

CARACTERIZACION DE UN ADHESIVO EPOXI PARA JUNTAS DE ACERO Y  
MATERIALES DE IMPRESIÓN 3D

SEBASTIAN ORLANDO CORTÉS BLANCO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑIAS  
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA  
BUCARAMANGA  
2023

CARACTERIZACION DE UN ADHESIVO EPOXI PARA JUNTAS DE ACERO Y  
MATERIALES DE IMPRESIÓN 3D

SEBASTIAN ORLANDO CORTÉS BLANCO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

William Pinto Hernández

PhD. Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑIAS  
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2023

## DEDICATORIA

*A mi querido padre Orlando, por su comprensión, esmero, dedicación y palabras de aliento. Gracias a su apoyo constante, he logrado alcanzar mis objetivos. Con orgullo y satisfacción ¡Muchas Gracias, Pa!*

*A mi querida madre Sonia por su amor, consejos y palabras de apoyo.*

*A mi abuela Anita, que ha sido un pilar fundamental en mi vida. Siempre estarás en mi corazón.*

*A mi amor Natalia compañera en esta travesía, por estar en los momentos buenos y en los difíciles. De las alegrías y desafíos que hemos compartido juntos ¡Eres un Cielo!*

*Pili y Reynaldo, mis queridos tíos y padrinos, por ser siempre incondicionales, su presencia constante en mi vida, gracias por sus consejos y apoyo.*

*A mi hermana Lina y primos Xiomara y Miguel.*

*A mis compañeros que hicieron parte de este emocionante viaje por la universidad, de los buenos momentos, de los días de estudio incesante y de las noches sin dormir. Cada momento quedara como anécdota.*

## AGRADECIMIENTOS

*Al ingeniero y director de tesis William Pinto por su contribución en la realización de este proyecto. Agradezco su paciencia ,conocimientos trasmitidos, consejos y sugerencias durante todo el proceso.*

*A la Escuela de Ingeniería Mecánica y la Universidad Industrial de Santander por brindarme una formación académica integral y por ser mi segunda casa durante estos años. su formación ética y valores inculcados. Además, por los espacios cultural que han enriquecido mi experiencia universitaria y permitieron desarrollar una perspectiva amplia del mundo.*

*A cada uno de los profesores que me acompañaron durante mi paso por la universidad. Su dedicación, consejos y sabiduría que me permitieron no solo adquirir conocimientos, sino también desarrollar habilidades y valores para mi formación integral personal y profesional.*

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	14
2. OBJETIVOS .....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
3. MARCO TEORICO.....	17
3.1 FABRICACION ADITIVA.....	17
3.1.1 Propiedades Mecánicas .....	17
3.2 ADHESIVOS .....	19
3.2.1 Adhesivo Epoxico.....	21
3.2.2 Esfuerzos en uniones con adhesivo.....	22
3.2.3 Modos de falla .....	23
3.3 MODELO COSTITUTIVO DE RAOUS .....	24
3.3.1 Comportamiento del modelo .....	27
3.4 PROBLEMA INVERSO .....	31
3.4.1 Energía de decohesión.....	31
3.4.2 Método de mínimos cuadrados. ....	32
4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	34
4.1 SUSTRATOS .....	34
4.2 PREPARACION DE LA UNION ADHESIVA .....	36
4.2.1 Probetas.....	36
4.2.2 Proceso de unión. ....	36
4.3 ENSAYO MECANICO .....	38
4.3.1 Ensayo de carga axial. ....	38
4.3.2 Resultado de la carga axial. ....	38
4.3.2.1 Resultado de la unión adhesiva. ....	40
4.4 CARACTERIZACIÓN .....	45

4.4.1 Análisis del comportamiento del modelo calibrado.....	56
5. CONCLUSIONES.....	58
6. RECOMENDACIONES .....	60
BIBLIOGRAFÍA .....	61
ANEXOS .....	64

## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Parámetros estimados para ABS-Acero .....	50
Cuadro 2. Parámetros estimados para PLA-Acero .....	53

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Parametros.....	19
Figura 2. Esquema de una unión adhesiva .....	21
Figura 3. Esfuerzo de cizalladura, pelado y tracción .....	23
Figura 4. Modos de falla de las uniones adhesivas.....	24
Figura 5. Representación gráfica del modelo de Raous.....	26
Figura 6. Reacciones de fuerzas, intensidad de adhesión y fuerza vs deformación evaluados a diferentes valores de rigidez $C_n$ .....	28
Figura 7. Reacción de fuerzas, intensidad de adhesión y fuerza vs deformación evaluados a diferentes valores de energía de decohesión $w$ .....	29
Figura 8. Reacción de fuerzas, intensidad de adhesión y fuerza vs deformación evaluados a diferentes valores de viscosidad $b$ .....	30
Figura 9. Adhesivo epoxi bicomponente .....	34
Figura 10. Plano del sustrato de acero 1045.....	35
Figura 11. Plano del Sustrato de ABS y PLA .....	35
Figura 12. Juntas ACERO/ABS.....	37
Figura 13. Juntas ACERO/PLA .....	37
Figura 14. Máquina de ensayos universal con el banco de pruebas de carga normal...38	
Figura 15. Grafica Fuerza vs Desplazamiento para la junta ABS-ACERO.....	39
Figura 16. Grafica Fuerza vs Desplazamiento para la junta PLA-ACERO.....	39
Figura 17. Resultado de la unión adhesiva para las juntas Acero/PLA y Acero/ABS.....	41
Figura 18. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para la fuerza $r_n$ de la junta Acero/ABS .....	43
Figura 19. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para el desplazamiento $u_n$ de la junta Acero/ABS.....	43
Figura 20. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para la fuerza $r_n$ de la junta Acero/PLA.....	44

Figura 21. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para el desplazamiento $u_n$ de la junta Acero/PLA.....	44
Figura 22. Energía de decohesión (w) para la junta Acero/ABS, AB1 y AB2.....	46
Figura 23. Energía de decohesión (w) para la junta Acero/PLA, PL1 y PL2. ....	47
Figura 24. Rigidez (Cn) para la junta Acero/ABS, AB1 y AB2.....	48
Figura 25. Rigidez (Cn) para la junta Acero/PLA, PL1 y PL2. ....	49
Figura 26. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para el coeficiente de rigidez ( $C_n$ ) .....	50
Figura 27. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para la energía de decohesión (w).....	51
Figura 28. Comportamiento de la fuerza de reacción experimental vs modelo en la junta ACERO-ABS. ....	52
Figura 29. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para el coeficiente de rigidez ( $C_n$ ) .....	53
Figura 30. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para la energía de decohesión (w).....	54
Figura 31. Comportamiento de la fuerza de reacción experimental vs modelo en la junta ACERO-PLA.....	55
Figura 32. Variables del modelo de Raous calibrado en la junta ACERO-ABS.....	56
Figura 33. Variables del modelo de Raous calibrado en la junta ACERO PLA. ....	57

## LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Punto de rotura del adhesivo en la junta ABS-ACERO .....	42
Tabla 2. Punto de rotura del adhesivo en la junta PLA-ACERO.....	42

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Resultado de la unión adhesiva para la junta Acero/ABS.....	64
Anexo B. Resultado de la unión adhesiva para la junta Acero/PLA .....	65
Anexo C. Energía de decohesión (w) para las juntas Acero/ABS y Acero/PLA .....	66
Anexo D. Rigidez (Cn) para las juntas Acero/ABS y Acero/PLA .....	73

## RESUMEN

**TÍTULO:** CARACTERIZACIÓN DE UN ADHESIVO EPOXI PARA JUNTAS DE ACERO Y MATERIALES DE IMPRESIÓN 3D\*

**AUTOR:** CORTÉS BLANCO SEBASTIAN ORLANDO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Adhesivo, Epoxi, Caracterización, Impresión 3D, Raous, Mínimos Cuadrados, Propiedades Mecánicas.

