó por ser compatible a la funcionalidad del experimento, además, su costo es menor y es más comercial.

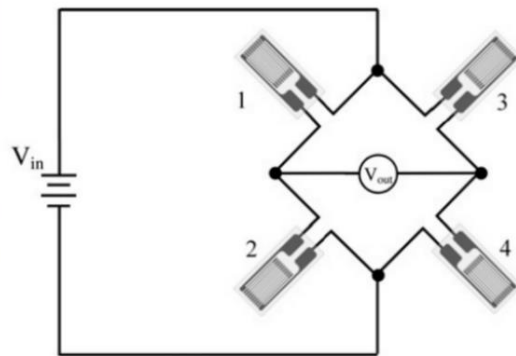
Como se evidencia en la figura 6, según (Almeida y Cols., 2012), cuando se aplica una carga a un anillo sensor de tensión, los esfuerzos y tensiones dentro de él cambian. La carga externa induce un cambio en esfuerzo, que a su vez provoca un cambio de la tensión en la superficie del sensor. Para detectar el cambio de los valores de deformación y, en consecuencia, las cargas aplicadas, se utilizó un circuito completo del puente de Wheatstone.

### Figura 13

*Ubicación de las galgas extensiométricas y conexión del puente completo de Wheatstone*



(a) Vista Isométrica de ubicación de galgas extensiométricas.



(b) Puente de Wheastone.

*Nota. Fuente San Miguel y Herrera (2019)*

### 5.1.2 Calibración del anillo

Para la realización de la calibración del anillo de tensión ya construido, se sometió a pruebas a tensión con la Prensa Hidráulica MTS; se procedió a instalarlo en la prensa de tal manera que las mordazas de la maquina sujetaran los extremos de los espárragos que están unidos al anillo como se muestra en la figura 14.

#### Figura 14

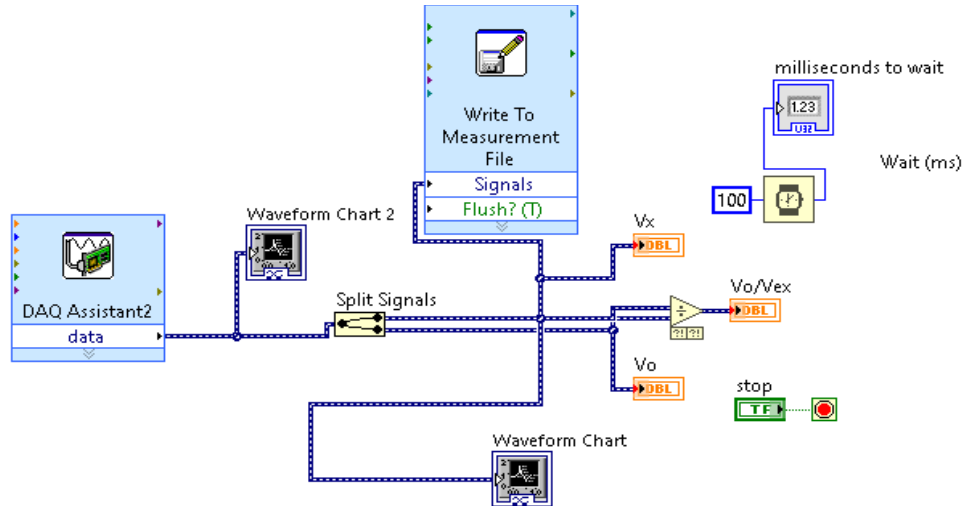
*Montaje del anillo en la prensa para su calibración*



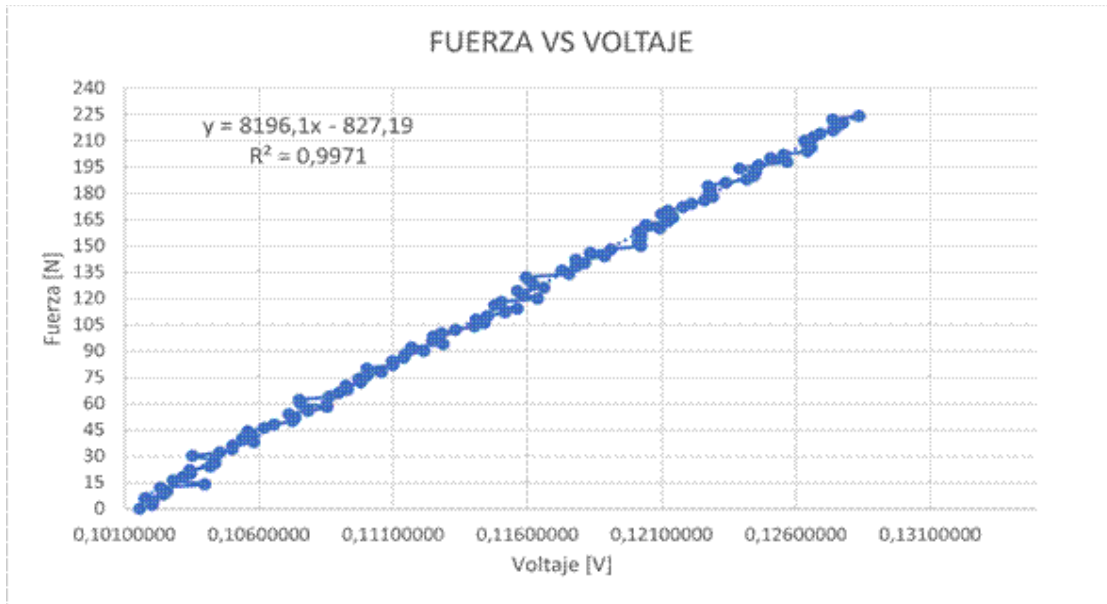
Para la obtención de los datos, se realizó una programación en el software Labview y se realizó la adquisición de estos datos por medio del myDAQ, proceso que puede observarse en la figura 15.

Figura 15

## Programación LabVIEW



Igualmente, para las pruebas, se programó la máquina para que ejecutara una fuerza determinada en un rango valores, el cual se propuso un rango de 0 a 240 N variando 2 [N/s]. Obteniendo así la gráfica de fuerza vs voltaje, que describe el funcionamiento del montaje y por medio de ajuste de curvas, la aproximación con la función de la recta con coeficiente de determinación  $R^2$ . Operación que se observa a continuación en la figura 16.

