

Análisis del Endurecimiento por Plastificación de un Adhesivo tipo Epoxi bicomponente por medio de Sometimiento a Carga Normal

Juan Diego Jiménez Sepúlveda y Yeison Alexander Parada Gómez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

William Pinto Hernández

PhD. Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios, por brindarme la fortaleza para continuar día a día.

*A mi padre **Alexander Parada**, quien con su ejemplo y tenacidad supo sacarme adelante, me enseñó el valor del trabajo honrado y el significado de ser una familia.*

*A mi hermano **Jhonatan Andrés Parada**, quien aun siendo menor me enseñó a ser valiente y a nunca perder la esperanza.*

*A mis amigos **Nicolás Martelo, Edinson Pereira, Juan Diego Jiménez, Andrea Juliana, Nicole Castelblanco** y a quienes conocí en este proceso y me acogieron con calidez.*

*A **Xilena**, por acompañarme en estos años y enseñarme mucho.*

*A esas personas que me recibieron cuando empecé este sueño y me dieron su apoyo sin esperar nada a cambio, **Giovanny Vega, Luisa, Adrián, Ricardo, Fernanda**. Gracias.*

Yeison

Dedicatoria

*A mi madre **Omaira Sepulveda Zarate** quien siempre tuvo fe y me tuvo en sus oraciones para que yo pudiera cumplir cada uno de mis sueños y metas.*

*A mi padre **Elkin de Jesús Jimenez Hoyos** por darme todo su apoyo para poder hoy estar donde estoy y ser quien he luchado por ser.*

*A mi madrastra **Judith Flórez Benítez** quien fue mi mejor compañía durante todo mi proceso universitario y de quien aprendí a ser siempre una persona honesta y trabajadora.*

Al resto de mis familiares quienes siempre estuvieron atentos a cualquier necesidad y que nunca dudaron en ser un apoyo en los momentos más difíciles que pudiera atravesar.

*A mi compañero de este proyecto **Yeison Parada** quien además ha sido un gran amigo desde el inicio y me ha enseñado que con humildad y esfuerzo siempre se puede llegar a donde uno desea.*

*A mis amigos **Nicolas Camargo, Edgar Morantes, Jaime González y Edinson Pereira** quienes pude conocer en este trayecto y tuve la posibilidad de aprender tanto de cada uno de ellos así como compartir grandes experiencias y el trabajo en equipo.*

Juan D. Jiménez

Agradecimientos

Los autores de este proyecto de grado manifestamos nuestro agradecimiento por lo que fue nuestra etapa de pregrado en ingeniería mecánica:

A nuestro director de proyecto el docente **William Pinto Hernández** PhD en ingeniería mecánica por su paciencia, disposición y apoyo durante el desarrollo del proyecto. Su aporte en educación motiva a la búsqueda del aprendizaje continuo y la integridad.

A los **docentes** de la escuela de ingeniería mecánica y de la Universidad Industrial de Santander por su gran aporte en nuestra formación académica y profesional.

Al **personal del laboratorio** de ensayos mecánicos, de metalurgia y del taller por su entera disposición en la fase experimental del proyecto.

A **Dios** que sin Él nada sería posible, **nuestras familias** por su constante motivación y a **nuestros amigos** por estar presentes.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos	17
1.1 Objetivo General	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Marco Teórico.....	18
2.1 Adhesivos y sustratos.....	18
2.2 Factores importantes en la unión	19
2.2.1 Estado superficial.....	19
2.2.2 Espesor	19
2.2.3 Curado del adhesivo.....	20
2.3 Preparación de la superficie	21
2.4 Modelos clásicos de endurecimiento por deformación.....	22
2.4.1 Modelo de elasticidad lineal con endurecimiento lineal.....	22
2.4.2 Modelo de elasticidad lineal con endurecimiento no-lineal	24
2.5 Algoritmo de Levenberg-Marquardt.....	26
3. Metodología	29
3.1. Selección de materiales y métodos	29
3.1.1. Probetas.....	29
3.1.2. Adhesivo	29
3.1.3. Métodos.....	30
3.1.4. Moldes de fijación.....	31
3.2. Preparación de pruebas mecánicas.....	32

3.2.1. Diseño y elaboración de probetas	32
3.2.2. Preparación de superficie de las probetas para ensayo mecánico	33
3.2.2.1. Primer paso: Refrentado.	34
3.2.2.2. Segundo paso: Desengrasado por frotamiento.....	34
3.2.2.3. Tercer paso: Tratamiento mecánico de superficie.	35
3.2.2.4. Cuarto paso: Tratamiento químico de superficie.	35
3.2.2.4. Quinto paso: Secado y acondicionamiento de superficie.	35
3.2.3. Aplicación del adhesivo.....	35
3.2.3.1. Espesores de adhesivo en probetas de prueba.....	35
3.2.4. Proceso de curado	35
3.2.5. Proceso de montaje del experimento	36
3.2.5.1. Parámetros de medición.....	36
3.2.5.2. Toma de datos.....	37
3.3. Ejecución de las pruebas y obtención de datos.....	37
4. Análisis de resultados	39
4.1 Resultados.....	39
4.1.1. Esfuerzo vs deformación.....	39
4.1.2. Modelamiento del algoritmo.....	40
4.1.2.1. Primera velocidad.	40
4.1.2.2. Segunda velocidad.	42
4.1.2.3. Tercera velocidad.....	44
4.2. Comparación.....	46
5. Conclusiones.....	49
6. Recomendaciones	51

Referencias Bibliográficas 52

Apéndices..... 54

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Datos recolectados del modelo lineal para la velocidad 0.1 mm/min.....	42
Tabla 2 Datos recolectados del modelo no lineal para la velocidad 0.1 mm/min.....	42
Tabla 3 Datos recolectados del modelo lineal para la velocidad 0.2 mm/min.....	44
Tabla 4 Datos recolectados del modelo no lineal para la velocidad 0.2 mm/min.....	44
Tabla 5 Datos recolectados del modelo lineal para la velocidad 0.3 mm/min.....	46
Tabla 6 Datos recolectados del modelo no lineal para la velocidad 0.3 mm/min.....	46
Tabla 7 Datos recolectados de módulos y esfuerzos de fluencia según la velocidad	48

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Modelo de plasticidad lineal.....	24
Figura 2 Modelo de plasticidad no lineal.....	26
Figura 3 Diagrama de flujo de aplicación del algoritmo	28
Figura 4 Probetas de prueba bajo la norma ASTM D2094.....	29
Figura 5 Adhesivo epóxico LOCTITE EPOXI-BONDER.....	30
Figura 6 Máquina de ensayos universal MTS	31
Figura 7 Molde para alineación y pegado.....	32
Figura 8 Proceso de refrentado de las probetas	33
Figura 9 Proceso de preparación de superficie	34
Figura 10 Extensómetro axial	36
Figura 11 Mecanismo acoplador para alineación de probetas	37
Figura 12 Montaje del experimento.....	38
Figura 13 Gráficas de Esfuerzo [Mpa] vs Deformación [mm/mm] de los ensayos de carga axial para cada una de las velocidades	39
Figura 14 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 3.....	40
Figura 15 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 6.....	41
Figura 16 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 9.....	41
Figura 17 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 10.....	41
Figura 18 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 13.....	42
Figura 19 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 14.....	43
Figura 20 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 15.....	43

Figura 21 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 18.....	43
Figura 22 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 21.....	44
Figura 23 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 24.....	45
Figura 24 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 25.....	45
Figura 25 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 30.....	45
Figura 26 Fluencia vs Velocidad modelo lineal	47
Figura 27 Fluencia vs Modelo no lineal	48

Lista de Apéndices

Apéndice A. Script de Matlab para el modelamiento de datos del adhesivo usando el algoritmo de Levenberg-Marquardt.	54
Apéndice B. Script de Matlab para la comparación del efecto de la velocidad sobre el esfuerzo de fluencia.	57
Apéndice C. Comparación gráfica de la implementación del modelado y el algoritmo de Levenberg-Marquart en los efectos del comportamiento lineal del adhesivo para la velocidad 0.1 mm/min.	58
Apéndice D. Comparación gráfica de la implementación del modelado y el algoritmo de Levenberg-Marquart en los efectos del comportamiento lineal del adhesivo para la velocidad 0.2 mm/min.	59
Apéndice E. Comparación gráfica de la implementación del modelado y el algoritmo de Levenberg-Marquart en los efectos del comportamiento lineal del adhesivo para la velocidad 0.3 mm/min.	60

Resumen

Título: Análisis del Endurecimiento por Plastificación de un Adhesivo tipo Epoxi bicomponente por medio de Sometimiento a Carga Normal.

Autores: Juan Diego Jiménez Sepúlveda y Yeison Alexander Parada Gómez.

Palabras Clave: Modelamiento, Endurecimiento, Adhesivo epoxi, Plastificación, MATLAB, Carga Normal.

Descripción:

La unión de piezas es esencial en diversas aplicaciones, desde la reparación doméstica hasta la construcción de aeronaves. Los adhesivos epóxicos, introducidos comercialmente en 1946, se utilizan ampliamente en la industria automotriz, aeroespacial e industrial debido a su gran capacidad de adhesión. Sin embargo, presentan limitaciones con superficies de baja energía como elastómeros y plásticos no tratados. La industria busca mejorar las características físicas y químicas de los adhesivos, prefiriendo uniones adhesivas por su distribución uniforme de la tensión y reducción del peso estructural.

Este proyecto de investigación evalúa el fenómeno de endurecimiento por plastificación en adhesivos epóxicos cuando son sometidos a cargas normales, con la experimentación utilizando un montaje en una máquina de ensayos universal y el análisis de resultados utilizando el algoritmo de Levenberg-Marquardt para modelar y analizar su comportamiento mecánico se buscar estudiar y describir el desempeño de estos adhesivos en aplicaciones prácticas.

Se observó que, al aumentar la velocidad de aplicación de la carga normal sobre el adhesivo, también aumentaba el esfuerzo de fluencia, aunque con una dispersión considerable debido al ruido. Los datos se ajustaron a los modelos de plasticidad con endurecimiento lineal y no lineal implementando el algoritmo de Levenberg-Marquardt mediante la herramienta MATLAB, lo que favoreció al momento de optimizar el error entre los modelos teóricos y los datos experimentales, obteniendo un promedio de error medio cuadrático máximo del 11.83%, correspondiente a la velocidad más alta.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: William Pinto Hernandez. PhD: Ingeniería Mecánica.

Abstract

Title: Analysis of the Plasticization Hardening of a Two-Component Epoxy-Type Adhesive by Means of Normal Force Subjection.

Authors: Juan Diego Jiménez Sepúlveda and Yeison Alexander Parada Gómez.

Key Words: Modeling, Hardening, Epoxi adhesive, Plasticization, MATLAB, Normal force.

Description:

Bonding parts is essential in a variety of applications, from home repair to aircraft construction. Epoxy adhesives, introduced commercially in 1946, are widely used in the automotive, aerospace and industrial industries because of their high bonding strength. However, they have limitations with low-energy surfaces such as elastomers and untreated plastics.

The industry seeks to improve the physical and chemical characteristics of adhesives, preferring adhesive bonds for their uniform stress distribution and reduced structural weight. This research project evaluates the phenomenon of plasticization hardening in epoxy adhesives when subjected to normal loads, with experimentation using an assembly in a universal testing machine and the analysis of results using the Levenberg-Marquardt algorithm to model and analyze their mechanical behavior in order to study and describe the performance of these adhesives in practical applications.

It was observed that, as the rate of application of the normal load on the adhesive increased, the yield stress also increased, although with considerable scatter due to noise. The data were adjusted to the plasticity models with linear and nonlinear hardening by implementing the Levenberg-Marquardt algorithm using the MATLAB tool, which favored when optimizing the error between the theoretical models and the experimental data, obtaining an average maximum mean square error of 11.83%, corresponding to the highest speed.

* Degree Work

**Faculty of Physico-mechanics. School of Mechanical Engineering. Director: William Pinto Hernandez. PhD: Mechanical Engineering.

Introducción

La unión de piezas se ha hecho indispensable para la vida cotidiana desde el uso más simple como la reparación de objetos rotos en la decoración de una casa, hasta, la construcción de aeronaves de gran envergadura con características aerodinámicas bastante destacables. Según (Petrie, 2006) “los adhesivos epoxi se introdujeron comercialmente en 1946 y tienen una amplia aplicación en el mercado automotriz, industrial y aeroespacial” (p.1). La instalación de sistemas de tuberías, la fijación de materiales roscados y los terminados en diferentes tipos de construcciones se suman a las muchas aplicaciones en las que se pueden encontrar a los adhesivos epoxis debido a su gran capacidad de adhesión. Sin embargo, en algunos casos para superficies de baja energía como elastómeros y plásticos no tratados este adhesivo suele no funcionar de la mejor manera (Petrie, 2006, p.1).

En la industria se ha buscado constantemente el mejoramiento de las características tanto físicas como químicas en dispositivos electrónicos y estructurales, tratando de reducir la complejidad en el proceso de construcción reemplazando las soldaduras tradicionales entre piezas de un mismo material por la unión de dos o más materiales de diferente naturaleza mediante el uso de adhesivos y aportando características dinámicamente favorables. (HENKEL LOCTITE, 2010) afirma:

Las uniones adhesivas poseen ciertas ventajas sobre los métodos de unión convencionales como, por ejemplo, una mejor distribución de la tensión sobre toda el área de unión, además que el adhesivo no produce cambios en la superficie de los materiales unidos y permite reducir el peso de la estructura, etc. (p.52).