**DESCRIPCIÓN:** En el desarrollo de este proyecto se buscó caracterizar las propiedades mecánicas del adhesivo Loctite Epoxi Bonder a base de bisfenol-A para unir sustratos de Acero 1045, con materiales de impresión 3D de ABS y PLA, hechos por fabricación aditiva utilizando el método Modelamiento por deposición fundida (FDM). Las juntas de PLA/Acero y ABS/Acero fueron sometidas a esfuerzos normales de tensión con el motivo de estimar los parámetros del modelo de Raous, el cual describe el problema físico del comportamiento mecánico del contacto de la adhesión utilizando una variable de daño. Por medio del ensayo mecánico se obtuvieron los datos experimentales, y junto al tratamiento computacional se resolvió el problema inverso utilizando los conceptos del método de mínimos cuadrados y el área bajo la curva de fuerza vs desplazamiento para estimar los parámetros del modelo . Rigidez ( $C_n$ ), Energía de decohesión ( $w$ ) y (b) una variable relacionada con la viscosidad

Los resultados experimentales permitieron resolver el problema inverso para los dos tipos de juntas estudiadas. Evidenciando una baja viscosidad con el adhesivo utilizado, ocasionando que el modelo de Raous no se adecuara en su totalidad, por tanto, el valor de la variable relacionada con la viscosidad se asumió constante. También se evidencio que las moléculas del adhesivo se adhirieron mejor al PLA soportando tres veces más la fuerza aplicada que el ABS. Además, en el modelo calibrado se corroboró que la fuerza  $r_n$  es directamente proporcional al coeficiente de rigidez  $C_n$ , y el desplazamiento  $u_n$  es directamente proporcional a la energía de deformación  $w$  como se esperaba a partir del estudio previo de las variables del modelo de Raous.

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías físico mecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Director: William Pinto Hernández. PhD en Ingeniería Mecánica.

## ABSTRACT

**TITLE:** CHARACTERIZATION OF AN EPOXY ADHESIVE FOR JOINTS BETWEEN STEEL AND 3D PRINTING MATERIALS\*

**AUTHOR:** CORTES BLANCO SEBASTIAN ORLANDO\*\*

**KEY WORDS:** Adhesive, Epoxy, Characterization, 3D Printing, Raous, Least Squares, Mechanical Properties

**DESCRIPTION:** This project aimed to characterize the mechanical properties of Loctite Epoxy Bonder adhesive based on bisphenol-A for joining 1045 Steel substrates with 3D printed materials made of ABS and PLA, using the Fused Deposition Modeling (FDM) method of additive manufacturing. The PLA/Steel and ABS/Steel joints were subjected to normal tensile stresses to estimate the parameters of the Raous model, which describes the physical problem of mechanical behavior of adhesive contact using a damage variable. Experimental data were obtained through mechanical testing, and the inverse problem was solved computationally using the concepts of the least squares method and the area under the force vs displacement curve to estimate the parameters of the model, including stiffness ( $C_n$ ), decohesion energy ( $w$ ), and a variable related to viscosity ( $b$ ).

The experimental results allowed for the inverse problem to be solved for the two types of joints studied, indicating a low viscosity with the adhesive used, causing the Raous model to not fully adapt. Therefore, the value of the variable related to viscosity was assumed constant. It was also evident that the adhesive molecules adhered better to PLA, supporting three times more force applied than ABS. Furthermore, in the calibrated model, it was confirmed that the force  $r_n$  is directly proportional to the stiffness coefficient  $C_n$ , and the displacement  $u_n$  is directly proportional to the deformation energy  $w$ , as expected from the previous study of the variables in the Raous model.

---

\*Degree work

\*\*Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: PhD. William Pinto Hernández

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de nuevos materiales como aleaciones, polímeros y materiales compuestos en la ingeniería, se enfrenta a desafíos al momento de unir estos materiales, generalmente se utilizan técnicas tradicionales de sujeción como la soldadura y pernos en el ensamble de dos o más piezas. Sin embargo, al no cumplir con los requisitos de resistencia, su estructura puede verse afectada por estas técnicas, a causa de presentar discontinuidad en la distribución de las tensiones. Para estas situaciones cada vez más los ingenieros e investigadores les llama la atención el uso de adhesivos debido a sus prestaciones.<sup>1</sup>

Los adhesivos han sido implementados con mayor ocurrencia en el último siglo en la industria manufacturera de piezas no críticas, como selladores de vidrios en la industria automotriz, o en la unión del carenado en la aviación, sin embargo las manifestaciones de su uso datan de la prehistoria y de diferentes civilizaciones como los sumerios, egipcios, romanos, chinos y griegos que utilizaron adhesivos naturales como la clara de huevo, almidones y azúcares para la fabricación de utensilios, unión de papiros, armas, estructuras, entre otras cosas.<sup>2</sup>

Desde finales del siglo XX los adhesivos han tenido un crecimiento en sus usos, permitiendo un mayor desarrollo en sus investigaciones ofreciendo rendimientos en muchos casos superiores al de otros tipos de ensambles con la ventaja en el ahorro de costes. Sin embargo, sus limitaciones siguen presentes debido a la dificultad de evaluar rápido y fácilmente la resistencia en juntas adhesivas, a menudo para el estudio de sus

---

<sup>1</sup> JINGXIN. Na, et al. Evaluation method of adhesive joint strength based on the normal–shear stress of adhesive interface and its application in engineering. *Advances in Mechanical Engineering*. En: *Advances in Mechanical Engineering*. 2015, vol.7, no.5, p.1.

<sup>2</sup> LIESA, Francisco y BILURBINA, Luis. *Adhesivos Industriales*. España. Marcombo Boixareu Editores. 1990. p.11.

propiedades se realizan ensayos destructivos, generalmente soportan esfuerzos cortantes, sin embargo, es idóneo el estudio al someterlos a tracción pura, para hallar las propiedades mecánicas del adhesivo usando modelos analíticos, como el modelo de Raous para cargas normales.

Considerando la poca información correspondiente al uso de adhesivos que se encuentran sometidos a cargas normales, y más aún en la unión de diferentes sustratos, como los materiales de impresión 3D y aceros, se busca caracterizar las propiedades mecánicas de un adhesivo, haciendo uso de un banco para pruebas de cargas normales que permita recopilar información que describa el comportamiento mecánico de la adhesión del modelo de Raous.

Para esta investigación se fabricaron sustratos de ABS y PLA fabricados por impresión 3D, también de Acero 1045, para el análisis del adhesivo Loctite Epoxi Bonder en la adhesión de sustratos de impresión 3D con sustrato de acero en función de caracterizar las propiedades mecánicas que describen el comportamiento de la adhesión dado por el modelo de Raous. Los datos experimentales son obtenidos por medio de ensayos de tracción pura para la unión de sustratos de Acero/PLA y Acero/ABS. Con el propósito de caracterizar las variables del modelo, se resolverá el problema inverso usando la regresión lineal que permita resolver las incertidumbres del problema y así hallar los parámetros por medio del proceso iterativo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento mecánico de las juntas Acero/PLA y Acero/ABS sometidas a fuerzas normales, con el fin de encontrar las variables relacionadas con el modelo de Raous que describe el comportamiento de la adhesión.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Simular el modelo de adhesión mecánica de Raous que contempla los parámetros de rigidez, viscosidad, energía de decohesión y una variable de daño.
- Realizar un ensayo de tracción para las juntas Acero/PLA y Acero/ABS utilizando un adhesivo epoxi bicomponente a base de bisfenol-A.
- Caracterizar las propiedades constitutivas del adhesivo asociadas al modelo de Raous (rigidez, viscosidad y energía de decohesión) que se adapten al modelo experimental.