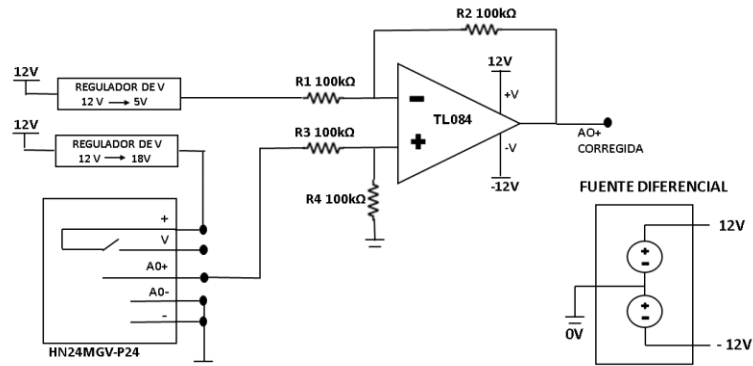
**Figura 16***Comportamiento de Fuerza vs Voltaje*

## 5.2 Fase II: Calibración del sensor Wenglor

El diseño del circuito que involucra al Sensor Wenglor, conformado por una etapa de alimentación con un par de baterías de 12 [v], que alimentaron al sensor Wenglor y a su vez al circuito general. Luego, mediante la etapa de regulación se implementaron dos módulos, el primero regulador elevador XL6009 que convierte el voltaje de 12 v a 18 v para alimentar el sensor Wenglor HN24MGV-P24 y el segundo regulador reductor LM2596 que convierte el voltaje de 12 v a 5 v para energizar el circuito de acondicionamiento del integrado TL084 de la señal de lectura del sensor para obtener una señal corregida de  $\pm 5$ , como se observa en la figura 17.

**Figura 17**

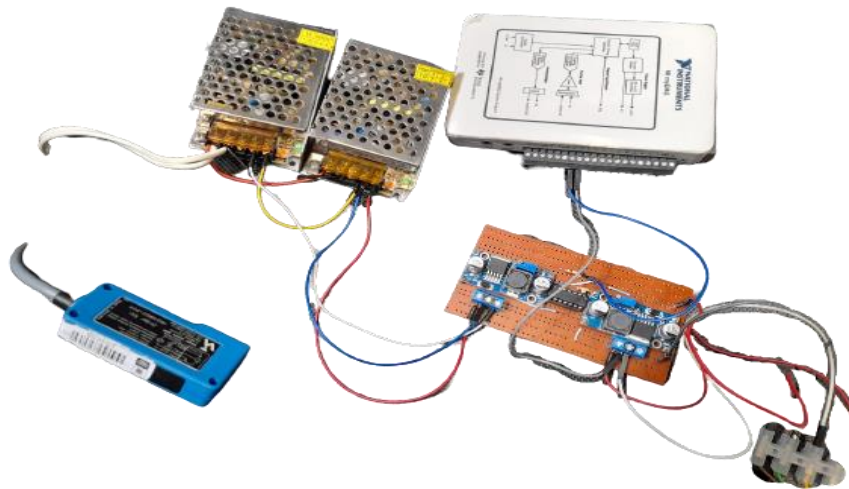
*Esquema General del Acondicionador de Señal*



La figura 18, deja ver el proceso de realización del montaje físico del esquema anterior y agregando la conexión con la tarjeta de adquisición de datos myDAQ.

**Figura 18**

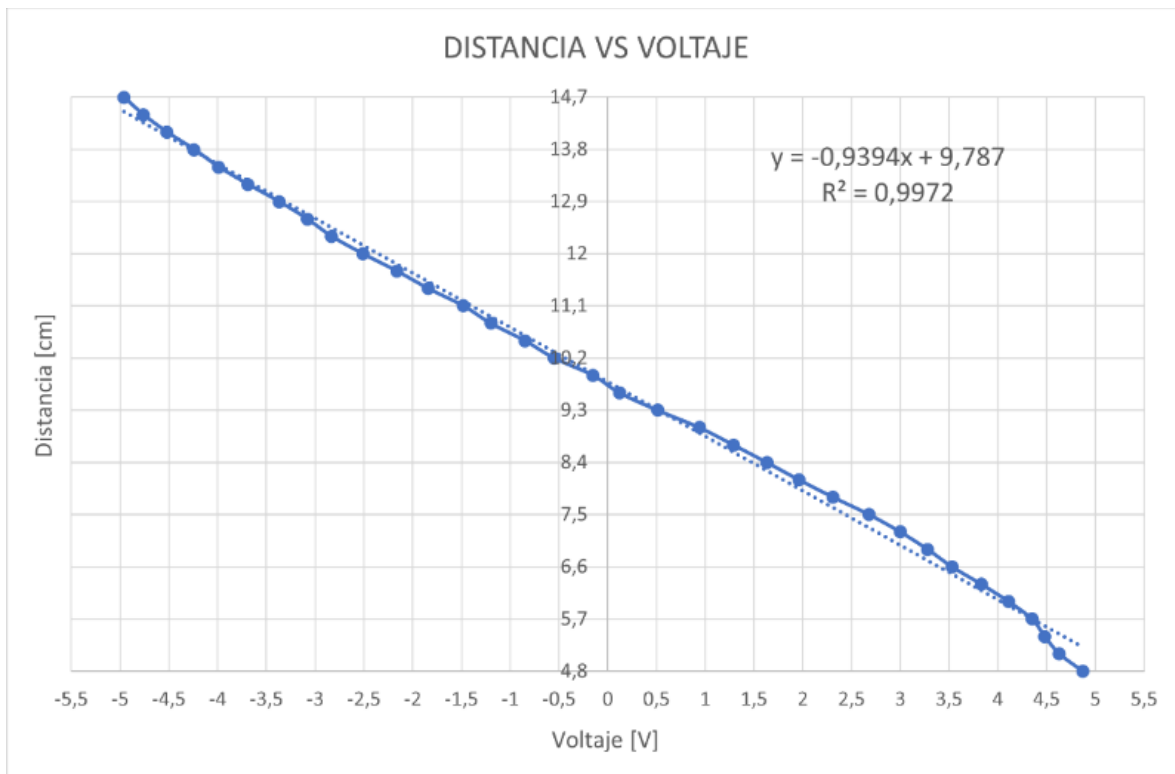
*Esquema del Acondicionador de Señal*



Para comenzar el proceso de calibración del Sensor Wenglor, se utilizó la prensa hidráulica MTS, la cual se programó para desplazarse cada 3 [mm/min], (luego se tomó registro de los valores de voltaje) para poder guardar datos precisos, en el rango de medición del sensor el cual se observa que tiene un valor de 5 cm a 15 cm y por medio de ajuste de curvas, la aproximación con la función de la recta con coeficiente de determinación  $R^2$ . (véase figura 19).