Existe un tipo de adhesivo común en estas aplicaciones conocido como resina epoxi o

adhesivo epóxico, el cual se caracteriza por su amplio uso en diferentes industrias como la electrónica para aislar componentes de circuitos o para recubrimiento de generadores y transformadores (BECOSAN, s.f.). Además, se ha hecho común usar los adhesivos epoxis por su fácil aplicación, su bajo costo y por tener un tiempo de secado o curado relativamente bajo a temperaturas ambiente.

Desde la variedad de aplicaciones que se derivan de este tipo de adhesivos, surge la imperante necesidad de comprender su comportamiento mecánico en diferentes escenarios, ya sea sometido a cargas normales, cortantes o de fatiga. Este análisis suscita preguntas cruciales acerca de cuál sería la carga máxima que dicha unión adhesiva podría resistir teniendo en cuenta específicamente una aplicación de carga netamente normal. Para abordar tales interrogantes de manera precisa, es fundamental llevar a cabo un estudio detenido de las propiedades mecánicas del adhesivo en cuestión.

Es este imperativo el que da origen al presente proyecto de investigación, cuyo objetivo radica en una evaluación minuciosa del fenómeno de endurecimiento por plastificación. Este fenómeno se manifiesta como una forma de fallo que acontece cuando el adhesivo es sometido a cargas normales que lo exigen más allá de su límite elástico, provocando una alteración significativa en su comportamiento mecánico y la rigidez en su estado de esfuerzo.

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se planteará un montaje en una máquina de ensayos universal (MTS) donde se someten dos piezas metálicas unidas con un adhesivo epoxi a una carga normal pura, siguiendo la norma ASTM D2095, encargada de los ensayos relacionados con la resistencia a la tracción de adhesivos por medio de probetas de barras y varillas, lo que permitirá conocer el punto máximo de operación del adhesivo y su comportamiento mecánico.

Para comprender y analizar el comportamiento del adhesivo de manera exhaustiva, se

llevará a cabo un proceso de modelado mediante el uso de software especializado para el proceso de ajuste del modelo con los datos. Este enfoque se apoyará sólidamente en la fundamentación teórica, tomando como base principal el algoritmo de Levenberg-Marquardt. El objetivo es realizar una evaluación de las propiedades mecánicas del adhesivo, con un enfoque específico en su respuesta al endurecimiento por plastificación. Este enfoque permitirá una evaluación completa de cómo evoluciona su comportamiento en diferentes condiciones, proporcionando así una comprensión más profunda de su desempeño en aplicaciones prácticas.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Contribuir por medio de la escuela de Ingeniería Mecánica a la misión de la Universidad Industrial de Santander en investigación y desarrollo regional, nacional e internacional, evaluando el comportamiento del endurecimiento por plastificación en un adhesivo tipo epoxi bicomponente sometido a carga normal en un montaje de material acero-acero.

1.2 Objetivos Específicos

- Modelar el adhesivo y valorar los efectos del endurecimiento por plastificación en un adhesivo epóxico según los modelos de plasticidad lineal y no lineal.
- Evaluar el efecto de la velocidad de aplicación de la carga realizando ensayos experimentales para tres velocidades (0.1 mm/min, 0.2 mm/min y 0.3 mm/min).
- Ajustar el modelo de plasticidad con endurecimiento lineal según el algoritmo de Levenberg-Marquardt usando la herramienta Matlab.

2. Marco Teórico

Una breve, pero precisa introducción a todos los elementos y definiciones en los que se basan este proyecto es de gran utilidad para entender los objetivos y resultados esperados del mismo, por ello se inicia esta parte con la exposición de los principales conceptos de este tema de investigación.

2.1 Adhesivos y sustratos

Un adhesivo en su definición más simple es un material el cual, aplicado entre la superficie de dos materiales puede mantenerlos unidos y ejercer una fuerza o resistencia a que sean separados mediante cualquier tipo de esfuerzo, estos esfuerzos pueden ser por cargas normal o cortante, de pelado, de impacto y entre otras dependiendo del campo de aplicación y de las condiciones a las que se sometan los materiales.

Existen diferentes tipos de adhesivos que hoy son utilizados en muchos campos a nivel cotidiano e industrial de los cuales principalmente destacan los adhesivos de poliuretanos, adhesivos de cianocrilato y los adhesivos de epoxi, este último grupo de adhesivos mencionados es el abordado en este proyecto debido a su fácil adquisición a nivel comercial y a su relativo bajo costo obteniendo buenas aplicaciones y propiedades que los hacen una atractiva opción en el ámbito investigativo.

Otro término importante para definir es el *Sustrato*, este es el material al cuál se le aplica el adhesivo sobre cualquiera de sus superficies para ser unido con otro de su misma o diferente naturaleza. Los adhesivos presentan una gran facilidad a la hora de escoger su sustrato ya que pueden ser utilizados en un gran número de diferentes materiales, como por ejemplo en uniones de metales, de estructuras compuestas, de plásticos, de caucho e incluso en uniones de madera.

2.2 Factores importantes en la unión

2.2.1 Estado superficial

Como menciona en el texto (Liesa, F et al., 1990) “Nos podemos encontrar con superficies ásperas, es decir, superficies en las que su perfil denota la presencia de picos y valles, o poros o capilaridades. Al aplicar el adhesivo sobre estas superficies, este, no se extiende como lo hace sobre un sustrato liso ya que se producen bolsas de aire entre el adhesivo y el sustrato” Esto sugiere considerar la porosidad de la superficie del sustrato a la hora de aplicar el adhesivo, ya que dependiendo del nivel de viscosidad del adhesivo aplicado sobre una superficie muy porosa o rugosa puede llegar a alterar el efecto de adherencia del adhesivo.

Es normal encontrar contaminantes en la superficie de los sustratos como por ejemplo el óxido que siempre se encontrará en sustratos metálicos sin resistencia inoxidable, además de suciedad y cualquier tipo de contaminantes presentes en el aire, y en casos extremos, aceites y grasas que hayan sido manipulados con cercanía a la superficie de los sustratos (Chico, B et al., 2000).

Un factor importante de los adhesivos es que tienen una tolerancia frente a estos contaminantes presentes en los sustratos, absorbiendo gran parte de ellos o desplazándolos sino están lo suficiente unidos a la superficie, sin que exista una excesiva pérdida a la resistencia en la unión (Liesa, F et al., 1990). Es normal pensar que el adhesivo se comportaría idealmente y con mayor desempeño cuando se aplica sobre una superficie perfectamente lisa pero la experimentación ha demostrado que al menos un porcentaje de rugosidad en la superficie puede incrementar la adhesión y la resistencia a la unión.

2.2.2 Espesor

El espesor de capa del adhesivo está relacionado con la cantidad de adhesivo que es aplicado en las superficies a unir, es de pensar que este factor debe estar directamente relacionado

con la resistencia a la unión ya que debe ser diferente si se aplica una gran cantidad de adhesivo a si se aplica una mínima.

(Liesa, F et al., 1990) Plantea “La teoría elástica nos dice que las capas gruesas deberían ser más resistentes. Varias razones hacen considerar los espesores delgados como más adecuados para lograr una buena resistencia a la unión”. Es lógico pensar que una gran cantidad de adhesivo puede hacer que la unión sea más resistente a las fuerzas que sea sometida, pero una mayor cantidad de adhesivo puede incrementar la presencia de burbujas de aire debilitando la unión. Además, una mayor cantidad de adhesivo incrementa la probabilidad de cristalización perdiendo sus propiedades de adherencia con más rapidez.

Al tratarse de una película delgada de adhesivo, estas requieren de mayores esfuerzos para ser deformadas en comparación con una película gruesa y al ser más delgada presentan menos tensiones internas ya que estas se relacionan directamente proporcional al espesor de la película de adhesivo menciona Liesa, F en su texto.

Una cantidad muy grande o poca de adhesivo puede afectar la resistencia que presenta la unión, por ello, se debe escoger la cantidad óptima de adhesivo teniendo en cuenta que se cubra toda la superficie del sustrato, así como sus ondulaciones y niveles superficiales, además el adhesivo absorbido por los poros y el desplazado hacia el exterior de la superficie.

2.2.3 Curado del adhesivo

Esta podría considerarse una de las partes más importantes en el proceso de adhesión de dos superficies mediante un adhesivo, si bien se ha resaltado la importancia de una superficie de sustrato libre de impurezas para una mayor adherencia del adhesivo y de la relevancia del espesor del adhesivo en la resistencia final de la unión. El proceso y tiempo de curado también son fundamentales ya que definen el comportamiento mecánico, químico y térmico que tendrá el

adhesivo al final del proceso (Santos, J. Y. E., et al., 2023).

Como plantea (Abenojar, J et al., 2009) “Durante el proceso de curado, la resina epoxi se transforma pasando de ser un material de bajo peso molecular a ser un sistema polimérico con alto grado de entrecruzamiento, y son estas cadenas entrecruzadas las que confieren las características de rigidez y resistencia”. Entonces obtener un mayor grado de entrecruzamiento se relaciona con un mejor proceso de curado, por ello en algunos adhesivos utilizados en aplicaciones estructurales es necesario un post-curado el cual puede variar dependiendo de la naturaleza del adhesivo.

Los procesos de post-curado en adhesivos epóxicos con aplicaciones estructurales suelen ser mediante un tratamiento térmico a temperaturas más altas que la temperatura ambiente (alrededor de 80-150°C) durante un tiempo específico. Existen estudios sobre diferentes tipos de adhesivos en los cuales se observan mejorías en sus propiedades mecánicas, químicas y eléctricas después de un post-curado. Por fortuna, la mayoría de los adhesivos comerciales utilizados a nivel industrial contienen en sus manuales del fabricante el tiempo óptimo de curado a temperatura ambiente y si de ser necesario un post-curado se incluyen los rangos de temperatura y tiempo recomendados para tener un mejor resultado en las propiedades del adhesivo.

2.3 Preparación de la superficie

Como menciona (Alguacil, L. M. 2013) una superficie que no ha sido tratada puede contener impurezas no deseables que pueden afectar considerablemente la resistencia del adhesivo aplicado, en muchas ocasiones se ha relacionado los fallos de adhesión de una unión con la selección del adhesivo incorrecto cuando en realidad no se ha hecho una preparación correcta de la superficie haciendo que el adhesivo no se comporte correctamente.

Los dos métodos más comunes para preparar una superficie suelen ser mediante un proceso químico o mecánico, la selección de cualquiera de estos dos métodos depende principalmente de

la capacidad de encontrar en el mercado los elementos indicados para cada caso, sean solventes para el proceso químico o, herramientas para el proceso mecánico.

2.4 Modelos clásicos de endurecimiento por deformación

Según H. Rappel (2019) al momento de plantear el comportamiento elástico/plástico de un material cuando es sometido a una fuerza de tensión/compresión, es necesario conocer los modelos teóricos los cuales son un ajuste al comportamiento experimental, y así poder entender y representar el fenómeno que sucede. Existen diferentes modelos del comportamiento elástico/plástico cuando se aplica una carga al material para generar un endurecimiento por plastificación, estos modelos son: *Elasticidad lineal con plasticidad perfecta*, *Elasticidad lineal con plasticidad lineal*, *Elasticidad lineal con plasticidad no-lineal*.

El modelo elástico lineal asume una relación entre el esfuerzo y la deformación cuando se trata de una carga de tensión/compresión unidireccional, esta relación se escribe como:

$$\sigma(\epsilon, x) = E\epsilon \quad (1)$$

Donde σ representa el esfuerzo, ϵ la deformación y x el parámetro del material, en este caso $x = E$ donde E es el Módulo de Young.

2.4.1 Modelo de elasticidad lineal con endurecimiento lineal

Según H. Rappel (2019) el modelo de elasticidad lineal con endurecimiento lineal adopta un comportamiento de endurecimiento perfecto, pero incluye el módulo de plasticidad en su función de rendimiento, esta se escribe entonces:

$$f(\sigma) = |\sigma| - \sigma_{y0} - H\alpha \leq 0 \quad (3)$$

Donde σ_{y0} es el esfuerzo inicial a la fluencia, f la función de fluencia y H el módulo de plasticidad del material. En este caso $x = [E \ \sigma_{y0} \ H]^T$ representaría los parámetros del modelo.

Como plantea Soto Figueroa, J. (2008) esta función de rendimiento obedece las condiciones de Kuhn–Tucker, estas aseguran que la disipación de energía:

$$\dot{\alpha} \geq 0, \quad f(\sigma) \leq 0, \quad \dot{\alpha}f(\sigma) = 0 \quad (4)$$

En consecuencia, según H. Rappel (2019) la relación de esfuerzo-deformación durante una prueba de tracción se escribe:

$$\sigma(\epsilon, x) = \begin{cases} E\epsilon & \text{Si } \epsilon < \frac{\sigma_{y0}}{E} \\ \sigma_{y0} + H\epsilon_p & \text{Si } \epsilon > \frac{\sigma_{y0}}{E} \end{cases} \quad (5)$$

Donde ϵ_p es la deformación plástica, y se conoce la relación entre la deformación elástica y la deformación total:

$$\epsilon_p = \epsilon - \epsilon_e \quad (6)$$

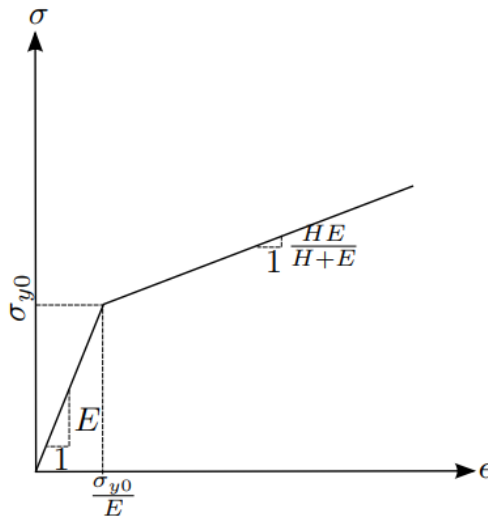
Esta función por partes puede escribirse utilizando la función escalón de Heaviside ($u(\cdot)$), entonces puede expresarse como:

$$\sigma(\epsilon, x) = E\epsilon \left(1 - u\left(\epsilon - \frac{\sigma_{y0}}{E}\right)\right) + \left(\sigma_{y0} + \frac{HE}{H+E}\left(\epsilon - \frac{\sigma_{y0}}{E}\right)\right) u\left(\epsilon - \frac{\sigma_{y0}}{E}\right) \quad (7)$$

Esta expresión se puede ver gráficamente en la figura 1 donde se observa teóricamente el comportamiento elástico del material desde el origen hasta el primer cambio de pendiente los cuales son, por una parte, el esfuerzo inicial de fluencia del adhesivo σ_{y0} y, por otra parte, la

deformación inicial a la fluencia ϵ_{y0} o, su equivalente, $\frac{\sigma_{y0}}{E}$ quien a su vez es la deformación elástica ϵ_e . A partir del punto de fluencia, se puede observar teóricamente el comportamiento plástico lineal del adhesivo donde su pendiente se ve representada por la expresión $\frac{HE}{H+E}$.