### 3. MARCO TEORICO

#### 3.1 FABRICACION ADITIVA

La impresión 3D es una tecnología con la capacidad de fabricar piezas complejas en diferentes materiales como metales y más comunes los termoplásticos; Acido-Poliacético (PLA) y Acrilonitrilo-Butano-Estireno (ABS), sus propiedades mecánicas y su practicidad permite que cualquier persona pueda hacer sus propias piezas a partir de un modelo de software CAD que posteriormente pasan a archivo de estereolitografía (STL) donde se transforma la geometría en capas, también contiene la información del grosor y su resolución para ser enviados a la impresora 3D.<sup>3</sup>

Para el estudio del adhesivo se utilizó la técnica de fabricación, Modelado por deposición fundida (FDM) usando filamentos de ABS y PLA como materia prima en la elaboración de las probetas que son utilizadas en el ensayo de tracción para la caracterización de las propiedades del adhesivo.

**3.1.1 Propiedades Mecánicas.** La calidad de los elementos impresos en 3D dependen de diferentes características, como la tecnología utilizada en la impresión, los parámetros de impresión y las propiedades del material. Los termoplásticos son de los materiales más usados en la técnica FDM, el ABS que resulta al combinar tres monómeros: El acrilonitrilo, butadieno y estireno, los cuales forman su acrónimo, también el PLA que tiene su origen a partir del azúcar que proviene del almidón vegetal de la caña de azúcar, maíz, yuca, y se convierte en ácido láctico.

---

<sup>3</sup> WONG, Kaufui V y HERNANDEZ, Aldo. A Review of Additive Manufacturing. En: International Scholarly Research Network. 2012, vol.2012. p.2.

Las propiedades mecánicas de los termoplásticos permiten que sea usado en la manufactura aditiva gracias a su calidad para uso ingenieril utilizando la técnica (FDM), El ABS presenta mejores propiedades internas, pero es susceptible a parámetros externos, por otro lado el PLA no lo afectan, sin embargo sus propiedades no se asemejan, debido a los diferentes parámetros estructurales y de impresión que determinan la configuración interna de la pieza, y a su vez influyen en la resistencia a la tracción como lo son: el grosor de la capa, temperatura, velocidad, orientación de la pieza, densidad, ángulo y ancho de la trama<sup>4</sup>, se muestran en la figura 1. Las cuales se seleccionan durante el procesamiento del software para el diseño de las probetas.

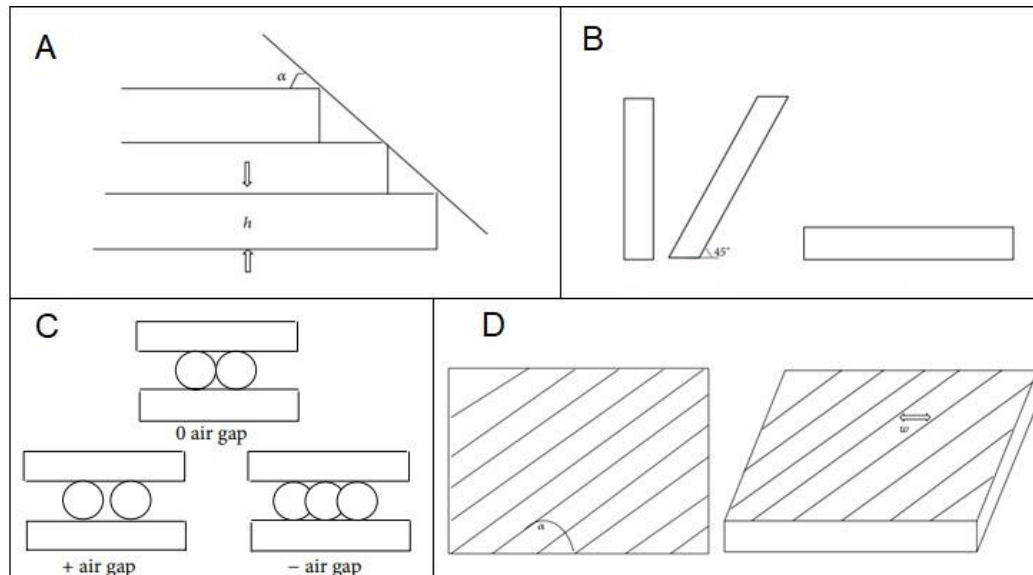
En términos generales el proceso de FDM las piezas se fabrican utilizando un filamento de polímero que pasa por una extrusora, donde se funde el material sobre una plataforma capa por capa, solidificándose rápidamente a temperatura ambiente, hasta generar la pieza por completo. El grosor de la capa es depositado por la boquilla del extrusor (A), a menor diámetro el número de capas que conforman la pieza aumentara, como la resistencia a carga axial, y también el tiempo que se demora en fabricarse. La densidad de la pieza viene dada por el espacio entre filamentos, también se relaciona con el ancho de la trama (D) y el espacio de aire (C). Al tener un espacio de aire negativo aumenta su resistencia a la tracción. El ángulo en el que se deposita el filamento afectara la estructura interna de la pieza, cada capa actual tiene un ángulo perpendicular a la capa anterior, los más comunes son 0° y 90° (D). En la orientación de la pieza dependiendo de su inclinación al elaborarse tendrá mayores cargas (B).<sup>5</sup>

---

<sup>4</sup> ONWUBOLU, Godfrey C. y RAYEGANI, Farzad. Characterization and Optimization of Mechanical Properties of ABS Parts Manufactured by the Fused Deposition Modelling Process. En: International Journal of Manufacturing Engineering. 2014, vol.2014, p.2.

<sup>5</sup> Ibid., p.3.

Figura 1. Parametros



Fuente: ONWUBOLU, Godfrey C. y RAYEGANI, Farzad. Characterization and Optimization of Mechanical Properties of ABS Parts Manufactured by the Fused Deposition Modelling Process. En: International Journal of Manufacturing Engineering. 2014, vol.2014, p.4. En: <https://doi.org/10.1155/2014/598531>

### 3.2 ADHESIVOS

El adhesivo se define como un componente el cual es aplicado entre la superficie de dos materiales comúnmente llamados adherentes o sustratos, de forma que mantenga una unión resistente al desprendimiento. El conjunto de procesos químicos y físicos presentes en la interfase adhesivo/adherente se conoce como adhesión. Los adhesivos se han vuelto cada vez más importante para resolver problemas de sujeción temporales y permanentes en diversas áreas de la ingeniería en comparación con la soldadura, sujeciones mecánicas, entre otras. Las limitaciones de los métodos tradicionales en el uso de nuevos materiales en la ingeniería, que en muchos casos no pueden lograr una unión adecuada, presentando concentradores de esfuerzos que debilitan los elementos a unir. Para esto las juntas adhesivas tienen una mayor área que brindan una mejor

distribución de tensiones como también la característica para poder unir diferentes adherentes con menor peso y a bajo costos.

Los adhesivos de mayor interés y también los más comunes para generar uniones rígidas son los reactivos, estos polimerizan cuando se hallan en medio de los sustratos a unir. Por ejemplo, los anaeróbicos, que no reaccionan con la presencia de oxígeno, por lo contrario, polimerizan con la ausencia de este, su uso generalmente es para montajes metálicos, pero para cualquier caso su uso requiere un agente activador. También los clanoacrilatos más conocidos como adhesivos instantáneos, de un solo componente, y los epoxis de un solo componente o de dos que vienen en forma de resina y endurecedor.<sup>6</sup>

La unión adhesiva se encuentra bajo condiciones de cargas de tracción, pelado y de cizallamiento. Sin embargo, la tensión es uniforme ignorando los efectos en los bordes causado por la combinación de las cargas, de tal modo que la tensión máxima que produce la capa adhesiva sea menor, garantizando la vida útil de los diferentes elementos adheridos, al tener en cuenta el concepto de diseño de seguridad en la ingeniería de mantener una integridad en la unión de elementos.<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> VEGA, M. Mario. Tecnología de la adhesión: Departamento técnico de Loctite. En: Seminario sobre adhesivos. España. p .19.

<sup>7</sup> JINGXIN. Na, et al. Evaluation method of adhesive joint strength based on the normal–shear stress of adhesive interface and its application in engineering. Advances in Mechanical Engineering. En: Advances in Mechanical Engineering. 2015, vol.7, no.5, p.2.