**Figura 19**

*Distancia Vs Voltaje*

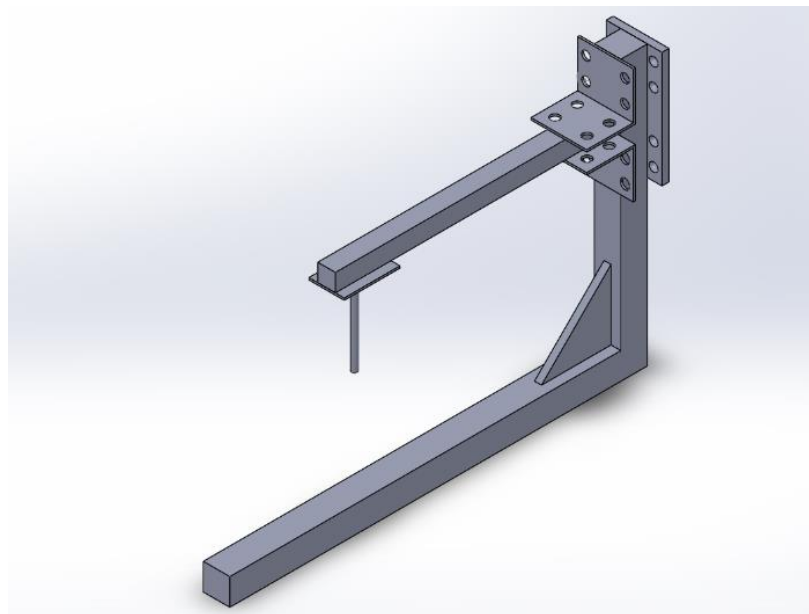


### 5.3 Fase III: Construcción de una configuración experimental

Con base en la figura 10, relacionada en el capítulo 4, se estableció el diseño de montaje y a continuación se describe el proceso que cada pieza tuvo para su diseño y construcción.

#### Figura 20

*Modelo CAD del banco*



#### 5.3.1 Viga

Para el diseño de la viga se decidió tomar un área transversal de  $1 \text{ in}^2$  con el fin de que el área fuera pequeña y así el accionamiento de la fuerza sobre la probeta también lo fuera. El acero al carbón que más se puede encontrar comercialmente es el A36 por lo tanto se obtuvo una barra sólida cuadrada.

**Figura 21**

*Viga cuadrada de 1 in<sup>2</sup>*



Para poder ajustar la viga fue necesario soldar tuercas en la mitad de la longitud de esta, de tal manera que se pueda enroscar pernos y con estos aplicar la fuerza de tensión que estamos buscando con la prensa.

**Figura 22**

*Tuercas de 5/16'' soldadas*

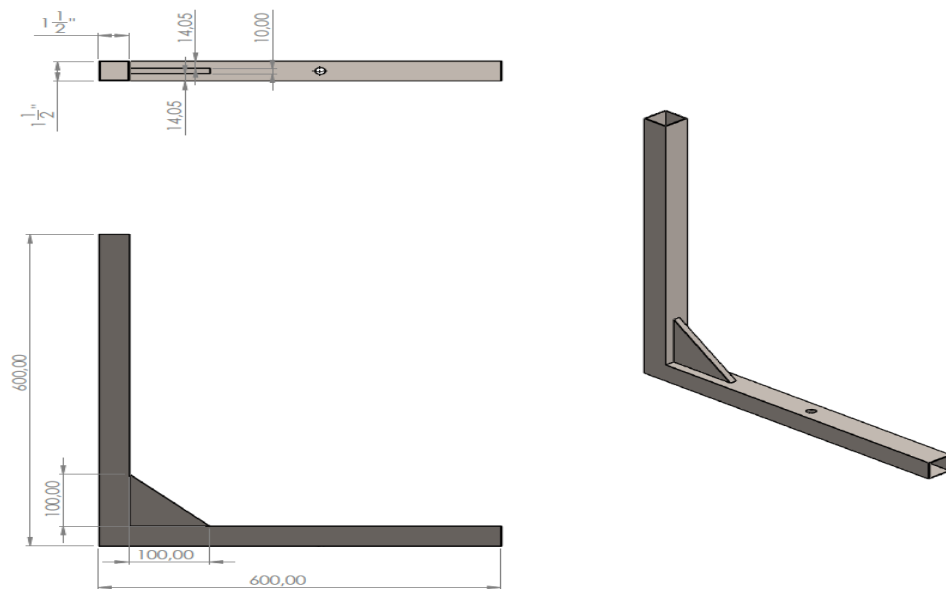


### 5.3.2 Base

La base debe tener una longitud con suficiente rango para poder ajustar la altura de las platinas que sujetan la viga, debido a que entre las mordazas de la prensa tenemos la limitante de desplazamiento vertical, por lo tanto, debe haber espacio para sujetar la viga y también poder ejercer la fuerza de tensión.