Figura 1 Modelo de plasticidad lineal



Nota. Tomada de A Tutorial on Bayesian Inference to Identify Material Parameters in Solid Mechanics. (p. 6), Rappel, H., Beex, L. A. A., Hale, J. S., Noels, L., & Bordas, 2020, Barcelona.

2.4.2 Modelo de elasticidad lineal con endurecimiento no-lineal

Este modelo adopta una forma similar a la del endurecimiento lineal, pero difiere en la función de rendimiento donde se halla un cambio en la linealidad del factor de deformación plástica acumulada, escribiéndose entonces:

$$f(\sigma) = |\sigma| - \sigma_{y0} - H\alpha^n \leq 0 \tag{8}$$

Donde n es un parámetro adicional del material plástico y representa el módulo de no linealidad, por lo tanto $x = [E \ \sigma_{y0} \ H \ n]^T$.

Según H. Rappel (2019), para un ensayo de prueba de tracción unidireccional, la relación esfuerzo-deformación respondería de la forma:

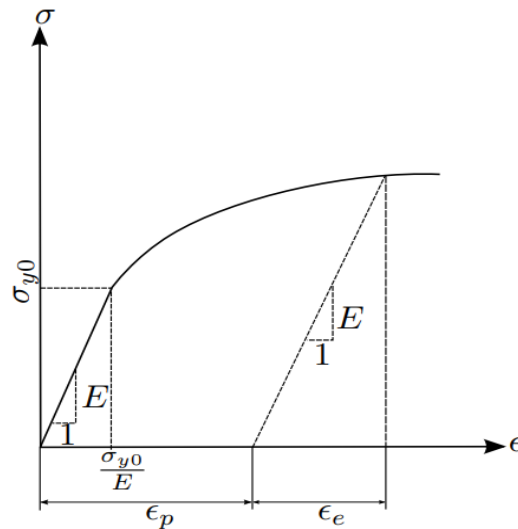
$$\sigma(\epsilon, x) = \begin{cases} E\epsilon & \text{Si } \epsilon < \frac{\sigma_{y0}}{E} \\ \sigma_{y0} + H\epsilon_p^n & \text{Si } \epsilon > \frac{\sigma_{y0}}{E} \end{cases} \quad (9)$$

Utilizando la función escalón de *Heaviside* ($u(\cdot)$), se puede escribir de la forma:

$$\sigma(\epsilon, x) = E\epsilon \left(1 - u\left(\epsilon - \frac{\sigma_{y0}}{E}\right) \right) + \left(\sigma_{y0} + H \left(\epsilon - \frac{\sigma_{y0}}{E} \right)^n \right) u\left(\epsilon - \frac{\sigma_{y0}}{E}\right) \quad (10)$$

Cabe resaltar que la ecuación (10) es una expresión implícita de la función $\sigma(\epsilon, x)$ ya que se ve tanto al lado izquierdo como al lado derecho de la ecuación, esto indica que no puede ser determinado de forma analítica si ϵ es conocido. Esto contrasta la diferencia entre la función anterior la cual se escribe de forma explícita lo que significa que puede calcularse si ϵ es conocido.

Esta expresión se puede ver gráficamente en la figura 2 donde, se observa teóricamente el comportamiento elástico del material desde el origen hasta el primer cambio de pendiente los cuales son, por una parte, el esfuerzo inicial de fluencia del adhesivo σ_{y0} y, por otra parte, la deformación inicial a la fluencia ϵ_{y0} o, su equivalente, $\frac{\sigma_{y0}}{E}$. Sin embargo, a diferencia de la figura 1 después del punto de fluencia, se puede observar teóricamente un comportamiento plástico no lineal donde su pendiente se va cambiando decrecientemente y es posible determinarla mediante la ecuación (10).

Figura 2 Modelo de plasticidad no lineal

Nota. Tomada de A Tutorial on Bayesian Inference to Identify Material Parameters in Solid Mechanics. (p. 6), Rappel, H., Beex, L. A. A., Hale, J. S., Noels, L., & Bordas, 2020, Barcelona.

2.5 Algoritmo de Levenberg-Marquardt

También conocido como el método de mínimos cuadrados amortiguados, es utilizado para resolver problemas de mínimo cuadrados no lineales, Gavin (2007) afirma que los problemas de mínimos cuadrados surgen en el contexto de ajustar un modelo matemático parametrizado (como en el caso de los modelos planteados) a un conjunto de puntos de datos, minimizando un objetivo expresado como la suma de los cuadrados de los errores entre la función del modelo y un conjunto de puntos de datos. Si el ajuste de la función no es lineal en sus parámetros, el problema de mínimos cuadrados requiere un algoritmo de solución iterativo. Dichos algoritmos reducen la suma de los cuadrados de los errores entre la función del modelo y los puntos de datos a través de una secuencia de actualizaciones de los valores de los parámetros del modelo.

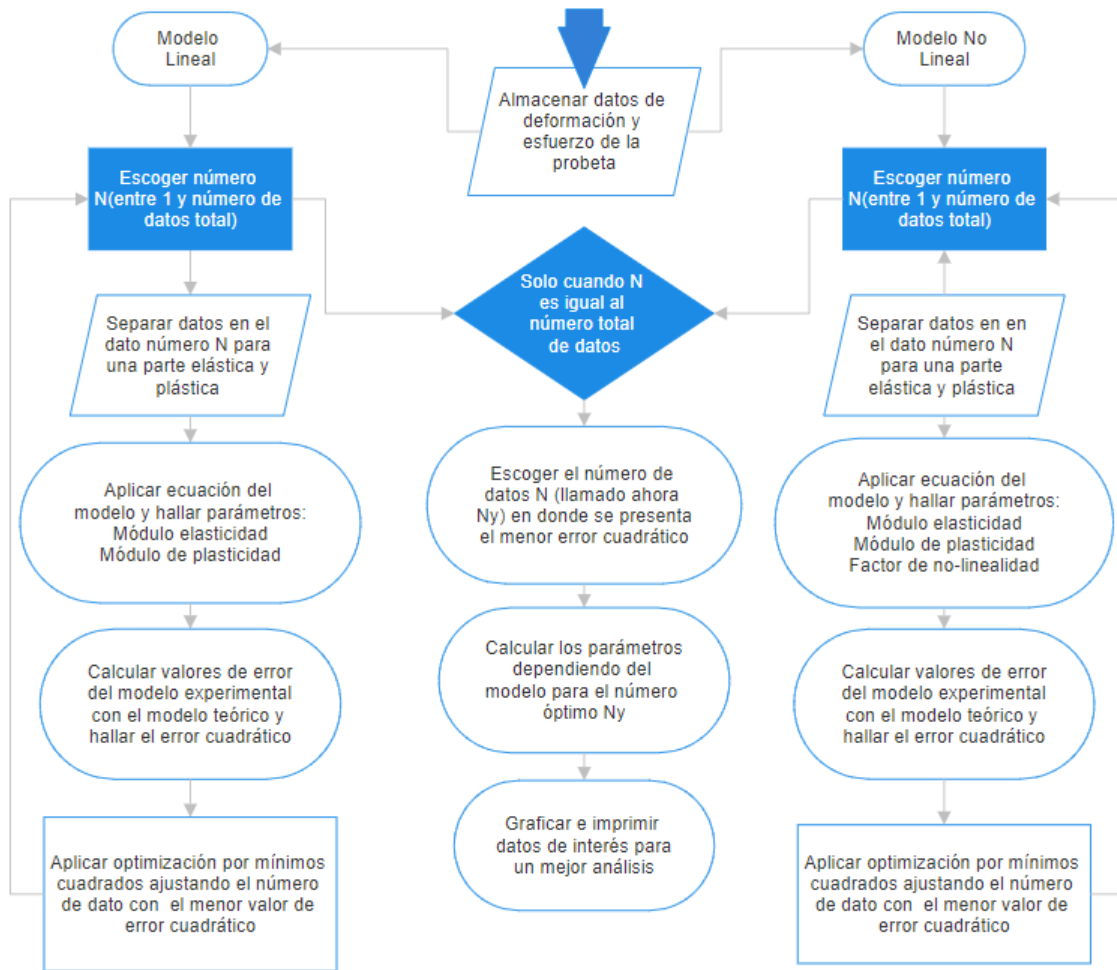
El algoritmo de Levenberg-Marquardt combina dos algoritmos de minimización numérica: el método de descenso de gradiente y el Método de Gauss-Newton. En el método de descenso de

gradiente, la suma de los errores cuadráticos se reduce actualizando los parámetros en la dirección de descenso más pronunciado. En el método de Gauss-Newton, la suma de los errores al cuadrado se reduce asumiendo el mínimo función de cuadrados que es localmente cuadrática en los parámetros, y encontrar el mínimo de este cuadrático.

El método de Levenberg-Marquardt actúa más como un gradiente de descenso cuando los parámetros están lejos de su valor óptimo, y actúa más como el método de Gauss-Newton cuando los parámetros están cerca de su valor óptimo.

En la figura 3 se puede observar mediante diagramas de flujo como este algoritmo se implementa y funciona para obtener los resultados deseados. Iniciando con la recolección de los datos obtenidos experimentalmente, luego con la selección del modelo a utilizar, luego con la identificación de una variable la cual se define como N que es el valor en donde se separan los datos para obtener una parte elástica y una parte plástica que posteriormente abre la posibilidad de calcular los principales parámetros como lo son el módulo de elasticidad y plasticidad, así como también el factor de no linealidad cuando se trata del modelo lineal, luego de realizar este proceso se puede calcular el porcentaje de error con la diferencia que existe entre el modelo teórico y los datos experimentales, donde luego se implementa la función optimización por el método de mínimos cuadrados para hallar el valor de N cuando el error es el mínimo posible, finalmente arrojando un resultado para un N óptimo el cual se llama N_y que finalmente permite calcular los parámetros finales así como representar gráficamente los modelos teóricos que mejor se adaptan al modelo experimental luego de que la optimización se presenta de forma adecuada.

Figura 3 Diagrama de flujo de aplicación del algoritmo



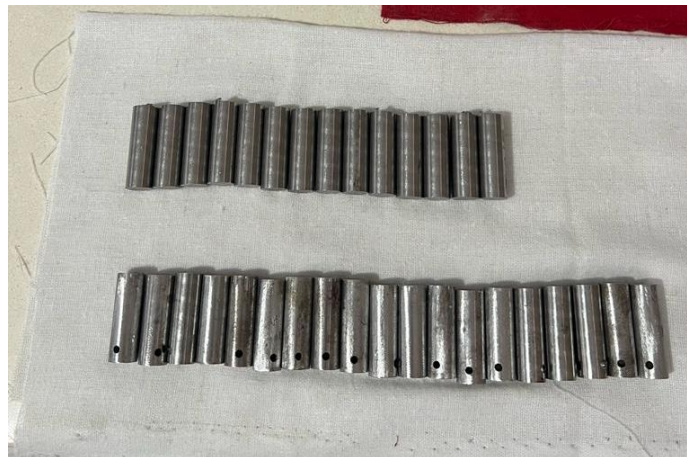
3. Metodología

3.1. Selección de materiales y métodos

3.1.1. Probetas

Las probetas serán diseñadas de material acero SAE 1020 bajo la norma ASTM D2094 (Práctica para la preparación de muestras de barras y varillas para pruebas de adhesión), esta norma describe probetas de ensayo de adhesión unidos a tope tipo barra y varilla además de los procedimientos para prepararlos y unirlos. La norma enfatiza que las dimensiones recomendadas para las probetas empleadas en las pruebas de tracción son: $D= \frac{1}{2}$ " (12.7mm) y $L=1.5$ " (38.1mm).

Figura 4 *Probetas de prueba bajo la norma ASTM D2094*



3.1.2. Adhesivo

El adhesivo escogido para la aplicación sobre el sustrato es conocido comercialmente como Loctite Epoxi Bonder ver figura 4, según (*Epoxi Bonder Transparente*, n.d.) “es un Adhesivo epóxico extra fuerte de uso universal que endurece en 5 minutos y puede ponerse en operación en 1 hora. Su acabado transparente, fuerza extrema, resistencia al agua y a temperaturas extremas lo hace ideal para pegar, reparar o rellenar cualquier tipo de material.”.