Figura 2. Esquema de una unión adhesiva



Fuente: Fuente: VEGA, M. Tecnología de la adhesión: Departamento técnico de Loctite. En: Seminario sobre adhesivos. España. [en línea] [Consultado 15 Diciembre de 2022]. p.4. En: [http://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso\\_de\\_adhesivos.pdf](http://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso_de_adhesivos.pdf)

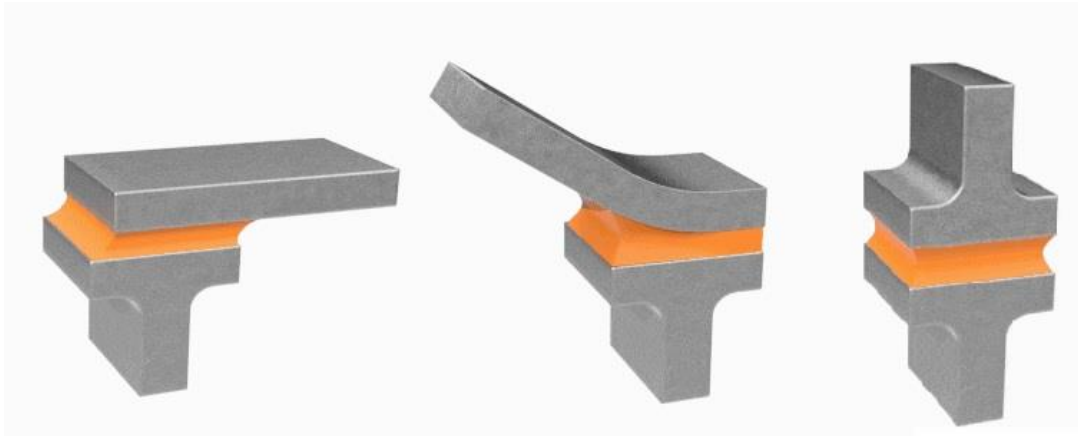
**3.2.1 Adhesivo Epoxico.** Los epoxis derivan del petróleo, estos forman una unión fuerte y resistente a sustancias químicas, a la humedad y corrosión. Se encuentran comúnmente en dos componentes, un agente resina y un activador (endurecedor). Se deben mezclar en una proporción determinada, el tiempo de manipulación es limitado para su aplicación, debido a que su polimerización empieza en el momento en que se combina los dos componentes, por esto debe ser aplicados sobre los sustratos a unir y mantenerse unidos hasta terminar el endurecimiento (secado).

Sin embargo, existen también epoxis de un solo componente que contiene un agente endurecedor latente que se activa a altas temperaturas, al elevarse comienza la policondensación de la resina. Los epoxis se pueden usar en diferentes aplicaciones como adhesivos en las industrias aeronáutica, naval, aeroespacial, automotriz, también como aditivos para hormigones y elementos de construcción, en electrónica, entre otras. A continuación, se muestran las características de los adhesivos epoxis:

- Mayor resistencia a los esfuerzos por cortadura, tracción y compresión.
- Permiten ser mecanizados.
- Resistente a temperaturas elevadas hasta 180°C.
- Funciona como adhesivo para todo tipo material, incluyendo vidrios y plásticos.
- Resistencia química y capacidad de rellenar holguras.
- Se pueden adicionar materiales que permitan mejorar las características mecánicas como la fibra de vidrio, vegetales como lignina, entre otras más.
- Funciona como aislante térmico, pero puede ser modificado para ser conductor de calor y también de electricidad.

**3.2.2 Esfuerzos en uniones con adhesivo.** Las fuerzas presentes en el adhesivo son causadas por distintos tipos de esfuerzos. Las fuerzas presentes en el plano perpendicular a la junta adhesiva en dirección opuesta a esta son causadas por el esfuerzo a la tracción, por otro lado, el esfuerzo de cizalladura sucede cuando la tensión es tangencial, donde toda la fuerza es distribuida uniformemente sobre el área de contacto. Para el esfuerzo de pelado uno de los sustratos debe ser flexible lo que causa una concentración en el borde de la junta adhesiva, los tres esfuerzos se pueden ver en la figura 3.

Figura 3. Esfuerzo de cizalladura, pelado y tracción



Fuente: 3m science applied to life. [en línea] [Consultado el 16 de diciembre de 2022]  
Disponibile en: [https://www.3m.com/es/3M/es\\_ES/union-y-montaje/formacion/ciencia-de-la-adhesion/tipos-de-tensiones-comunes-en-las-uniones-con-adhesivo/](https://www.3m.com/es/3M/es_ES/union-y-montaje/formacion/ciencia-de-la-adhesion/tipos-de-tensiones-comunes-en-las-uniones-con-adhesivo/)

**3.2.3 Modos de falla.** Al realizarse la unión de elementos con adhesivos se busca que bajo ninguna circunstancia falle, sin embargo, se presentan diferentes modos de falla procurando que la unión en ninguno de los casos sea adhesiva, en otras palabras, que la rotura no se presente en la interfase sustrato adhesivo.

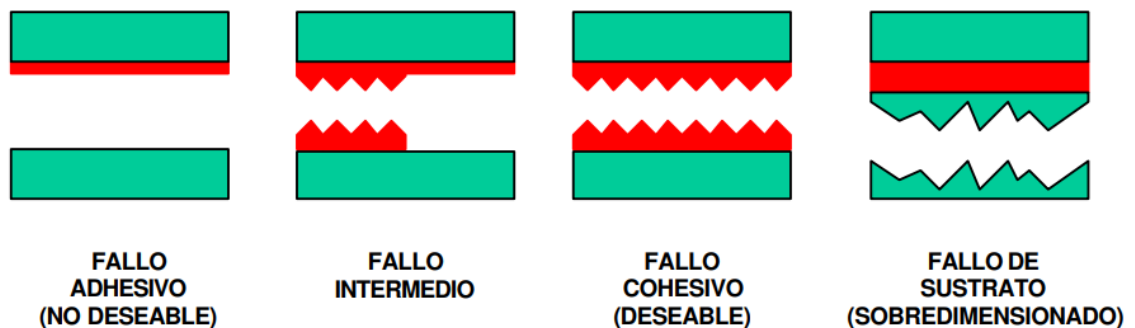
Las causas de falla no se pueden predecir, debido al contacto de la adhesión, el cual depende de diferentes factores como la elección del adhesivo según su aplicación, el tratamiento de las juntas como la presión, tiempo y temperaturas del curado que garanticen una buena adhesión. Sin embargo, las características mecánicas del adhesivo se pueden conocer al evaluarse mediante pruebas destructivas bajo diferentes tipos de esfuerzos. El modo de falla más deseable es el fallo cohesivo, también se presentan diferentes variaciones como el fallo intermedio o fallo de sustrato, este último pasa cuando la resistencia a la tracción en el adhesivo es mayor que la del material.

También las fallas no se pueden presentar en las capas de la interface, esto sucede debido a que a que la propagación de la fractura se tiende a ir a la superficie del sustrato

o del adhesivo. Debido a diversas circunstancias que debilitan la interfaz de cohesión.<sup>8</sup>  
Como:

- Contaminación de partículas de polvo, humedad y burbujas de aire que no se eliminaron de la superficie del sustrato durante la constitución de la adhesión.
- Reacción química adversa entre el adhesivo y el sustrato. Creando nuevas estructuras diferentes a la de la interfase.
- Aditivos que terminan en la interfase al formarse la unión con bajo peso molecular. Como el caso de la migración de antioxidantes a la superficie de los cauchos.
- Inadecuado tratamiento superficial del sustrato como la abrasión excesiva en metales debilitando y por ende causando fallos prematuros en las uniones adhesivas.