**Figura 23**

*Dimensiones de la base*



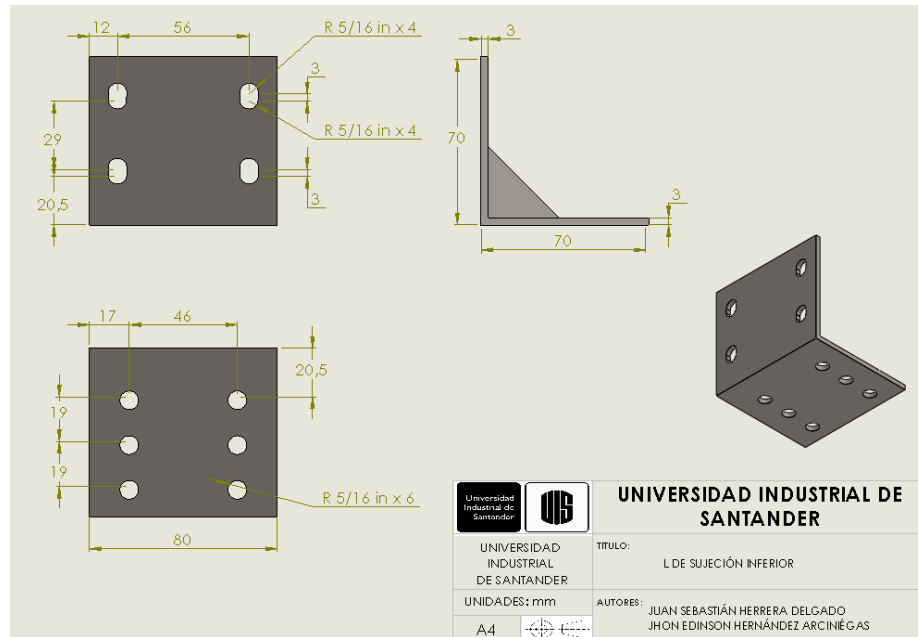
Con la finalidad de ser fácil de transportar y rígido se elige un tubo de acero estructural con dimensiones de 1.5x1.5 in, se realizó el proceso de corte y soldadura de la cartela o unión para la base. (véase la figura 24).

**Figura 24**

*Resultado de la base*

**5.3.3 Platinas de sujeción de la viga**

Con la ayuda del programa de diseño Solidworks se hizo el modelo CAD de las piezas de sujeción en L, procediendo a cortar y hacer la forma con una cortadora laser en una empresa metalúrgica de Barrancabermeja. Se cortaron, perforaron y doblaron en frío las láminas para dar su forma. Cada una de ellas (3 en total) se hicieron del mismo material, un acero A36 de 1/8'' de espesor.

**Figura 25***Diseño de platinas de sujeción de la viga***Figura 26***Resultado de las platinas de sujeción*

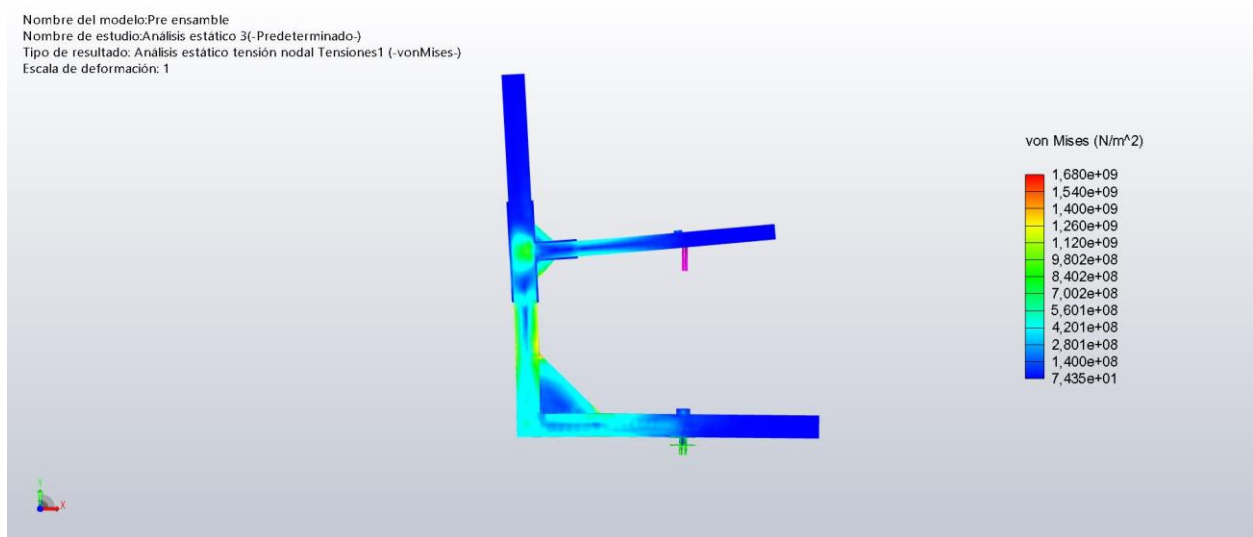
La figura 26, muestra los tornillos en acero inoxidable utilizados para asegurar una sujeción rígida, incrementar el factor de seguridad y garantizar resistencia a las condiciones ambientales. Los tornillos se seleccionaron de cabeza hexagonal de 5/16”, con longitudes de 2 ½” y 4”.

#### 5.3.4 Estudio de fuerzas aplicadas la estructura

Aplicando una fuerza de 6000 N, la tensión máxima que puede resistir esta configuración experimental serían 662.500 [kN]. Teniendo claridad en el proceso, se revisó la ficha técnica del adhesivo Cianocrilato de Metilo, el cual ofreció una resistencia a la tensión de 12,903 kN. Siendo mayor la resistencia de la estructura, se tomó la decisión de proceder con el adhesivo, la fabricación y construcción de las demás piezas.

#### Figura 27

*Simulación de las fuerzas aplicadas en el diseño experimental*



#### 5.3.5 Probetas

Con el fin de que existiera una diferencia en los materiales de prueba, las probetas fueron cortadas a 1” cuadrada en acero inoxidable y soldadas a ella una tuerca para poder enroscar el perno y ensamblarlo al anillo.

**Figura 28**

*Probetas en acero inoxidable*

**5.3.6 Sujeción inferior del banco**

Para garantizar que la fuerza aplicada fuera normal o perpendicular a la superficie de la probeta, se instaló una horquilla que tuviera mínimo dos grados de libertad y así cumplir la función de corregir el desfase que se pudiese formar, dado que, la conexión entre probeta y sujeción a la base debe tener ejes colineales.

Con la construcción de la base para la horquilla se utilizaron láminas de acero inoxidable, se cortaron y perforaron, posterior a esto, se cortaron dos aceros con perfil en L de 1 ½’’x 1 ½’’ con espesor de 1/8’’ y soldaron a la base como se ilustra en la figura 29.