Figura 5 Adhesivo epóxico LOCTITE EPOXI-BONDER

Nota. https://www.loctite-consumidor.co/cuando-necesite-una-union-perfecta-loctite-jamas-te-abandona/productos/epoxy-bonder-category/epoxibonder_transparente.html.

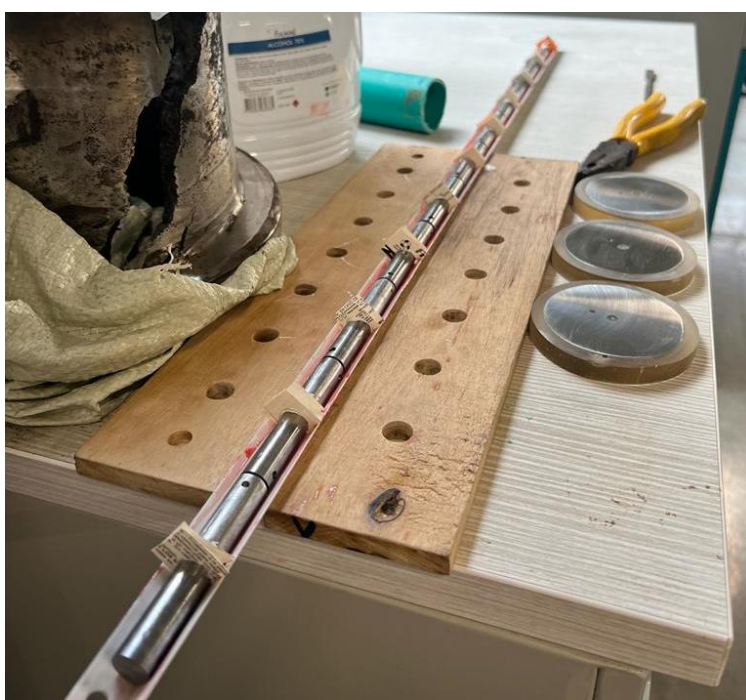
3.1.3. Métodos

Los ensayos de tracción se realizarán bajo la norma ASTM D2095 (Método de prueba estándar para resistencia a la tracción de adhesivos por medio de probetas de barras y varillas) donde las pruebas se llevarán a cabo mediante la sujeción de la probeta en estudio desde sus extremos y se le aplicarán tres velocidades diferentes en una máquina de ensayos universal marca Mechanical Testing Systems (MTS) ver figura 5, que se encuentra en las instalaciones de investigación de la escuela de ingeniería mecánica de la universidad.

Figura 6 *Máquina de ensayos universal MTS*

3.1.4. Moldes de fijación

Para el proceso de fabricación del molde de fijación se evaluaron tres opciones dentro de las cuales estaba que las probetas se unieran una sobre la otra o en diagonal, sin embargo, se optó por un tramo de ángulo estándar de 1 metro aproximadamente que garantizaba una completa concetricidad entre las probetas y además permitía medir la separación entre ellas para que, de esta forma, el valor del espesor de película permaneciera constante. Este molde permitiría obtener 10 probetas finalmente unidas con el adhesivo en consideración.

Figura 7 Molde para alineación y pegado

3.2. Preparación de pruebas mecánicas

3.2.1. Diseño y elaboración de probetas

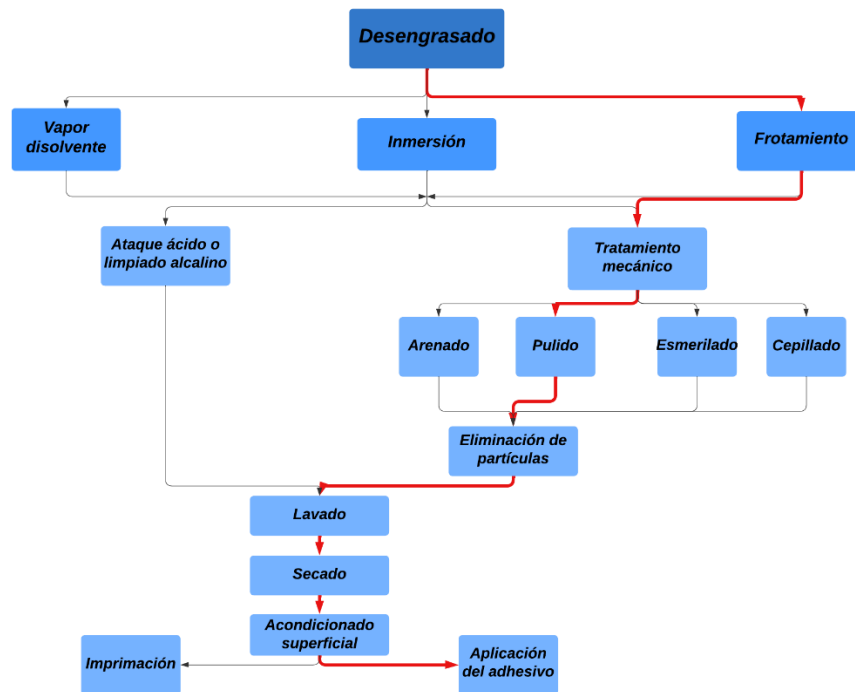
Las probetas de ensayo son obtenidas utilizando una sierra mecánica para cortar una varilla de acero de 1 metro de largo y $\frac{1}{2}$ '' de diámetro con el largo deseado en cada probeta obteniendo así 60 cuerpos de ensayo.

Es normal que la superficie de las probetas después de ser cortadas por la sierra eléctrica de metal presente un gran nivel de suciedad debido a la viruta desplazada por el corte y también un alto nivel en la rugosidad por los diferentes niveles de superficie, por ello se realiza un refrentado y pulido sobre cada superficie como se observa en la figura 7, mejorando la superficie donde será aplicado el adhesivo y consiguiendo un nivel óptimo de rugosidad.

Figura 8 *Proceso de refrentado de las probetas*

3.2.2. Preparación de superficie de las probetas para ensayo mecánico

Una preparación de superficie de forma mecánica puede ser más sencilla y económica obteniendo buenos resultados en la resistencia del adhesivo si se siguen los pasos respectivos y utilizando los materiales que recomienda la norma, en la figura 8 se puede observar el proceso que se seguirá para preparar la superficie posteriormente a la aplicación del adhesivo.

Figura 9 *Proceso de preparación de superficie*

Nota. Adaptada de Adhesivos industriales (Vol. 39) (p.30), Liesa, F., Alter, L. B., & Bilurbina, L., 1990, Marcomb.

Este proceso de preparación se dividirá en los siguientes pasos, los cuales se realizarán de la mejor manera posible para garantizar una buena condición en la superficie antes de aplicar el adhesivo y así disminuir los errores en los resultados obtenidos del ensayo mecánico.

3.2.2.1. Primer paso: Refrentado. La superficie de la probeta de ½” requiere estar lo más centrada posible respecto a la otra con la que será unida por medio del adhesivo, es por esto que es necesario realizar un refrentado en un torno a cada espécimen para garantizar la planicidad entre las superficies.

3.2.2.2. Segundo paso: Desengrasado por frotamiento. En este paso se busca remover impurezas como óxidos o grasas presentes en la superficie del sustrato producto del trabajo previo

realizado a la pieza, para esto se utiliza un paño remojado frotándolo cuidadosamente por la superficie de contacto.

3.2.2.3. Tercer paso: Tratamiento mecánico de superficie. Posteriormente, se realiza un lijado con una lija de alta rugosidad número 80 con la finalidad de garantizar que cada superficie tenga la misma rugosidad y no sea un factor de error a considerar al momento de analizar los resultados.

3.2.2.4. Cuarto paso: Tratamiento químico de superficie. En este paso, se buscará remover cualquier impureza presente como óxido o suciedad que no es posible percibir de manera visual sumergiendo las probetas en un baño de acetona justo antes de aplicar el adhesivo y realizar el experimento.

3.2.2.4. Quinto paso: Secado y acondicionamiento de superficie. Finalmente, se realiza el secado en una habitación parcialmente hermética (sin flujo de aire del exterior) durante 6 horas para garantizar una superficie completamente secado y sin presenciar de impurezas que puede contener el viento exterior.

3.2.3. Aplicación del adhesivo

3.2.3.1. Espesores de adhesivo en probetas de prueba. Las probetas se analizaron con un milímetro lineal de espesor de película de adhesivo para efectos de cálculo, por lo que, como se mencionó anteriormente, se escogió el molde con el fin de garantizar una separación igual entre ambas partes de la probeta a unir.

3.2.4. Proceso de curado

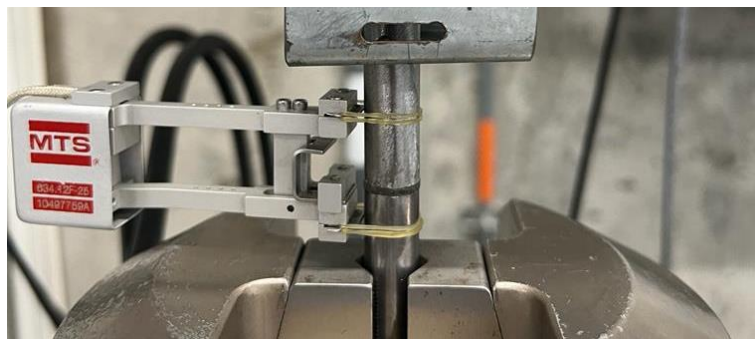
Para el proceso de curado se han escogido las condiciones ambientales de la ciudad de Bucaramanga, con una presión atmosférica 101,5 kPa, una temperatura promedio ambiente de 27,3°C y una humedad relativa promedio del 80%.

El adhesivo es aplicado en las probetas con 2 días de anticipación al día de ensayos y las probetas son dejadas al aire libre sin viento forzado durante este tiempo.

3.2.5. Proceso de montaje del experimento

3.2.5.1. Parámetros de medición. Como instrumento de medición se utilizará el extensómetro axial (Transductor de deformación) de MTS, como se observa en la figura este dispositivo será de gran utilidad al momento de medir la variación en la extensión de los objetos de prueba al ser sometidos a la carga axial durante el ensayo hasta la ruptura del adhesivo.

Figura 10 *Extensómetro axial*



Además, la fijación adecuada de las probetas en la máquina de ensayos es crucial para obtener resultados precisos y confiables. En este caso, fue necesario la adaptación de una extensión mecánica previamente diseñada con el fin de reducir considerablemente la desalineación presente entre las mordazas de la máquina de ensayos y así evitar la generación de esfuerzos cortantes o momentos que desviarán la concentración de la fuerza en dirección normal.

Figura 11 *Mecanismo acoplador para alineación de probetas*



3.2.5.2. Toma de datos. La toma de datos se realiza por medio del programa asignado a la MTS, el cual arroja de forma automática según la frecuencia establecida los datos de fuerza aplicada en cada instante de tiempo con los cuales, se realizará el análisis de esfuerzo vs deformación de cada probeta con su respectiva velocidad.

3.3. Ejecución de las pruebas y obtención de datos

Luego de tarar el equipo y realizar el debido procedimiento de montaje de la probeta se procede a iniciar la prueba donde los datos se van almacenando y se aprecia una variación en los valores de fuerza a medida que aumenta la deformación.

Figura 12 *Montaje del experimento*



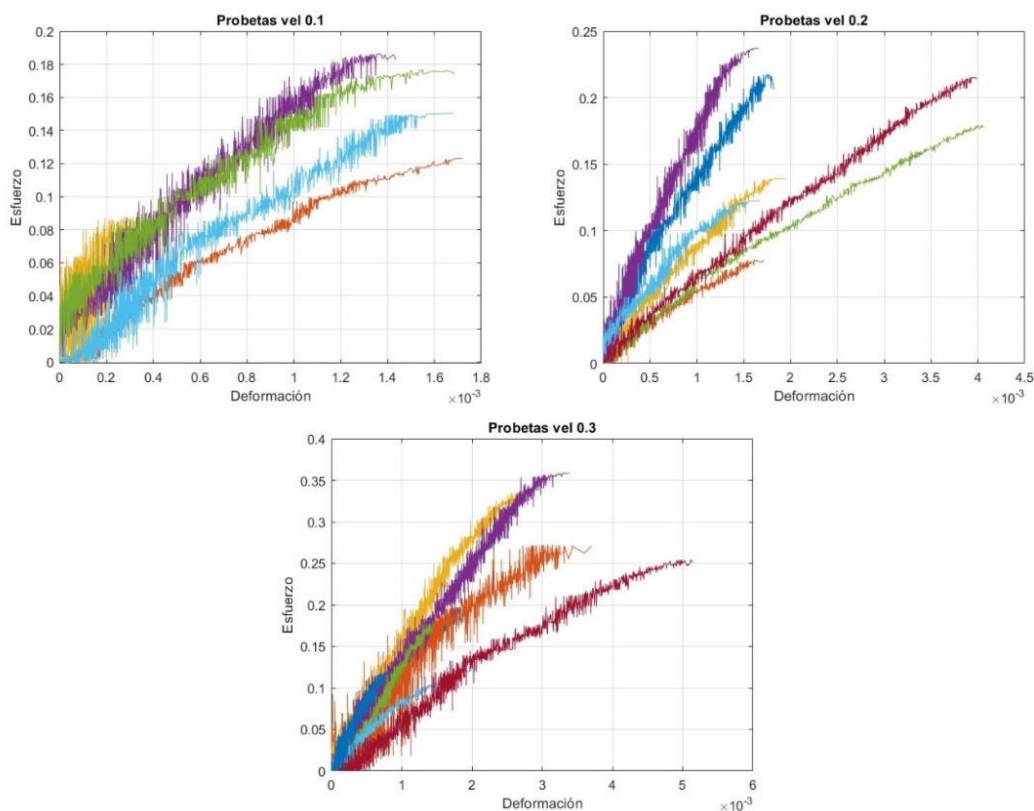
4. Análisis de resultados

4.1 Resultados.

4.1.1. Esfuerzo vs deformación

Desde la obtención de los datos de fuerza vs tiempo directamente desde la máquina de ensayos universal, fue posible observar el comportamiento de las probetas sometidas a fuerza axial con los diagramas de esfuerzo vs deformación mostrados en la figura 12 para las velocidades 0.1 mm/min, 0.2 mm/min y 0.3 mm/min, así:

Figura 13 Gráficas de Esfuerzo [Mpa] vs Deformación [mm/mm] de los ensayos de carga axial para cada una de las velocidades



De los datos graficados en la figura 13 fue posible identificar de forma visual que a medida que aumenta la velocidad de aplicación de la fuerza durante la prueba, aumenta como tal la capacidad del adhesivo para resistir a la deformación.