Figura 4. Modos de falla de las uniones adhesivas



Fuente: Fuente: VEGA, M. Tecnología de la adhesión: Departamento técnico de Loctite. En: Seminario sobre adhesivos. España. [en línea] [Consultado 15 Diciembre de 2022]. p.5. En: [http://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso\\_de\\_adhesivos.pdf](http://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso_de_adhesivos.pdf)

<sup>8</sup> ANAGUANO. A, Diana del Pilar. LOACHAMIN. S, Carlos Mauricio. Análisis de uniones por adhesión para materiales metálicos. Trabajo de grado Tecnólogo en procesos de producción mecánica. Quito. Escuela Politécnica Nacional. 2008. p.23.

### 3.3 MODELO COSTITUTIVO DE RAOUS

Es el modelo constitutivo que describe la adhesión, en su versión más completa tiene en cuenta condiciones de contorno unilaterales con campos de desplazamiento normal y tangencial ocasionando efectos de cizallamiento y de fricción descritos por Raous, M; Cangémi, L y Cocu M (1999) y Del Piero, G y Raous M (2010). También se encuentra una versión simplificada adoptada por Albuquerque, E; Castello, D y Borges, L. (2016). El cual es capaz de relacionar la separación relativa entre las superficies en contacto y las fuerzas de reacción, le evolución de la intensidad de la adhesión y el nivel el cual la adherencia es nula.<sup>9</sup> La versión simplificada se adoptará para estudiar el comportamiento que describe la adhesión.

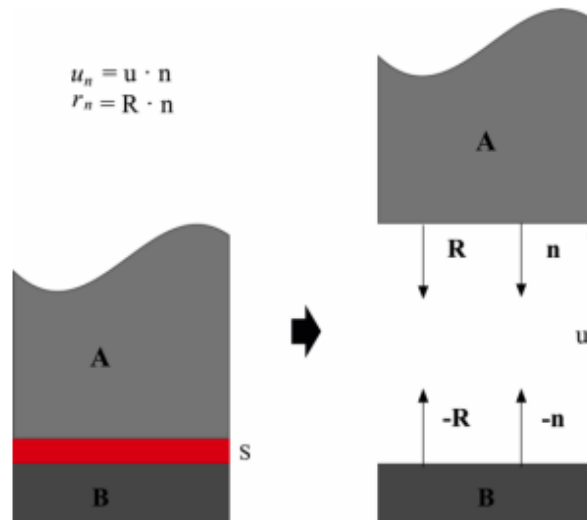
Para analizar el modelo se considera que la componente normal del desplazamiento es significativa sobre la tangencial, asumiendo que la componente adhesiva trabaja a tracción solamente, ignorando los efectos del cizallamiento y la fricción. Se establece un cuerpo A en contacto con la superficie rígida B a través de la interfaz adhesiva S que según la hipótesis de pequeños desplazamientos se desprecia el espesor, también se define un vector unitario normal  $\mathbf{n}$  perpendicular al área de contacto del cuerpo A en cada punto de S. La componente de fuerza de reacción es  $\mathbf{r}\mathbf{n} = \mathbf{R}\cdot\mathbf{n}$  que genera un desplazamiento de A dando lugar al desplazamiento relativo  $\mathbf{u}\mathbf{n} = \mathbf{u}\cdot\mathbf{n}$  donde u es el desplazamiento de un punto del cuerpo A ubicado en su límite.<sup>10</sup>

---

<sup>9</sup> SILVA G, L. S, et al. Calibration of adhesion models base on the extended Kalman filtering. En: The journal of adhesion. 2016, vol.00, no.00, p.4.

<sup>10</sup> Ibid., p.5.

Figura 5. Representación gráfica del modelo de Raous



MURILLO. Daniela y VEGA. Laura. Caracterización y comparación de las propiedades mecánicas para juntas metálicas utilizando adhesivo de resina sintética tipo epoxi pura y modificada a base de lignina. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2018. p.38.

La intensidad de la adhesión es un fenómeno irreversible que se caracteriza por una variable de daño  $\beta(t)$ , que varía desde la adhesión completa ( $\beta=1$ ) disminuyendo hasta a ( $\beta=0$ ). Y se ve representada por la ecuación 2.

$$r_n + \beta^2 C_n u_n \leq 0 \quad u_n \leq 0 \quad (r_n + \beta^2 C_n u_n) u_n = 0 \quad (1)$$

$$\dot{\beta} = - \left[ \frac{1}{b} \langle \beta C_n u_n^2 - w \rangle \right]^{\frac{1}{p}} \quad (2)$$

Donde  $r_n$  es la reacción de la fuerza normal al contacto [N],  $u_n$  es el desplazamiento axial entre las juntas [mm],  $C_n$  es la rigidez de la capa adhesiva [N/mm],  $b$  es un parámetro relacionado con la viscosidad [N.mm.s],  $w$  es el límite de energía de decohesión [N.mm] y  $p$  es un coeficiente de potencia igual a 1.

El modelo constitutivo de Raous tiene la capacidad de suministrar diferentes tipos de predicciones que describen el comportamiento mecánico del contacto entre adhesivo y sustratos. Las observaciones dependerán de las condiciones de operación del sistema que generan restricciones mecánicas, también de los diferentes parámetros constitutivos del modelo  $\theta = \{C_n, b, w, p\}$ , donde. El cambio de estos parámetros puede generar diferentes tipos de comportamiento al depender de la velocidad de carga/descarga a la que se somete la interfaz de adhesión.<sup>11</sup>

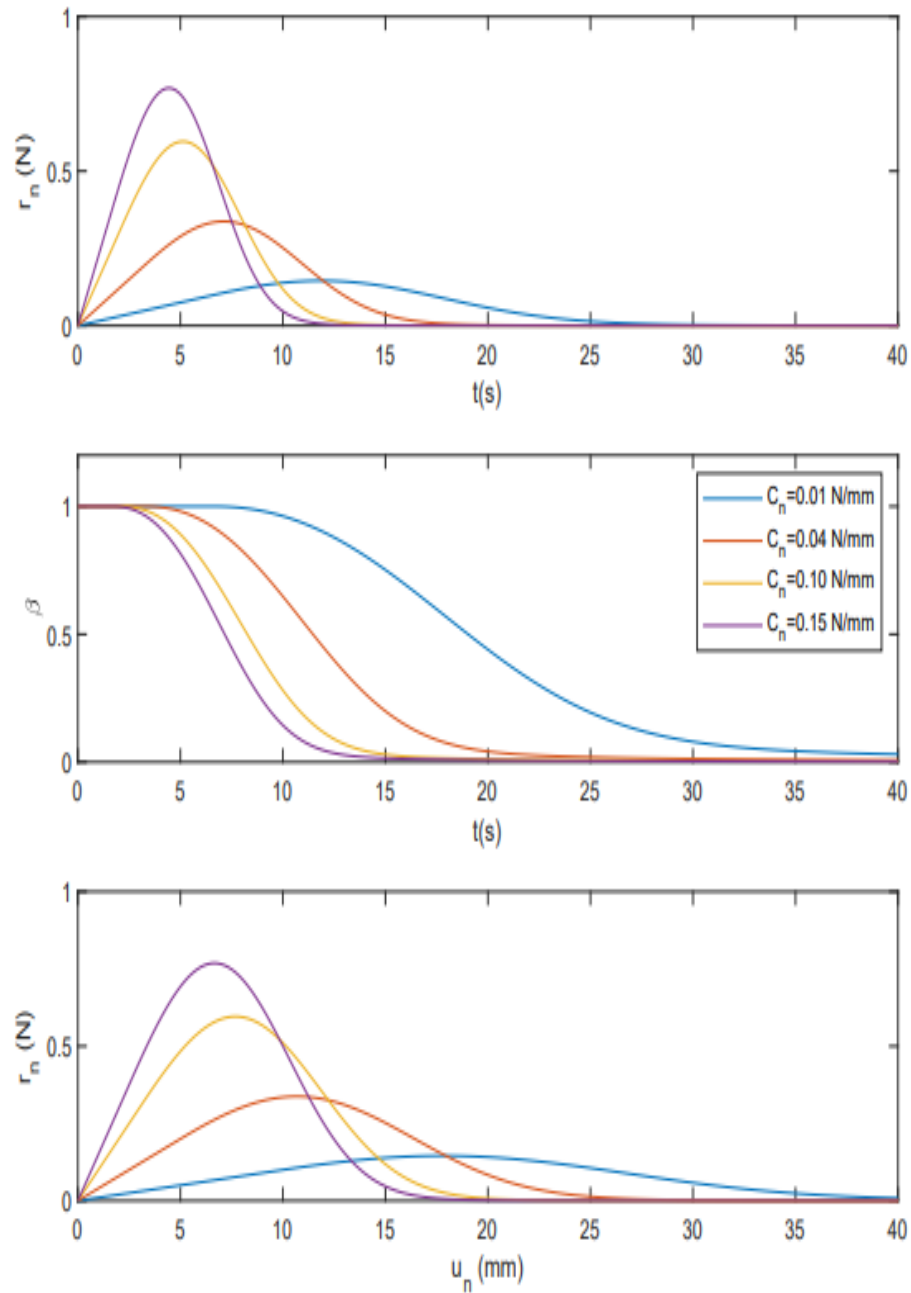
### 3.3.1 Comportamiento del modelo.