**Figura 29**

*Base y horquilla para la sujeción inferior del banco*



### **5.3.7 Ensamblaje de todas las piezas**

Por último, como se aprecia en la figura 30, se hizo el montaje e instalación de todas las piezas ubicadas en su lugar, lo cual tomó alrededor de 15 minutos, entre ajustar toda la tornillería y alinear la viga con la horquilla.

**Figura 30**

*Montaje del banco experimental*



Una vez armada la estructura, se procede a instalarla en la prensa hidráulica MTS ubicada en la Universidad Industrial de Santander, hacer las conexiones correspondientes de los sensores y proceder a hacer las pruebas.

### **Figura 31**

*Montaje del banco de pruebas en la prensa hidráulica*



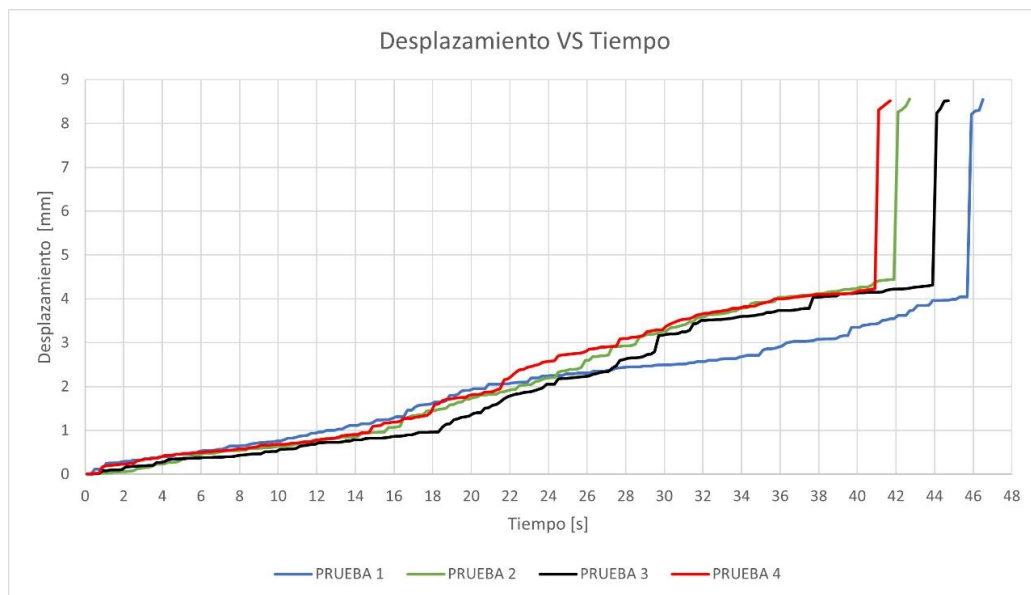
## 6. Análisis de resultados

La figura 31, muestra el ensamble que se hizo uniendo los elementos de medición de fuerza y distancia a la configuración experimental como resultado, se obtuvo un banco de pruebas completo realizado con 4 pruebas experimentales que constaron de 4 probetas de 1 in2 que contiene el adhesivo de estudio, dicho banco de pruebas se sometió a una velocidad de 1 mm/min para obtener un conjunto más extenso de datos para evaluar y poder observar su comportamiento.

En la figura 32 (Desplazamiento Vs tiempo) y figura 33 (Fuerza Vs tiempo), se muestra el desplazamiento y fuerza obtenidos por el sistema de adquisición de datos.