Sin embargo, para definir el rango de esfuerzo máximo que soporta la junta metálica antes de empezar a deformarse plásticamente se calcula el valor promedio del módulo de Young de cada una de las probetas para cada una de las velocidades mediante la implementación de los modelos de deformación plástica lineal y no lineal mencionados anteriormente.

4.1.2. Modelamiento del algoritmo

Para poder interpretar los valores asociados al módulo de Young en el modelo de deformación plástica con endurecimiento lineal, fue necesario realizar un ajuste al modelo según el algoritmo de Levenberg-Marquardt usando la herramienta Matlab lo cual arrojó la siguiente información según las velocidades:

4.1.2.1. Primera velocidad. La primera fase del modelamiento se realizó a las probetas de velocidad 0.1 [mm/min] de la siguiente manera:

Figura 14 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 3

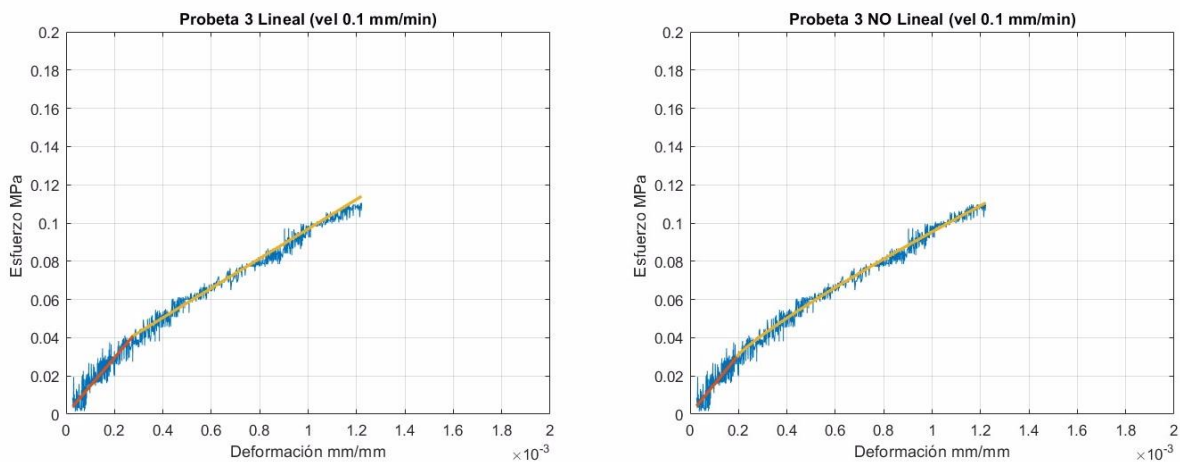


Figura 15 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 6

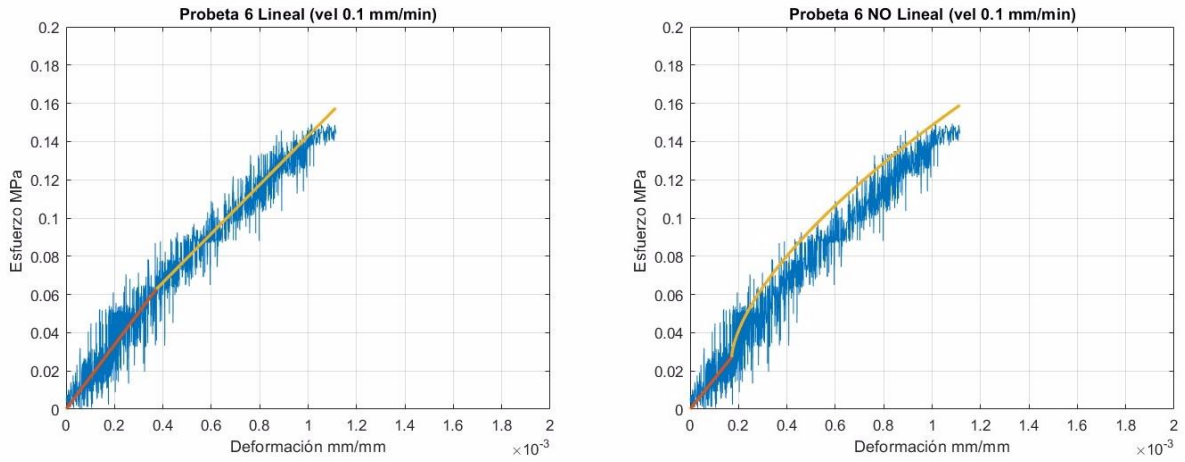


Figura 16 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 9

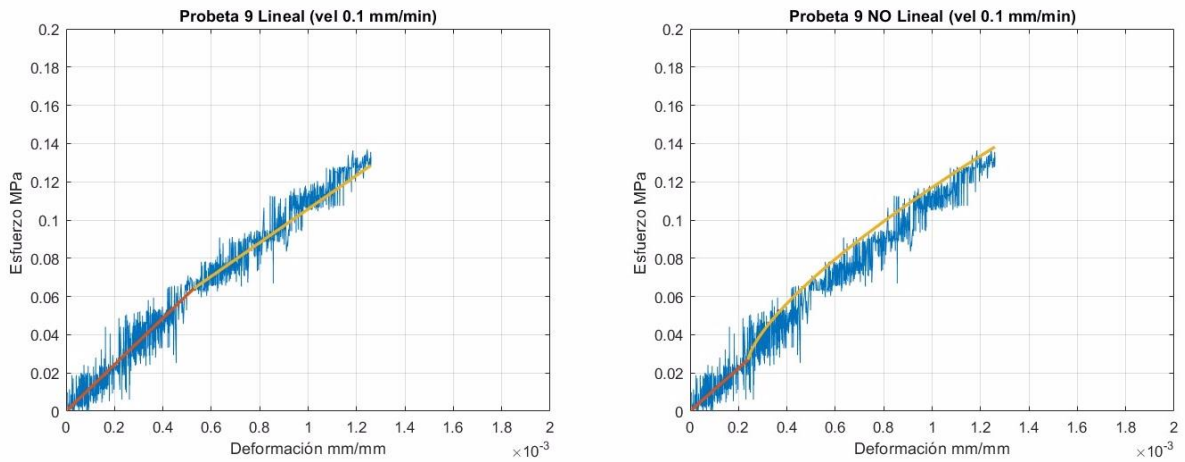


Figura 17 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 10

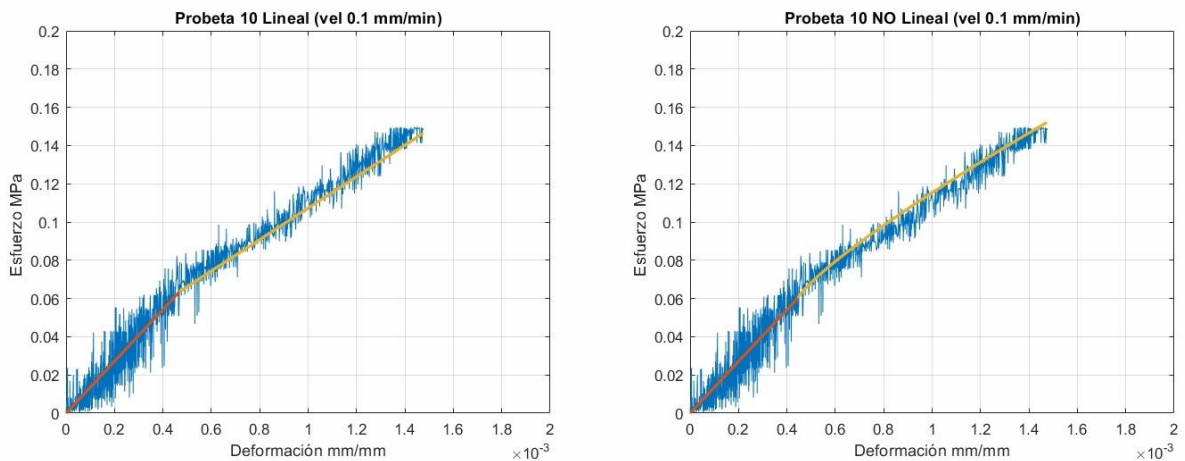


Tabla 1 Datos recolectados del modelo lineal para la velocidad 0.1 mm/min

MODELO LINEAL								
Velocidad [mm/min]	Nro	Módulo de Young E [Mpa]	Módulo de plasticidad lineal H [Mpa]	Deformación fluencia ϵ_{y0}	Esfuerzo fluencia σ_y [Mpa]	Deformación máxima $\epsilon_{máx}$	Esfuerzo máximo $\sigma_{máx}$ [Mpa]	% Error medio cuadrático
0,1	3	147,8	162,4	0,030%	0,0370	0,120%	0,1105	1,56%
	6	168,4	530,7	0,037%	0,0702	0,110%	0,1494	13,41%
	9	121,6	318,4	0,050%	0,0679	0,130%	0,1370	6,33%
	10	135,6	209,5	0,050%	0,0646	0,150%	0,1498	9,32%
	Promedios	143,4	305,2	0,042%	0,0599	0,128%	0,1367	7,66%

Tabla 2 Datos recolectados del modelo no lineal para la velocidad 0.1 mm/min

MODELO NO LINEAL									
Velocidad [mm/min]	Nro	Módulo de Young E [Mpa]	Módulo de plasticidad H [Mpa]	Módulo no linealidad(n)	Deformación fluencia ϵ_{y0} [mm/mm]	Esfuerzo fluencia σ_y [Mpa]	Deformación máxima $\epsilon_{máx}$ [mm/mm]	Esfuerzo máximo $\sigma_{máx}$ [Mpa]	% Error medio cuadrático
0,1	3	155,7	24,8	0,861	0,0002	0,0302	0,0012	0,1105	1,44%
	6	158,1	21,9	0,643	0,0002	0,0112	0,0011	0,1494	13,27%
	9	112,3	20,9	0,720	0,0002	0,0288	0,0013	0,1370	6,29%
	10	135,2	24,7	0,828	0,0004	0,0507	0,0015	0,1498	9,25%
	Promedios	140,3	23,1	0,763	0,0003	0,0302	0,0013	0,1367	7,56%

4.1.2.2. Segunda velocidad. La primera fase del modelamiento se realizó a las probetas de velocidad 0.2 [mm/min] de la siguiente manera:

Figura 18 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 13

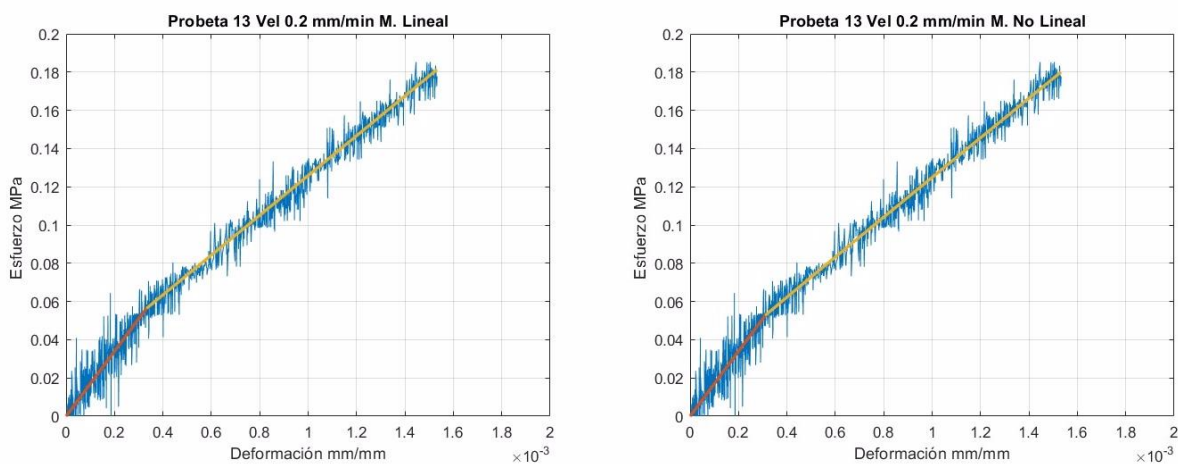


Figura 19 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 14

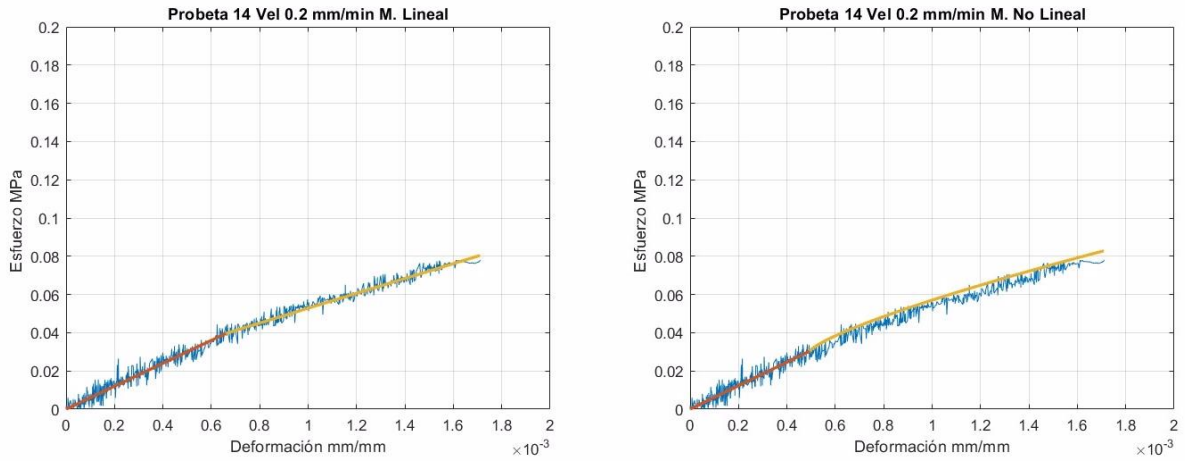


Figura 20 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 15

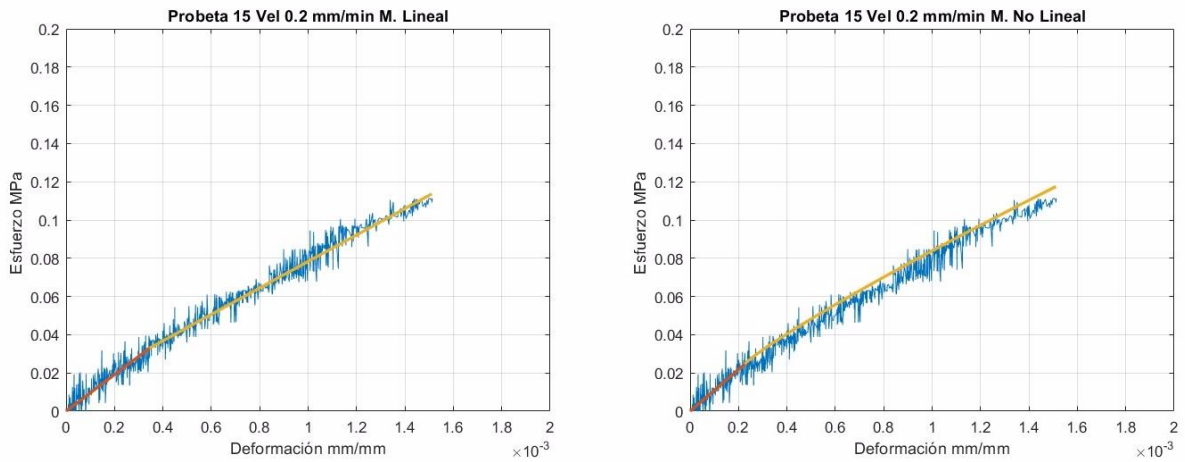


Figura 21 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 18

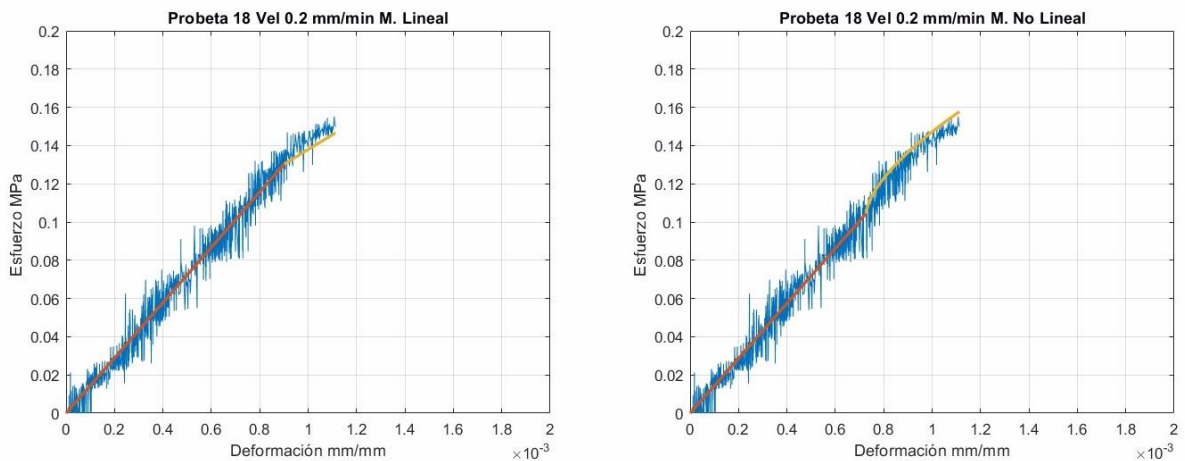


Tabla 3 Datos recolectados del modelo lineal para la velocidad 0.2 mm/min

MODELO LINEAL								
Velocidad [mm/min]	Nro	Módulo de Young E [Mpa]	Módulo de plasticidad lineal H [Mpa]	Deformación fluencia ϵ_{y0}	Esfuerzo fluencia σ_y [Mpa]	Deformación máxima $\epsilon_{m\acute{a}x}$	Esfuerzo máximo $\sigma_{m\acute{a}x}$ [Mpa]	% Error medio cuadrático
0,2	13	169,7	269,1	0,033%	0,0584	0,150%	0,1778	6,37%
	14	60,0	110,4	0,066%	0,0436	0,170%	0,0780	0,64%
	15	95,6	250,3	0,035%	0,0380	0,150%	0,1114	2,08%
	18	215,2	440,1	0,042%	0,0783	0,140%	0,2283	6,60%
	Promedios	135,1	267,5	0,044%	0,0546	0,153%	0,1489	3,92%

Tabla 4 Datos recolectados del modelo no lineal para la velocidad 0.2 mm/min

MODELO NO LINEAL									
Velocidad [mm/min]	Nro	Módulo de Young E [Mpa]	Módulo de plasticidad H [Mpa]	Módulo no linealidad(n)	Deformación fluencia ϵ_{y0} [mm/mm]	Esfuerzo fluencia σ_y [Mpa]	Deformación máxima $\epsilon_{m\acute{a}x}$ [mm/mm]	Esfuerzo máximo $\sigma_{m\acute{a}x}$ [Mpa]	% Error medio cuadrático
0,2	13	169,8	36,3	0,992	0,0003	0,0544	0,0015	0,1778	6,37%
	14	61,5	9,1	0,772	0,0005	0,0308	0,0017	0,0780	0,62%
	15	109,0	22,6	0,886	0,0002	0,0304	0,0015	0,1114	2,00%
	18	214,8	13,2	0,900	0,0005	0,0981	0,0014	0,2283	6,43%
	Promedios	138,8	20,3	0,887	0,0004	0,0534	0,0015	0,1489	3,86%

4.1.2.3. Tercera velocidad. La tercera fase del modelamiento se realizó a las probetas de velocidad 0.3 [mm/min] de la siguiente manera:

Figura 22 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 21

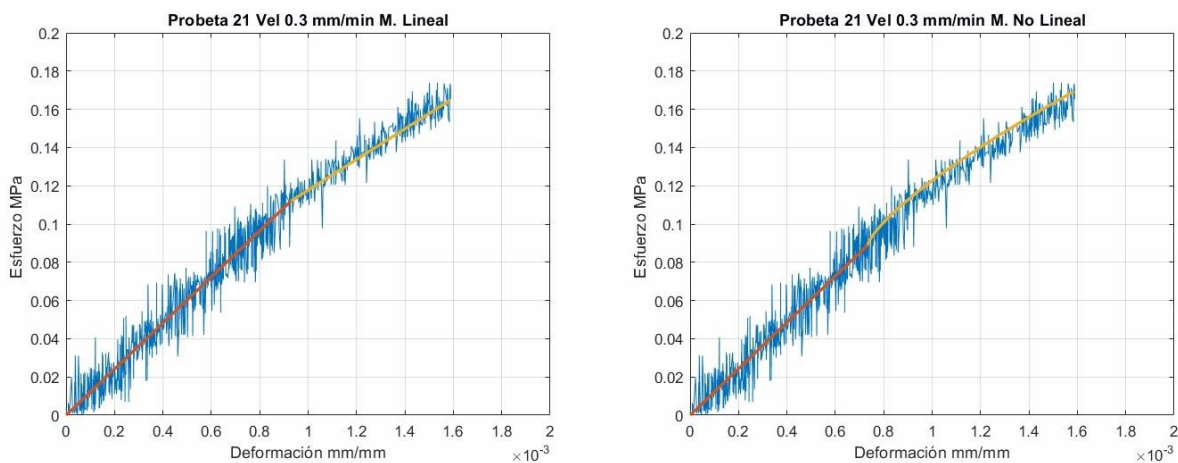


Figura 23 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 24

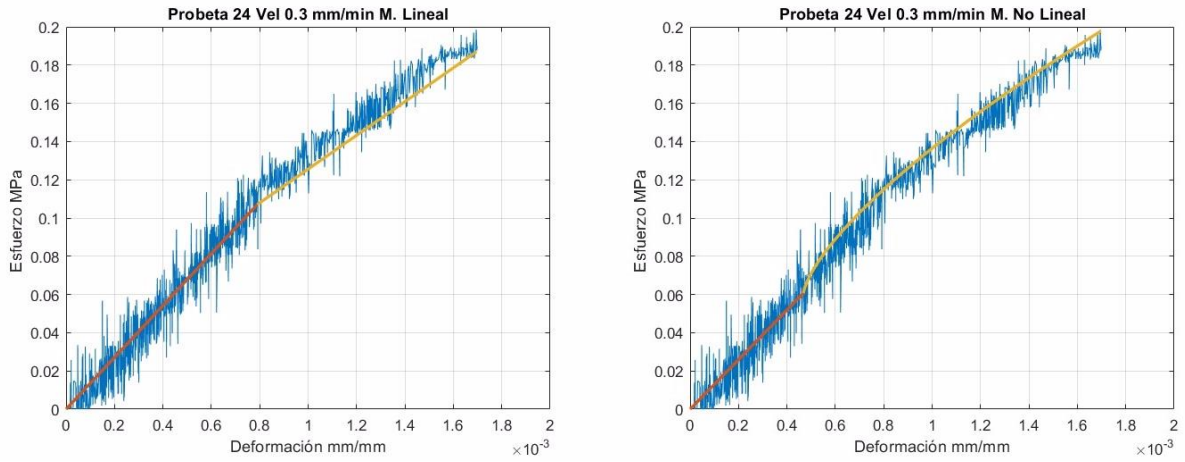


Figura 24 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 25

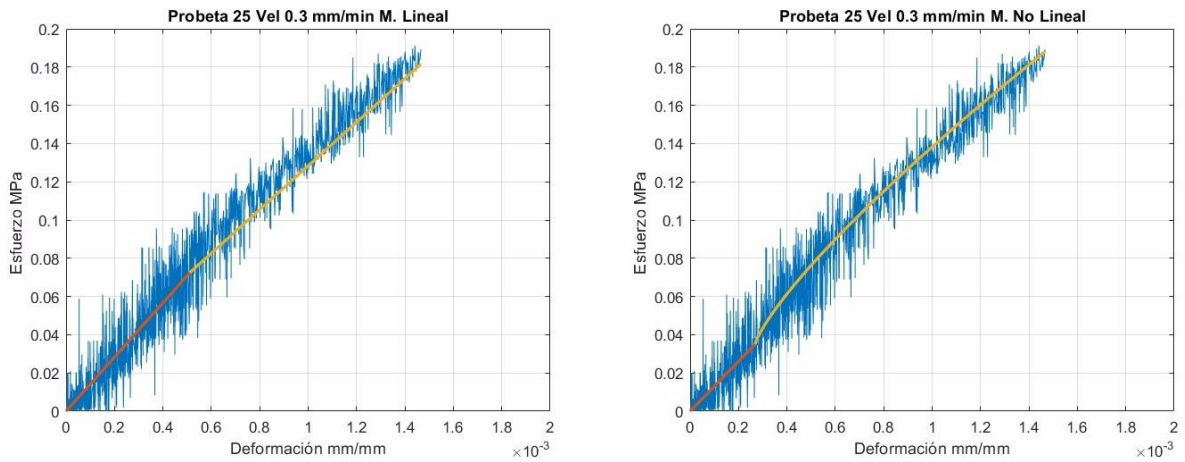


Figura 25 Representación gráfica de los modelos lineal y no lineal para la probeta 30