- Al aumentar el parámetro de relacionado con la viscosidad **b**, aumenta la fuerza de reacción  $r_n$  y disminuye la velocidad con la que se degrada ( $\dot{\beta}$ ) demorando la falla de la interfaz de adhesión.
- La energía de decohesión **w** marca un límite en el cual la interfaz adhesiva empezara a degradarse, se observa que, al aumentar, la fuerza  $r_n$  aumenta, como el tiempo en el que se inicia la falla y también permite una mayor deformación del adhesivo.
- Se observa que al aumentar la rigidez  $C_n$  provoca un efecto directo sobre la fuerza de reacción  $r_n$  y de igual manera la velocidad con la que se degrada la interfaz adhesiva, provocando que falle más rápidamente.

---

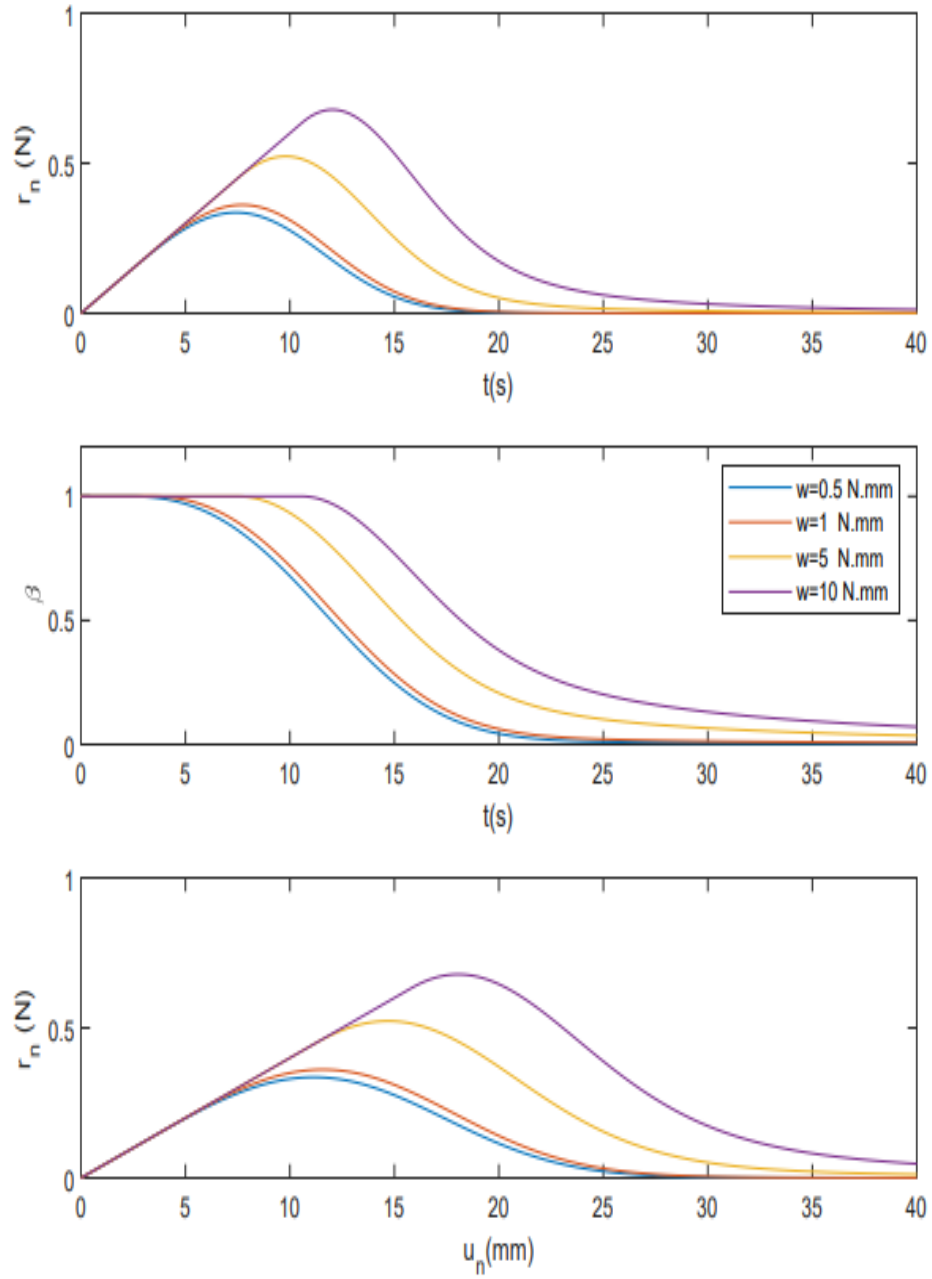
<sup>11</sup> SILVA G, L. S, et al. Calibration of adhesion models base on the extended Kalman filtering. En: The journal of adhesion. 2016, vol.00, no.00, p.5.

Figura 6. Reacciones de fuerzas, intensidad de adhesión y fuerza vs deformación evaluados a diferentes valores de rigidez  $C_n$