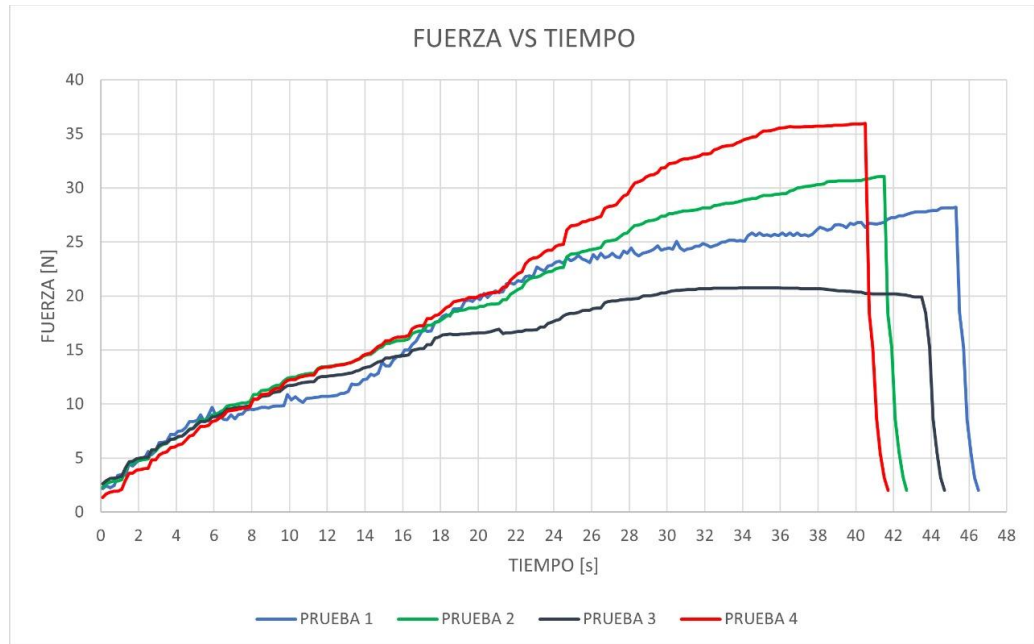
### Figura 32

*Comportamiento del adhesivo en función del desplazamiento*

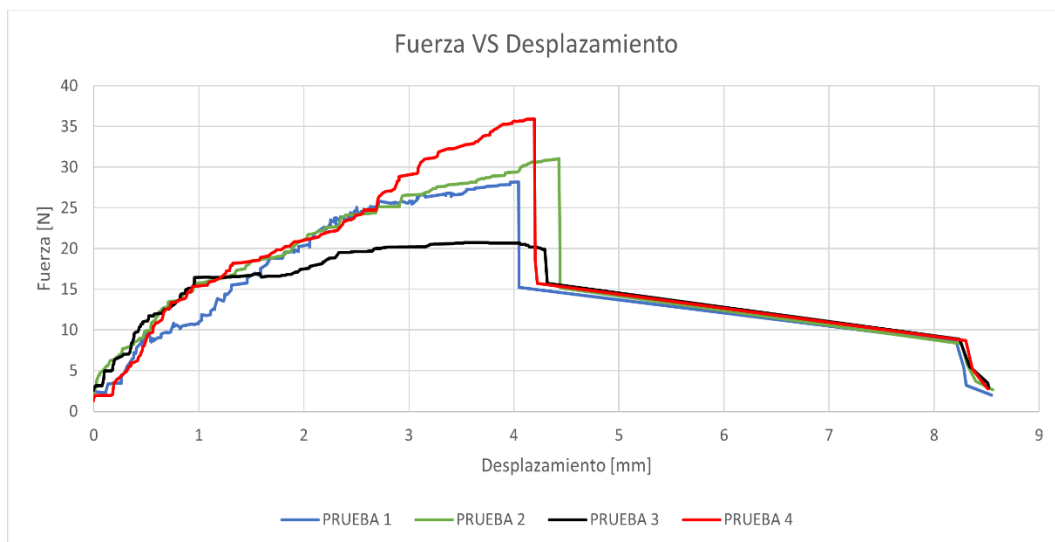


**Figura 33**

*Comportamiento del adhesivo en función de la fuerza*

**Figura 34**

*Fuerza Vs desplazamiento*



Como se observa en la gráfica anterior, el comportamiento inicial de la variable fuerza no es cero cuando el desplazamiento es nulo, debido a fenómenos que se presentan en el montaje y lectura de datos, tales como: Las galgas extensiométricas tienen intrínseca a ellas una tolerancia, al unir las formando el puente de Wheatstone dicho valor aumenta. El segundo se atribuye a el cable conductor implementado para las conexiones, que presenta un consumo y adicional a ello se presenta problema de ruido por movimientos. Finalmente, el montaje al momento que se realizan las pruebas no tiene el mismo punto inicial una de la otra.

En la siguiente tabla, se obtiene los puntos de ruptura alcanzada por cada una de las 4 pruebas realizadas. Con el fin de aplicarlos a los modelos matemáticos de cargas normales. Como lo es el modelo de Raous que se enfoca en obtener las propiedades fundamentales del adhesivo.

**Tabla 4**

*Puntos de ruptura del adhesivo*

N° de Prueba	t [s]	Fuerza [N]	Distancia [mm]
1	45,30	28,188	4,055
2	41,90	31,066	4,448
3	43,50	19,891	4,303
4	40,50	35,978	4,222

El valor de la fuerza de 19,891 [N] de la tabla 2 es inferior a los demás, posiblemente a una mala adhesión causada por un tiempo de secado corto o presencia de humedad entre la superficie de la probeta y de la viga.

## 6.2. Calibración del modelo de Raous

Para el proceso de calibración del modelo de Raous fue utilizado el algoritmo de Levenberg-Marquardt cuyo resultado para las 4 probetas se puede observar en la Tabla 5

**Tabla 5**

*Características calibradas del adhesivo*

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
<b>Cn[N/mm]</b>	9,122	8,5433	8,1133	9,0433
<b>w[J]</b>	52,987	57,987	10,835	87,987
<b>1/b[cSt]</b>	10361,22	19882,91	18025,42	30593,91

Estas variables están relacionadas con las condiciones físicas del adhesivo, podemos notar por ejemplo en la prueba 4, la variable “b” que es viscosidad, es menor, así como el límite de decohesion “w” es el mayor de todas las pruebas. Quiere decir que, se pudo haber presentado algún tipo de no paralelismo en la capa de adhesivo, o un exceso de pegamento en un lado más que en otro. Dando unos resultados un poco diferente a los demás. Cabe añadir que la viscosidad es un poco sensible para medir y es muy incierto ese valor. Con esta tabla también podemos observar que existe una relación entre viscosidad, límite de decohesion y fuerza.

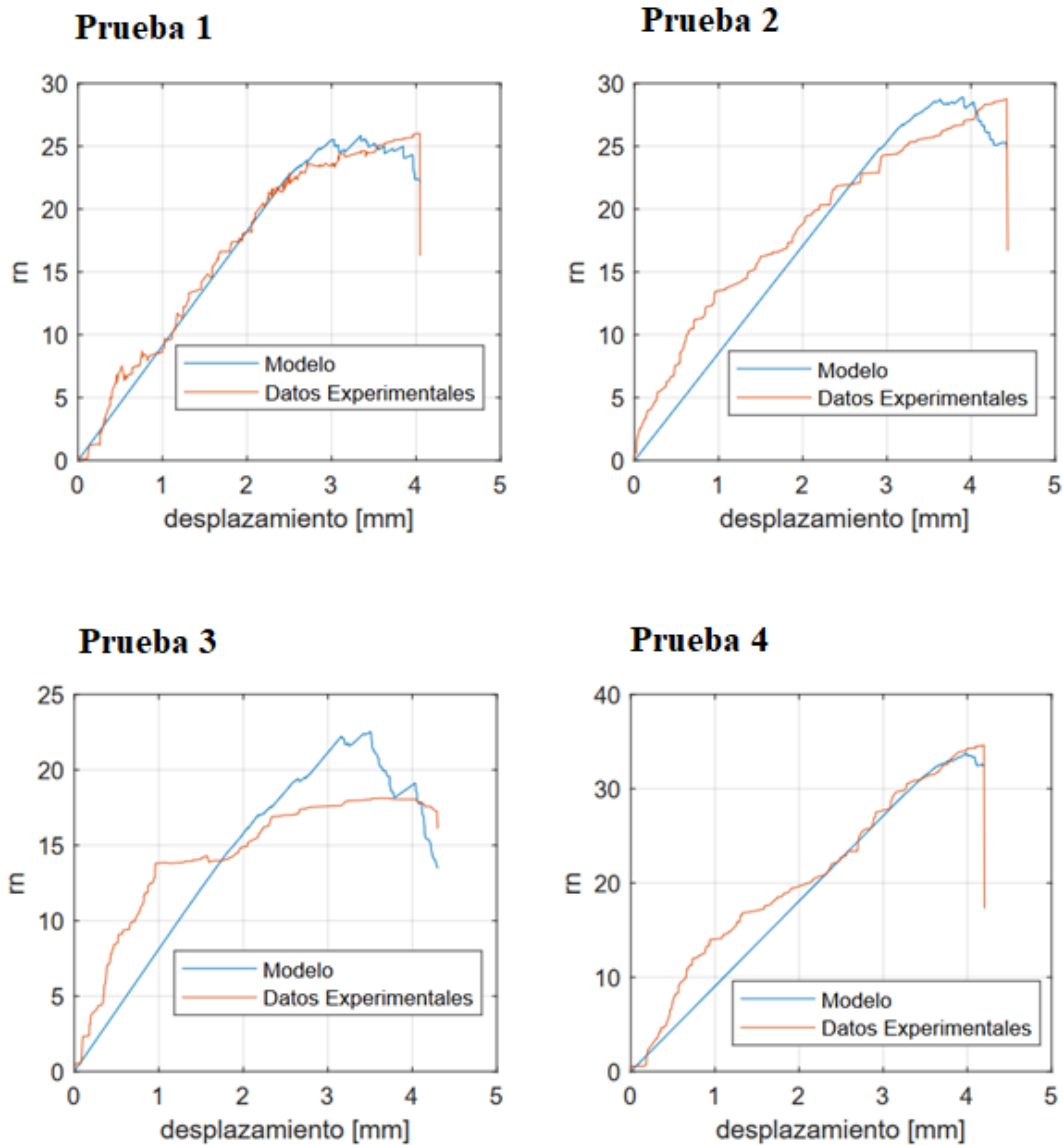
### 6.2.1 Análisis del comportamiento de la fuerza vs desplazamiento del modelo calibrado.