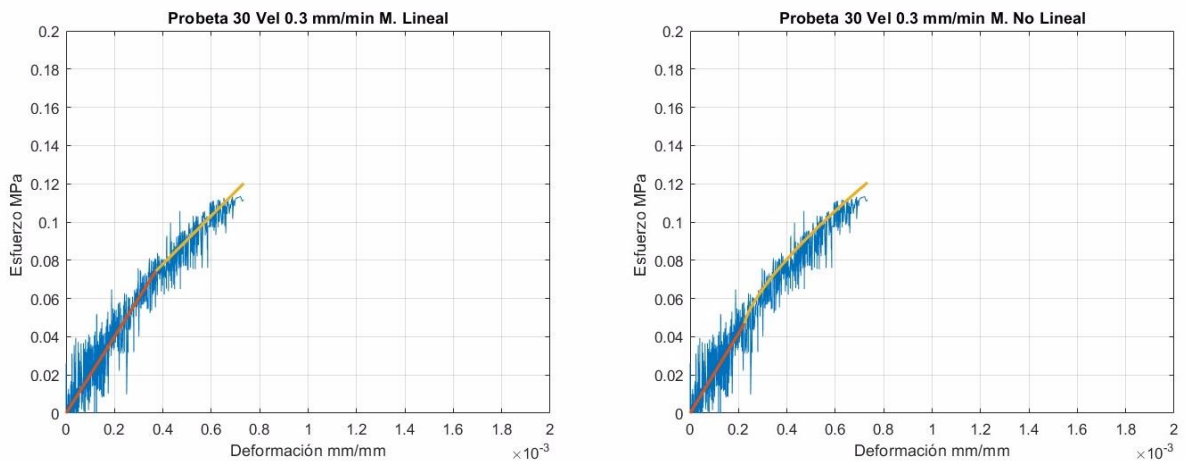


Tabla 5 Datos recolectados del modelo lineal para la velocidad 0.3 mm/min

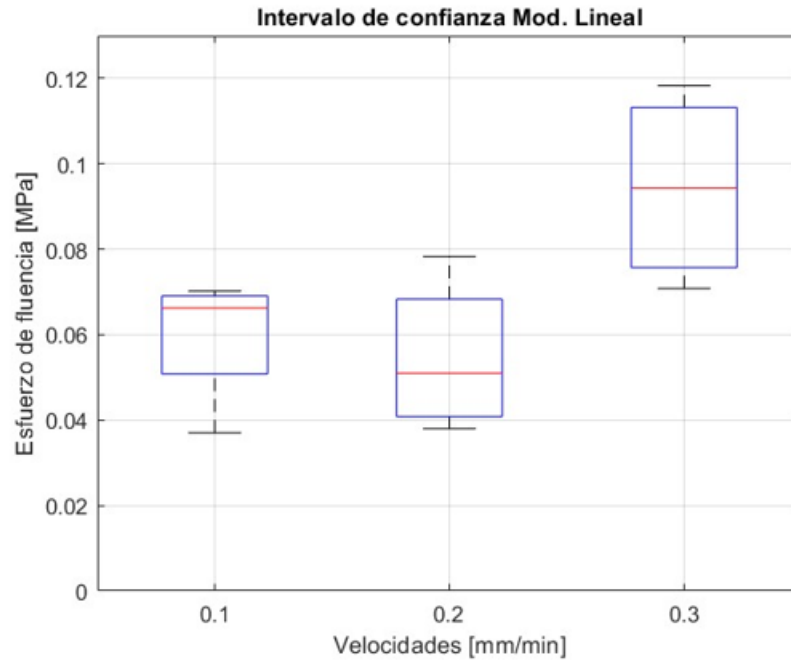
MODELO LINEAL								
Velocidad [mm/min]	Nro	Módulo de Young E [Mpa]	Módulo de plasticidad lineal H [Mpa]	Deformación fluencia ϵ_{y0}	Esfuerzo fluencia σ_y [Mpa]	Deformación máxima $\epsilon_{máx}$	Esfuerzo máximo $\sigma_{máx}$ [Mpa]	% Error medio cuadrático
0,3	21	120,6	239,4	0,093%	0,1183	0,160%	0,1653	7,37%
	24	135,5	253,3	0,079%	0,1081	0,170%	0,1900	10,78%
	25	141,8	589,1	0,051%	0,0708	0,150%	0,1894	22,43%
	30	200,4	342,3	0,037%	0,0806	0,073%	0,1118	6,75%
	Promedios	149,6	356,0	0,065%	0,0945	0,138%	0,1641	11,83%

Tabla 6 Datos recolectados del modelo no lineal para la velocidad 0.3 mm/min

MODELO NO LINEAL									
Velocidad [mm/min]	Nro	Módulo de Young E [Mpa]	Módulo de plasticidad H [Mpa]	Módulo no linealidad(n)	Deformación fluencia ϵ_{y0} [mm/mm]	Esfuerzo fluencia σ_y [Mpa]	Deformación máxima $\epsilon_{máx}$ [mm/mm]	Esfuerzo máximo $\sigma_{máx}$ [Mpa]	% Error medio cuadrático
0,3	21	121,2	19,2	0,747	0,0007	0,0911	0,0016	0,1653	7,35%
	24	129,7	22,6	0,708	0,0005	0,0612	0,0017	0,19	10,71%
	25	130,3	27,8	0,797	0,0003	0,0379	0,0015	0,1894	22,31%
	30	208,7	28,0	0,739	0,0002	0,0311	0,0007	0,1118	6,68%
	Promedios	147,5	24,4	0,748	0,0004	0,0553	0,0014	0,1641	11,76%

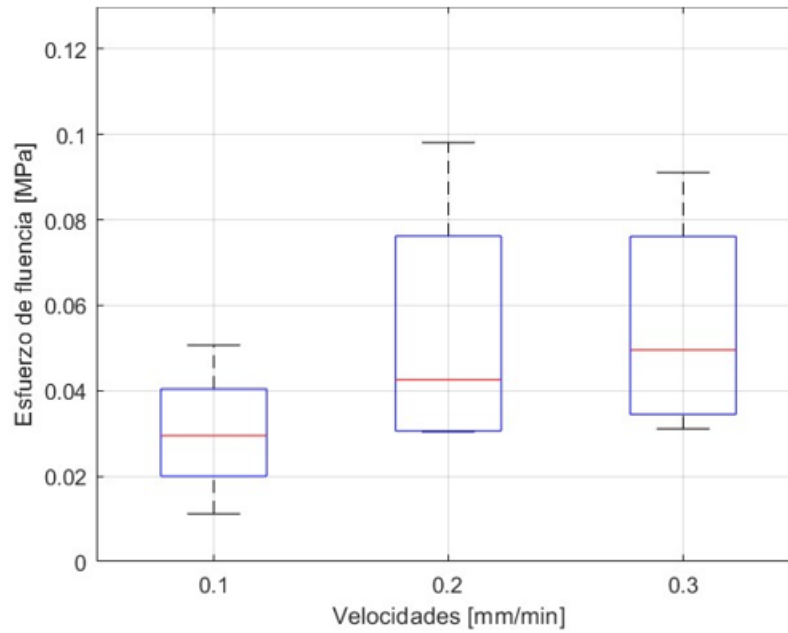
4.2. Comparación.

Una vez recolectados los parámetros del modelo a partir del algoritmo de minimización, es necesario comparar si hay alguna relación entre la velocidad de aplicación de la fuerza sobre las probetas respecto al punto de fluencia en el cual se empieza a generar el endurecimiento por plastificación. Para ello se optó por graficar para analizar de forma visual y estadística las velocidades y los esfuerzos de fluencia con su valor promedio dentro de su intervalo de confianza como se puede apreciar a continuación en la figura 26.

Figura 26 *Fluencia vs Velocidad modelo lineal*

Del modelo lineal se puede observar que el rango de variación en que surge el esfuerzo de fluencia hacia el endurecimiento por plastificación entre las velocidades 0.1 mm/min y 0.2 mm/min tiene similitud, mientras que con la velocidad 0.3 mm/min se observa un aumento en el esfuerzo de fluencia asociado al modelo de endurecimiento por plastificación lineal.

Figura 27 *Fluencia vs Modelo no lineal*



Por otra parte, el modelo no lineal muestra un rango aceptable de similitud entre los esfuerzos de fluencia de sus respectivas velocidades aumentando considerablemente entre la primera y la segunda.

Tabla 7 *Datos recolectados de módulos y esfuerzos de fluencia según la velocidad*

Velocidad [mm/min]	Módulo de Young promedio E _{prom} [Mpa]		Módulo de plasticidad promedio H [Mpa]		Esfuerzos de fluencia promedio σ_{y_prom} [Mpa]	
	lineal	no lineal	lineal	no lineal	lineal	no lineal
0,1	143,4	140,3	305,2	23,1	0,0599	0,0302
0,2	135,1	138,8	267,5	20,3	0,0546	0,0534
0,3	149,6	147,5	356	24,4	0,0945	0,0553

5. Conclusiones

Al comparar el error promedio entre los modelos lineales y no lineales, se observa que los modelos lineales tienden a tener un mayor porcentaje de error. Esto se debe a la necesidad de ajustar los datos a una línea recta, lo cual los hace más propensos a diferencias y errores significativos en el ajuste del modelo. En cambio, los modelos no lineales, gracias a su capacidad para ajustarse a curvas, tienen una mejor adaptación con datos que están dispersos. Aunque estos datos puedan aproximarse a una línea recta, presentan un mejor ajuste cuando se representan mediante una curva en su estructura no lineal.

La implementación del algoritmo de Levenberg-Marquardt fue fundamental para la minimización del error entre el modelo y los datos, debido a su capacidad de procesar la gran cantidad de posibles valores para los parámetros que definen los modelos lineales y no lineales. Posteriormente, implementando este algoritmo en la herramienta Matlab (ver Apéndice A), fue posible conseguir los valores que permitirían que los modelos se ajustaran de la mejor manera posible al comportamiento natural del material epóxico.

Los porcentajes de error medio cuadrático en cada uno de los ensayos con sus respectivos modelos, se observa que ninguno supera el 11.83%. Este caso corresponde a la velocidad más alta de 0.3 mm/min, lo que nos lleva a plantear la hipótesis de que a mayores velocidades los datos obtenidos son más susceptibles a ser alterados por ruido, vibraciones externas y también por el comportamiento natural del material.

El esfuerzo y deformación a la fluencia son características propias de cada material y en este caso era importante conocer estas dos propiedades para el material epóxico en estudio, con ayuda de los ensayos experimentales y modelamientos teóricos se encuentra que en muchos de los casos existían relaciones en los resultados para estas propiedades, en el caso de los ensayos

realizados a velocidad 0,2 mm/min los modelos lineal y no lineal convergieron en resultados cercanos para el valor de esfuerzo de fluencia teniendo un promedio de 0,054 MPa, así como para la deformación de fluencia unitaria teniendo un promedio de 0,0004 mm/mm.

Al escoger tres velocidades diferentes para realizar los ensayos en los cuerpos, se pudo evidenciar la influencia de la velocidad de aplicación de la carga en el material epóxico. Por ejemplo, se observó que a mayores velocidades se presentaba un mayor esfuerzo de deformación y, a su vez, una mayor deformación máxima. Además, se observó que a medida que se aumentaba la velocidad ocurría un aumento en el esfuerzo de fluencia del adhesivo, pero también, en la dispersión de la medida debido al ruido presentado por efectos del proceso experimental. Cabe destacar que estos valores presentan un margen de error debido a la aproximación teórica en la experimentación.

Los efectos del endurecimiento por plastificación en el adhesivo epóxico se evidencian cuando se observa la variación del módulo de elasticidad de cada probeta siendo que, si este disminuye, el índice de endurecimiento del adhesivo también lo hace o viceversa.

6. Recomendaciones

Para prolongar la investigación acerca de los adhesivos tipo epoxi es recomendable realizar más estudios de posible aplicación de estos, por ejemplo, donde haya esfuerzos cortantes o fuerzas torsionales.

Por otra parte, es recomendable realizar una mayor cantidad de ensayos mecánicos que no involucren cambios de velocidad con el fin de garantizar una mayor confiabilidad del modelo realizando los ajustes pertinentes que le permitan no solo escoger entre ambos sino que predecir el rango de confianza de aplicación que le brindará si se cambia algún parámetro de estudio.

Se propone para futuras investigaciones trabajar con materiales no ferrosos y aleaciones para incursionar en nuevas industrias que requieran aplicaciones de menor peso y mayor ligereza, pero asegurando un mejor proceso de diseño y versatilidad.

En el contexto de la transición energética que está tomando forma en Colombia y en el mundo, se sugiere enfocar los estudios y aplicaciones de los adhesivos epóxicos como una alternativa a las fuentes actuales que impulsan el sector energético nacional. Esto permitiría ampliar las opciones disponibles y contribuir al desarrollo de soluciones más sostenibles.

Referencias Bibliográficas

Comyn, J. (1997). *Adhesion science*. Royal Society of Chemistry.

Liesa, F., Alter, L. B., & Bilurbina, L. (1990). *Adhesivos industriales (Vol. 39)*. Marcomb

Rappel, H., Beex, L. A. A., Hale, J. S., Noels, L., & Bordas, S. P. A. (2020). *A Tutorial on Bayesian Inference to Identify Material Parameters in Solid Mechanics*. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1-. <https://doi.org/10.1007/s11831-018-09311-x>

Vega, M. M. *Seminario sobre adhesivos*. Departamento técnico. Henkel LOCTITE.

ROYVAL, I. A. E. (2016). *Proceso de Pos-curado, Viscoplasticidad y Modelado del comportamiento Mecánico de Adhesivos Estructurales*.

Abenojar, J., Velasco, F., & Martínez, M. A. (2009). *Influencia del post-curado en las propiedades mecánicas de una resina epoxi reforzada con SiC: estudio estadístico*. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 10(3), 166-79.

Epoxi Bonder Transparente. (n.d.). Retrieved January 9, 2024, from https://www.loctite-consumidor.co/cuando-necesite-una-union-perfecta-loctite-jamas-te-abandona/productos/epoxy-bonder-category/epoxibonder_transparente.html

Petrie, E. M. (2006). *Epoxy adhesive formulations*. McGraw-Hill.

Soto Figueroa, J. E., & Mena Reyes, V. N. (2008). *Reglas de multiplicadores y en el teorema de Karush Kuhn Tucker*.

Chico, B., & Morcillo, M. (2000). *Corrosión atmosférica de metales en condiciones climáticas extremas*.