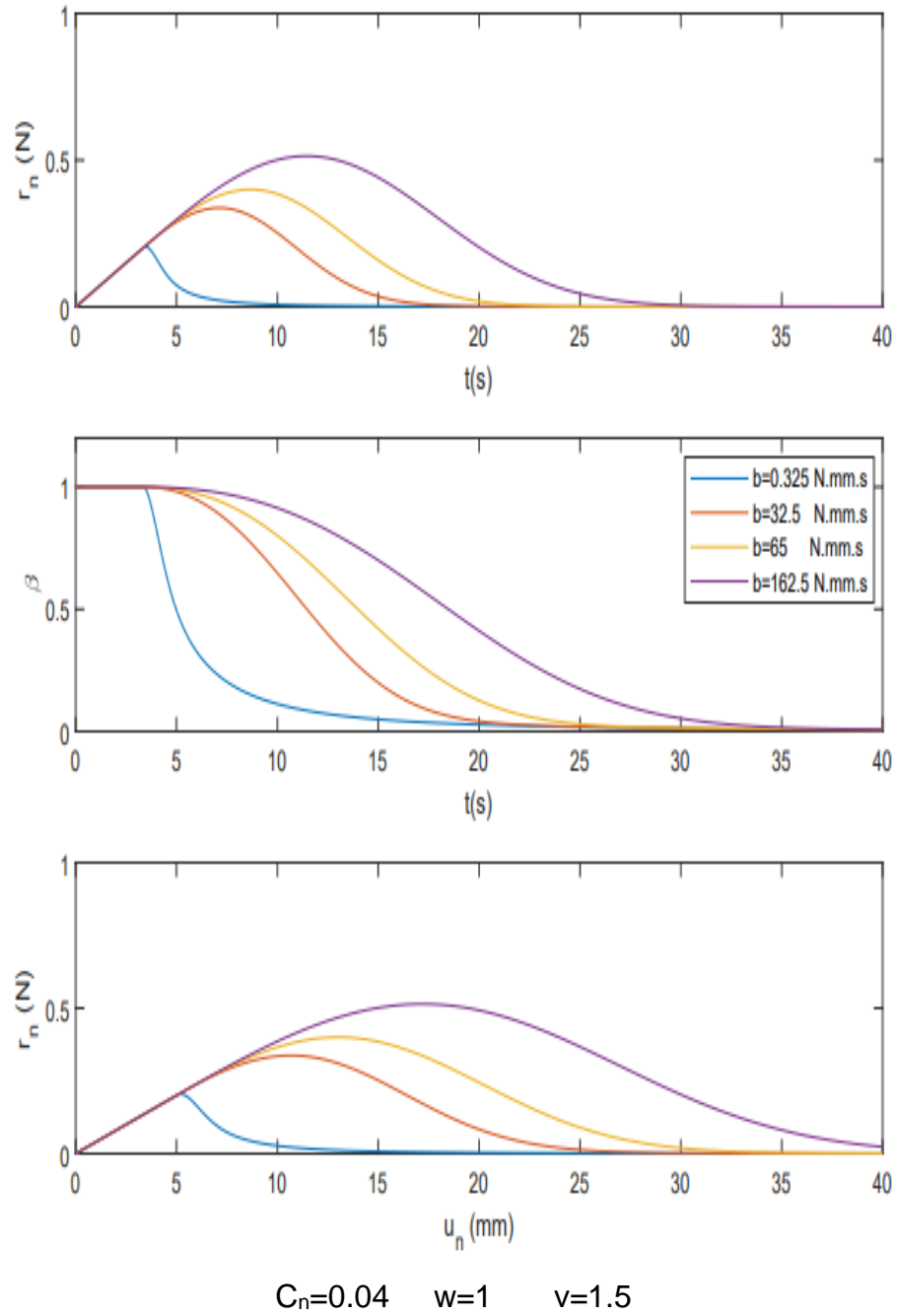
$w=1$      $b=32.5$      $\nu=1.5$

Figura 7. Reacción de fuerzas, intensidad de adhesión y fuerza vs deformación evaluados a diferentes valores de energía de decohesión  $w$



$C_n=0.04$     $b=32.5$     $\nu=1.5$

Figura 8. Reacción de fuerzas, intensidad de adhesión y fuerza vs deformación evaluados a diferentes valores de viscosidad  $b$



### 3.4 PROBLEMA INVERSO

El problema inverso considera la estimación de parámetros constantes o funciones que son descritas mediante una función previa. se clasifica matemáticamente como mal planteado. La solución de problemas inversos se basa en la solución computacional del problema directo. Junto a los datos experimentales disponibles, y así obtener la estimación de los parámetros o funciones que aparecen en la formulación matemática del problema físico. Esto quiere decir que el problema inverso verificar el código y la solución.<sup>12</sup> Debido a lo anterior, se necesitan técnicas específicas para resolver estos problemas.

Las técnicas dentro del marco bayesiano, como el método de la cadena de Markov Monte Carlo (MCMC), siendo sencillos en su aplicación, al no ser restringidos a ninguna distribución previa para las incógnitas o modelos para los errores de medida. También Levenberg y Marquardt propusieron un método para superar la inestabilidad del flujo de calor transitorio en un problema inverso de conducción de calor (IHCP). Este método emplea un coeficiente de amortiguamiento que se beneficia de los métodos Gaussiano y de máximo descenso.<sup>13</sup> y el método de mínimos cuadrados que busca minimizar los errores cuadráticos para el ajuste de la función. En el problema inverso de interés los parámetros  $w$ ,  $b$  y  $C_n$  se consideraron desconocidos.

**3.4.1 Energía de decohesión.** Se calcular el área bajo la curva a partir de la integral de la gráfica de fuerza vs desplazamiento que se obtiene de la prueba de tracción. Representa la energía necesaria para separar el adhesivo y está dada por:

---

<sup>12</sup> HELCIO. R, B. Orlande. Inverse Heat Transfer Problems. En: Heat Transfer Engineering. 2011, vol.32, no.9, p.715.

<sup>13</sup> TAHMASBI, Vahid y NOORI Sahar. Application of Levenberg–Marquardt Method for Estimation of the Thermophysical Properties and Thermal Boundary Conditions of Decomposing Materials. En: Heat Transfer Engineering. 2020, vol 41, no.5, p.450.

$$w = 2 \int F d_{un} \quad (3)$$

**3.4.2 Método de mínimos cuadrados.** Por medio de una regresión lineal se busca hallar el parámetro de Rigidez( $C_n$ ) utilizando este método, minimizando los errores en el ajuste del polinomio de primer grado  $F(u_n) = C_n * u_n$

$$\min \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

$y_i$  Valores experimentales

$\hat{y}_i$  Valores del modelo

El valor del modelo se obtiene  $\hat{y}_i = f(x_i) = C_n x_i$  Por lo tanto, el coeficiente del polinomio que acompaña la variable independiente es la rigidez  $C_n$ , el cual se puede hallar minimizando la suma de los cuadrados. La función viene dada por:

$$P(C_n) = \min \sum_{i=1}^n (y_i - C_n x_i)^2 \quad (5)$$

- Pasos para una regresión lineal por el método de mínimos cuadrados:
- Recopilar los datos experimentales del valor de la variable independiente (x) y dependiente (y)
- Graficar los datos en un gráfico de dispersión
- Elegir una recta que se ajuste a la forma  $y = mx + b$ , donde m es la pendiente y b es el intercepto en y
- Calcular los valores del modelo: Utilizando la ecuación de la recta, se calculan los valores de y para cada valor de x.

- Calcular los errores: Se calculan los errores entre los valores observados y los valores del modelo.
- Se minimiza la suma de los cuadrados de los errores ajustando los valores de  $m$  y  $b$ . Esto se hace utilizando técnicas de optimización, como el método de descenso del gradiente.

## 4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para recopilar los datos necesarios para el análisis y caracterización del adhesivo Loctite Epoxi Bonder (Figura 9), se analizaron dos diferentes tipos de juntas adheridas al acero 1045, las probetas de termoplásticos ABS y PLA, para un total de 9 muestras de Acero/PLA y 9 de Acero/ABS. Adecuándose a la prensa hidráulica MTS para someterlas a fuerzas normales de tensión.

Figura 9. Adhesivo epoxi bicomponente



### 4.1 SUSTRATOS

Como se ha venido hablando las nuevas formas de prototipado rápido y de ensamble con materiales que derivan de la manufactura aditiva hace primordial estudiar la adhesión entre diferentes materiales como el acero y los plásticos al usar adhesivo tipo epoxi con la capacidad de unir diferentes tipos de materiales. Se consideraron dos sustratos, uno rígido el cual es fabricado en acero SAE 1045 usado ampliamente en aplicaciones de

ingeniería, por otro lado, se tiene dos materiales termoplásticos ABS y PLA. Los cuáles fueron unidos al acero para su estudio.