A continuación en la Figura 35, el comportamiento calibrado de la relación fuerza vs desplazamiento, el cual se puede observar que la conducta del modelo respecto a los datos experimentales tiende a actuar de manera similar como se refleja en la prueba 1 y 4. Así mismo, en las pruebas 2 y 3 notamos una variación de trayectoria en especial con la tercera prueba, donde los datos experimentales se comportan de manera irregular, por lo que podemos asumir que el ensayo presentó eventualidades, como

de naturaleza en el paralelismo de la placas de los sustratos y su adhesión, etc. Estos defectos pudieron afectar la medida experimental y por tanto el modelo calibrado.

**Figura 35**

*Comportamiento de la fuerza de reacción experimental vs modelo*



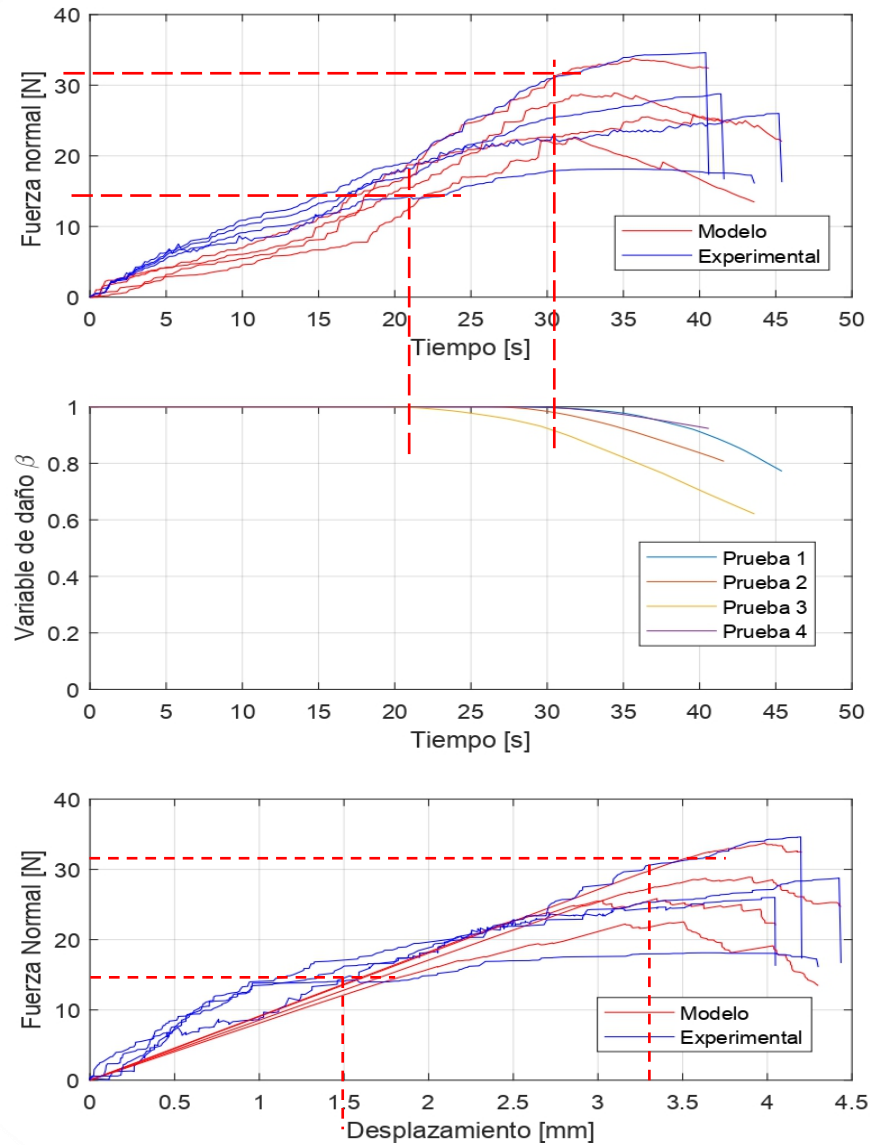
### ***6.2.2 Análisis del comportamiento de la fuerza vs desplazamiento del modelo calibrado.***

Como se puede observar en la figura 36, la variable de daño se activa con respecto a la fuerza con un mínimo de 18 N y un máximo de 33 N, estos valores llevados en el modelo representan los puntos de la fuerza normal en donde empieza la falla. Por otro lado, y siguiendo la indicación de la variable de daño, la energía de decohesión del material que se presenta en el adhesivo, está en un rango de deformación entre 1.5mm y 3.3 mm.