Santos, J. Y. E., dos Santos Junior, J. A., Altidis, M. E. D., Ramos, A. C. R., Griza, S., & Altidis, J. D. (2023). *Estudio de las propiedades adhesivas de composites epoxi reforzados con polvo de cobre para diferentes tiempos de curado: Estudio das propriedades adesivas de compósitos de epóxi reforçados com pó de cobre para diferentes tempos de cura*. Editora Home Publishings, 382-387.

Alguacil, L. M. (2013). *Técnicas básicas de preparación de superficies*. TMVL0109. IC Editorial.

Apéndices

Apéndice A. Script de Matlab para el modelamiento de datos del adhesivo usando el algoritmo de Levenberg-Marquardt.

%El código inicia cargando los datos para cada una de las probetas y eligiendo el modelo con el que se quiere trabajar inicialmente, sea “model=0” para el modelo de plasticidad lineal o “model=1” para el modelo de plasticidad no lineal

```
clear all, close all, clc
data=xlsread("Probeta##.xlsx");
datax=data(:,1);
datay=data(:,2);
ndatos=length(datay);

model = 1; %0 %1 (Aquí se debe modificar la expresión según requerimiento)
if model == 0
    M1L = @(b1 ,xx1) b1*xx1;
    M2L = @(b2o,xx2) b2o*xx2;
elseif model == 1
    M1L = @(b1,xx1) b1*xx1;
    M2L = @(b2o,xx2) b2o(1)*xx2.^(b2o(2));
end

for j=1:ndatos-1;

    ny=j;
% Datos en el regimen elastico
    x1 =[]; y1=[];
    x1=datax(1:ny);
    y1=datay(1:ny);

% Datos en el regimen plastico
    x2 =[]; y2=[];
    x2=datax(ny+1:ndatos);
    y2=datay(ny+1:ndatos);

% Datos del regimen elastico llevados a cero
    x2o =[]; y2o=[];
    x2o=x2-x2(1);
    y2o=y2-y2(1);

% Cálculo de los modulos
% [b1]=polyfit(x1,y1,1);
% [b2o]=polyfit(x2o,y2o,1);
% h=(b1(1)-b2o(1))*x1(ny);

    if model == 0
```

```

err_M1 = @(b1) b1*x1 - y1;
b1_0 = 10;
err_M2 = @(b2o) b2o*x2o - y2o;
b2o_0 = 10;

elseif model==1
err_M1 = @(b1) b1*x1 - y1;
b1_0 = 10;
err_M2 = @(b2o) b2o(1)*x2o.^(b2o(2)) - y2o;
b2o_0 = [10; 0.5];
end

    %Implementación del algoritmo de Levenberg-Marquart para realizar la
optimización de datos basándose en los mínimos cuadrados amortiguados.

b1 = lsqnonlin(err_M1, b1_0);
b2o = lsqnonlin(err_M2, b2o_0);
h=(b1(1)-b2o(1))*x1(ny);
pp = [b1,b2o'];
modulos(j,[1:size(pp,2)])=pp;

% Evaluación de los modelos
if model == 0
    % Modelo elástico y = mx
    Ye = M1L(b1(1),x1);
    ee = Ye - y1;
    % error_el(j) = ee'*ee;
    %Modelos plástico y = mx
    Yp = M2L(b2o(1),x2o);
    ep = Yp - y2o;
elseif model == 1
    % Modelo elástico y = mx
    Ye = M1L(b1(1),x1);
    ee = Ye - y1;
    % error_el(j) = ee'*ee;
    %Modelos plástico y = mx
    Yp = M2L(b2o,x2o);
    ep = Yp - y2o;
end

%error_todo = [ee/ny;ep/(ndatos-ny)];
error_todo = [ee;ep];
std_todo(:,j) = [std(ee),std(ep)];

error(j)=error_todo'*error_todo;

end
[Error_min, nsyo] = min(error(2:end-2));

nyo=nsyo+1;

%% PARA LA CONDICIÓN ÓPTIMA

```

```

% Datos en el régimen elástico
x1 =[]; y1=[];
x1=datax(1:nyo);
y1=datay(1:nyo);

% Datos en el régimen plástico
x2 =[]; y2=[];
x2=datax(nyo+1:ndatos);
y2=datay(nyo+1:ndatos);

% Datos del régimen elástico llevados a cero
x2o =[]; y2o=[];
x2o=x2-x2(1);
y2o=y2-y2(1);

if model == 0
    err_M1 = @(b1) b1*x1 - y1;
    b1_0 = 10;
    err_M2 = @(b2o) b2o*x2o - y2o;
    b2o_0 = 10;

elseif model==1
    err_M1 = @(b1) b1*x1 - y1;
    b1_0 = 10;
    err_M2 = @(b2o) b2o(1)*x2o.^(b2o(2)) - y2o;
    b2o_0 = [10, 0.5];
end

b1 = lsqnonlin(err_M1, b1_0); % LOS VALORES SEGUN SY ÓPTIMO
b2o = lsqnonlin(err_M2, b2o_0);

%% GRÁFICA

Ye = M1L(b1(1),x1);
if model ==0
    Yp = M2L(b2o(1),x2o);
elseif model ==1
    Yp = M2L(b2o,x2o);
end

plot (datax,datay);hold on
plot (x1,Ye, 'LineWidth',2);
plot (x1(end) + x2o, Ye(end)+Yp, 'LineWidth',2)

xlim([0 0.002])
ylim([0 0.2])

title('Probeta XX Velocidad XX mm/min Modelo XX); %Es necesario titular según sea el
caso
xlabel('Deformación mm/mm');
ylabel('Esfuerzo MPa ');
grid on;

```

```
%Imprimir datos necesarios para la construcción de la tabla de levantamiento  
de datos relevantes
```

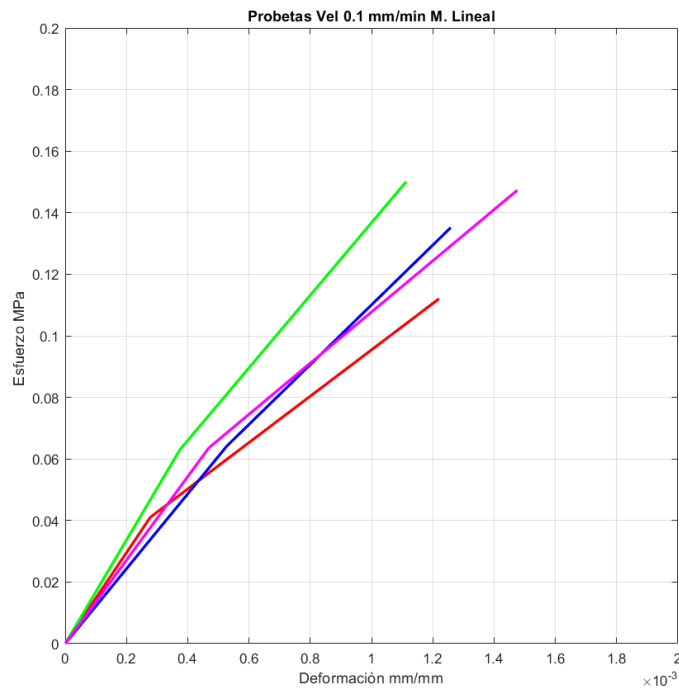
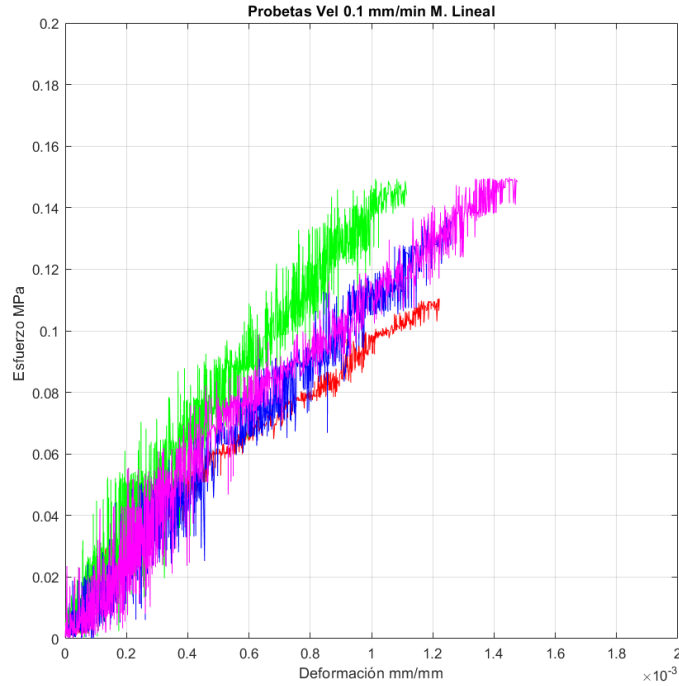
```
yoptimo=nyo  
YOUNG=b1  
PLASTICIDAD=(b1*b2o)/(b1-b2o)  
DEFORMACION_FLUENCIA=datax(nyo)  
DEFORMACION_MAX=datax(ndatos)  
ESFUERZO_FLUENCIA=datay(nyo)  
ESFUERZO_MAX=datay(ndatos)
```

Apéndice B. Script de Matlab para la comparación del efecto de la velocidad sobre el esfuerzo de fluencia.

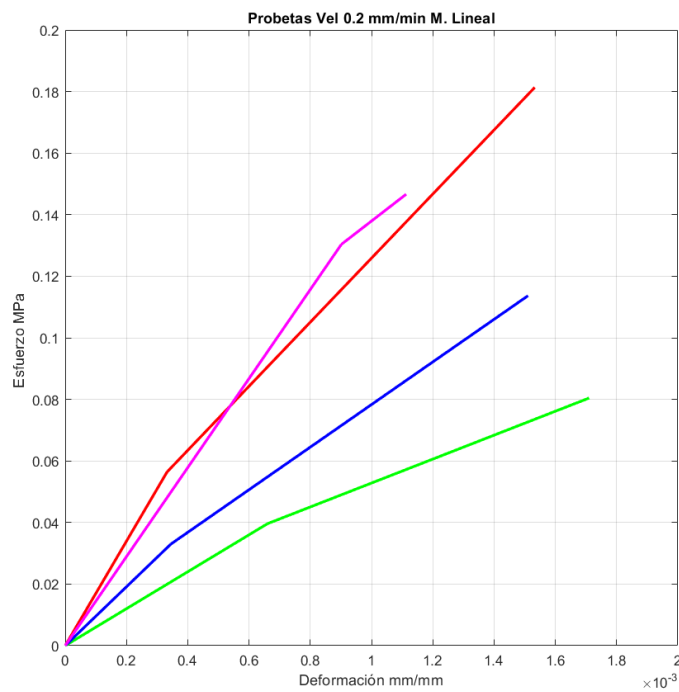
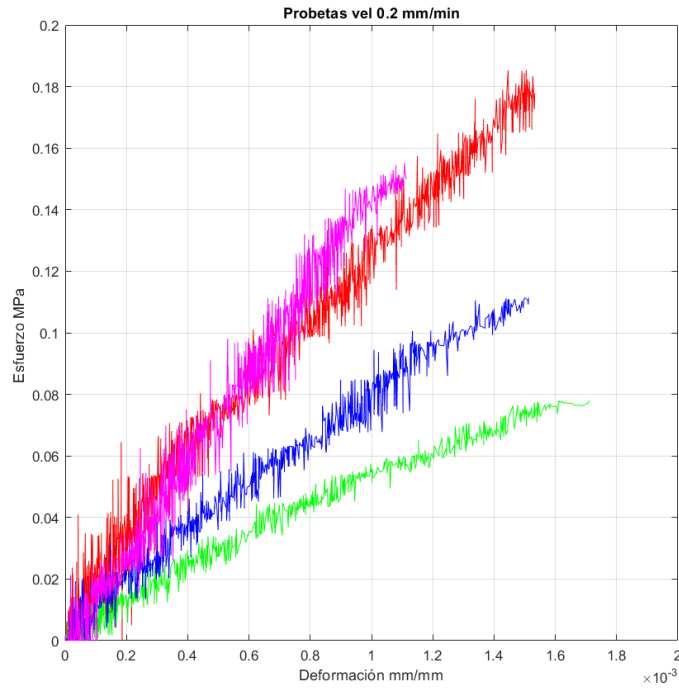
```
%El código lee los datos previamente almacenados y cargados al workspace de los  
esfuerzos de fluencia tanto en el modelo de plasticidad lineal como no lineal
```

```
%Intervalos Lineal  
close all, clc  
boxplot(FluenciasLineal, Velocidades)  
title('Intervalo de confianza Mod. Lineal')  
xlabel('Velocidades [mm/min]')  
ylabel('Esfuerzo de fluencia [MPa]')  
  
ylim([0 0.13])  
grid on;  
  
%Intervalos No Lineal  
close all, clc  
boxplot(FluenciasNoLineal, Velocidades)  
title('Intervalo de confianza Mod. No Lineal')  
xlabel('Velocidades [mm/min]')  
ylabel('Esfuerzo de fluencia [MPa]')  
  
ylim([0 0.13])  
grid on;
```

Apéndice C. Comparación gráfica de la implementación del modelado y el algoritmo de Levenberg-Marquart en los efectos del comportamiento lineal del adhesivo para la velocidad 0.1 mm/min.



Apéndice D. Comparación gráfica de la implementación del modelado y el algoritmo de Levenberg-Marquart en los efectos del comportamiento lineal del adhesivo para la velocidad 0.2 mm/min.



Apéndice E. Comparación gráfica de la implementación del modelado y el algoritmo de Levenberg-Marquart en los efectos del comportamiento lineal del adhesivo para la velocidad 0.3 mm/min.