La variable de daño representa la degradación de la rigidez del adhesivo, demostrando que la prueba 3 sufrió o experimentó un daño más prematuro en comparación con las demás que sufrieron una degradación similar.

**Figura 36**

*Resultados globales de las variables del modelo de Raous calibrado*



## 7. Conclusiones

La experimentación en el laboratorio arrojó las siguientes conclusiones, en orden al cumplimiento de los tres objetivos propuestos para la investigación:

- El método de elementos finitos, que forma parte del proceso de diseño y verificación de resultados, permite comprender los límites de carga. Esta es una fuerza de 662kN para la estructura y en base al análisis lineal en la calibración, considerando las limitaciones de las celdas de carga por su flexibilidad, la fuerza es de 240N para el anillo. Por último, teniendo en cuenta lo anterior se determinan diferentes áreas de contacto para la aplicación de diferentes adhesivos.
- El modelo de Raous el cual se fundamenta en propiedades del adhesivo como la rigidez, viscosidad y la energía de decohesion, permite incorporar el análisis de comportamiento de una variable interna, que es la variable de daño; quien posibilita la determinación en la evolución de los procesos de degradación al interior del adhesivo. Dicho modelo contempla una relación lineal para este tipo de adhesivo, y un comportamiento no lineal puede comprometer su desempeño.
- Durante la fase de diseño y calibración el comportamiento del transductor, específicamente el sensor Wenglor, se evidencia que tiene un rango lineal el cual opera satisfactoriamente y va desde -4 a 4 voltios.

## 8. Recomendaciones

- Disminuir el área de contacto de las probetas para hacer el ensayo con el adhesivo Eucodural 452, haciendo esto disminuirá la fuerza que se debe aplicar para separar las superficies y el anillo de 3 pulgadas soporte con más tolerancia.
- Para la instalación en la Prensa Hidráulica MTS se recomienda usar las mordazas planas ya que tienen mejor ajuste e impiden el deslizamiento de los espárragos.
- Para futuras pruebas, este anillo tendría un límite elástico de  $1.723 \times 10^8$  por lo que el adhesivo debe tener un esfuerzo a la tensión inferior a este valor. De otra manera se debería cambiar las dimensiones de las probetas.
- En futuras investigaciones es recomendable que la UIS apoye con recursos a la construcción de este tipo de bancos ya que se pueden seguir utilizando en los laboratorios de la universidad.
- Los resultados del Banco de Pruebas sirven como punto de referencia para futuros proyectos de laboratorio

## Referencias Bibliográficas

- ARDOBOT. (n.d.). *SENSOR DE TENSION BF350-3AA*. <https://www.ardobot.co/sensor-de-tension-bf350-3aa.html>
- Fragoso-Tarasco, R.T (2021) Diseñar un banco de pruebas experimental mediante la utilización de un adhesivo. Estudio experimental y numérico para caracterizar la fractura de una unión adhesiva aplicada a la industria naval.
- HERNANDEZ FLORES, J. F. (2015). *DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL PARA EVALUAR LAS FRF Y OBTENER LOS PARAMETROS MODALES CON LABVIEW 2014*. INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL.
- José Vicente Morro Ros, D. (2010). “*Implementación del algoritmo de mínimos cuadrados aplicado al diseño de dispositivos de microondas*” *TRABAJO FINAL DE CARRERA*.
- LOSADHESIVOS. (n.d.). *PROPIEDADES MECANICAS DE LOS ADHESIVOS*. <https://www.losadhesivos.com/propiedades-mecanicas-adhesivos.html>
- MARIO, M. (n.d.). *TECNOLOGIA DE LA ADHESION. LOCTITE ESPAÑA*. [https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso\\_de\\_adhesivos.pdf](https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso_de_adhesivos.pdf)
- M. Necati Özisik, & Helcio R. B. Orlande. (n.d.). *Inverse Heat Transfer Fundamentals and Applications* (2nd ed.). Taylor and Francis Group.
- NI-9234, D. (n.d.). *MODULO NI-9234*. [https://www.ni.com/pdf/manuals/374238a\\_02.pdf](https://www.ni.com/pdf/manuals/374238a_02.pdf)
- Pablo Xavier Idrovo Urgiles, & Luis Miguel Quintanilla Molina. (2010). *Aplicación de galgas extensiométricas en el laboratorio de mecánica de materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica para la obtención de deformaciones en elementos sometidos a cargas combinadas*.

- Raous, M. (2011). Interface models coupling adhesion and friction. *Hal Open Science*.  
[https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00647853/PDF/TEXTE\\_CRAS\\_RAOUS\\_definitif.pdf](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00647853/PDF/TEXTE_CRAS_RAOUS_definitif.pdf)
- RINCON VELASQUEZ, C. A. (2020). *CARACTERIZACION DINAMICA DE MATERIALES VISCOELASTICOS PARA USOS EN SISTEMAS DE AMORTIGUACION PASIVA [recurso electronico]*. UIS.
- SANMIGUEL VILLACRESES, D. (2019). *MODELAMIENTO DEL COMPORTAMIENTO DINAMICO DE UN NEUTRALIZADOR DE VIBRACIONES (STOCKBRIDGE) PARA CABLES DE ALTA TENSION [recurso electronico]*. UIS.
- Torres Villalba, W., Dayhana, N., Montero, P., & Tecnológica, F. (n.d.). *FABRICACIÓN DE UN DINAMÓMETRO PARA MEDIR FUERZAS CORTANTES EN TORNO*.
- Tzunux, F (2022). Propiedades químicas del Superglue. <https://es.quora.com/Cu%C3%A1les-son-las-propiedades-qu%C3%ADmicas-de-Super-Glue>
- WENGLOR. (n.d.). *SENSOR REFLEX HN24MGV-P24*.  
[https://www.wenglor.com/medias/\\_\\_secure\\_\\_?mediaPK=8799593267230&attachment=true](https://www.wenglor.com/medias/__secure__?mediaPK=8799593267230&attachment=true)