Figura 10. Plano del sustrato de acero 1045

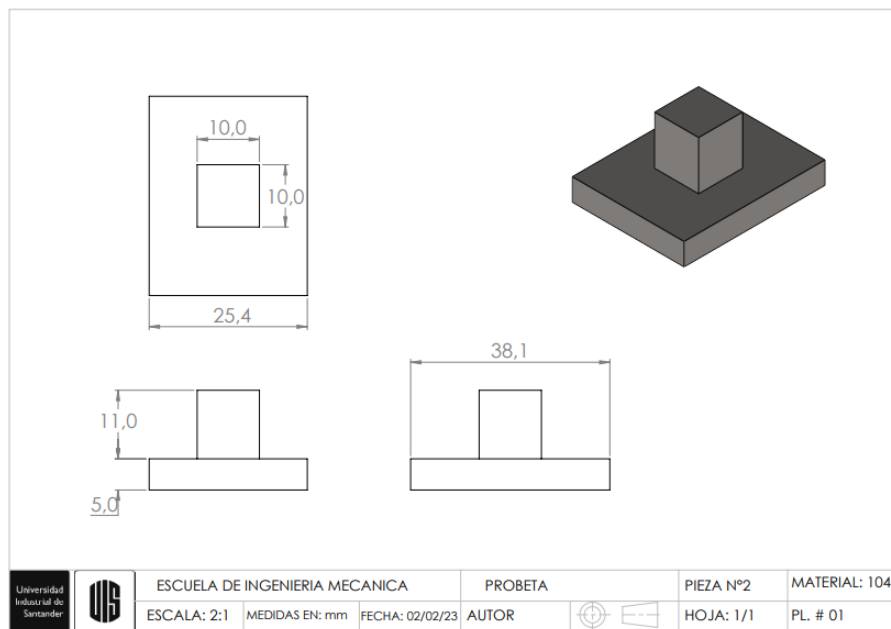
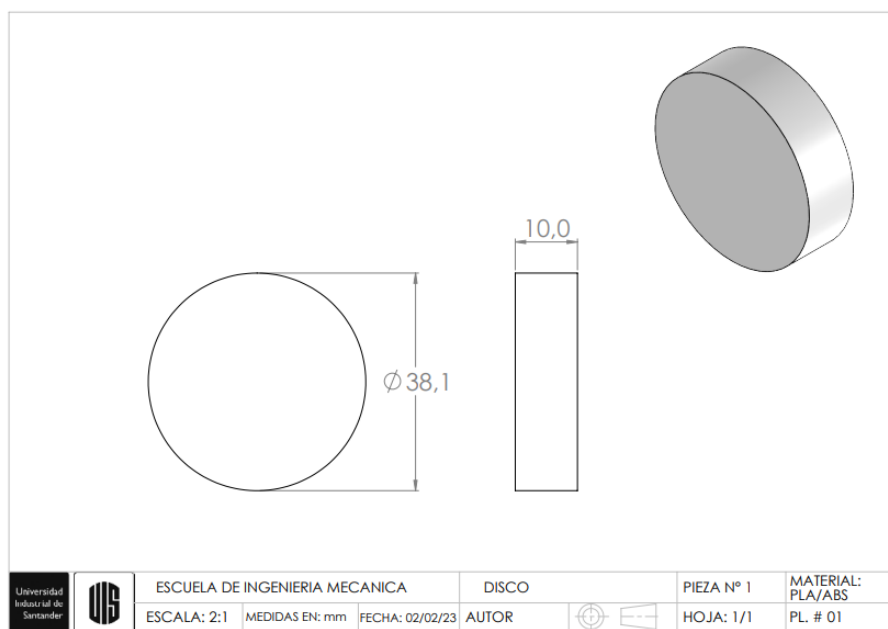


Figura 11. Plano del Sustrato de ABS y PLA



## 4.2 PREPARACION DE LA UNION ADHESIVA

Para la unión adhesiva de las juntas de acero y materiales de impresión 3D, se utilizó un adhesivo Loctite epoxi Bonder bicomponente a base de bisfenol-A, para dos tipos de juntas diferentes, Acero/ABS y Acero/PLA.

**4.2.1 Probetas.** Como recomendación para hacer el ensayo a tracción, se consideró mantener un área de unión reducida, para garantizar que los componentes que permiten la sujeción de las juntas no sufran ningún daño, para este caso el área de unión fue de 1 cm<sup>2</sup> que según las especificaciones del adhesivo la resistencia sería de 130 Kg/cm<sup>2</sup>.

**4.2.2 Proceso de unión.** Previamente a la adhesión de los sustratos pasaron por un proceso de preparación para garantizar la unión. Para el acero, se pulió la superficie donde se aplicaría el adhesivo, también se utilizó como disolvente la acetona para retirar rastros de impurezas como grasas y agentes oxidantes. Por otro lado, los termoplásticos de impresión 3D se mantuvieron aislados para evitar que absorbieran la humedad del ambiente o fueran afectados por otras sustancias. Y así garantizar una mayor trazabilidad de las probetas.

El adhesivo utilizado es un epoxi de dos componentes que fueron mezclados previamente para garantizar la homogeneidad entre la resina y el endurecedor, el cual fue aplicado en la superficie a unir procurando ser distribuido en toda el área, dejando dos días de curado a temperatura ambiente.

Figura 12. Juntas ACERO/ABS



Figura 13. Juntas ACERO/PLA



### 4.3 ENSAYO MECANICO

Figura 14. Máquina de ensayos universal con el banco de pruebas de carga normal.



**4.3.1 Ensayo de carga axial.** Para llevar a cabo los ensayos de tracción, se utilizó la máquina de ensayos universales Mechanical Testing System (MTS), ubicado en el laboratorio de la escuela. El banco de pruebas de carga normal se adecuó para este propósito y se llevaron a cabo las pruebas a una velocidad lineal de  $0.3 [mm/min]$  y  $27^{\circ}C$ . La figura 14 muestra el montaje utilizado en el ensayo mecánico con el adhesivo epoxi.

**4.3.2 Resultado de la carga axial.** Los resultados fueron obtenidos a partir de la máquina de ensayos MTS que midió la fuerza aplicada y la distancia relativa entre los sustratos de Acero/ABS denominadas AB1,AB2,AB3, hasta AB9 y Acero/PLA denominamos PL1,PL2,PL3, hasta PL9 respectivamente.

Figura 15. Grafica Fuerza vs Desplazamiento para la junta ABS-ACERO

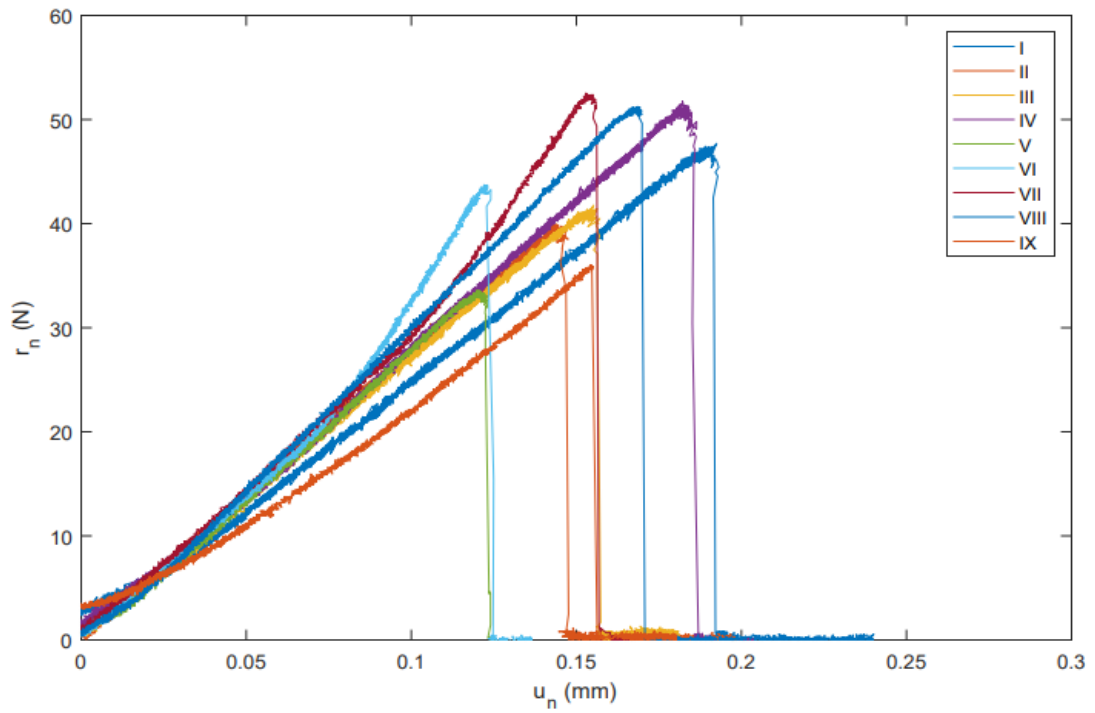
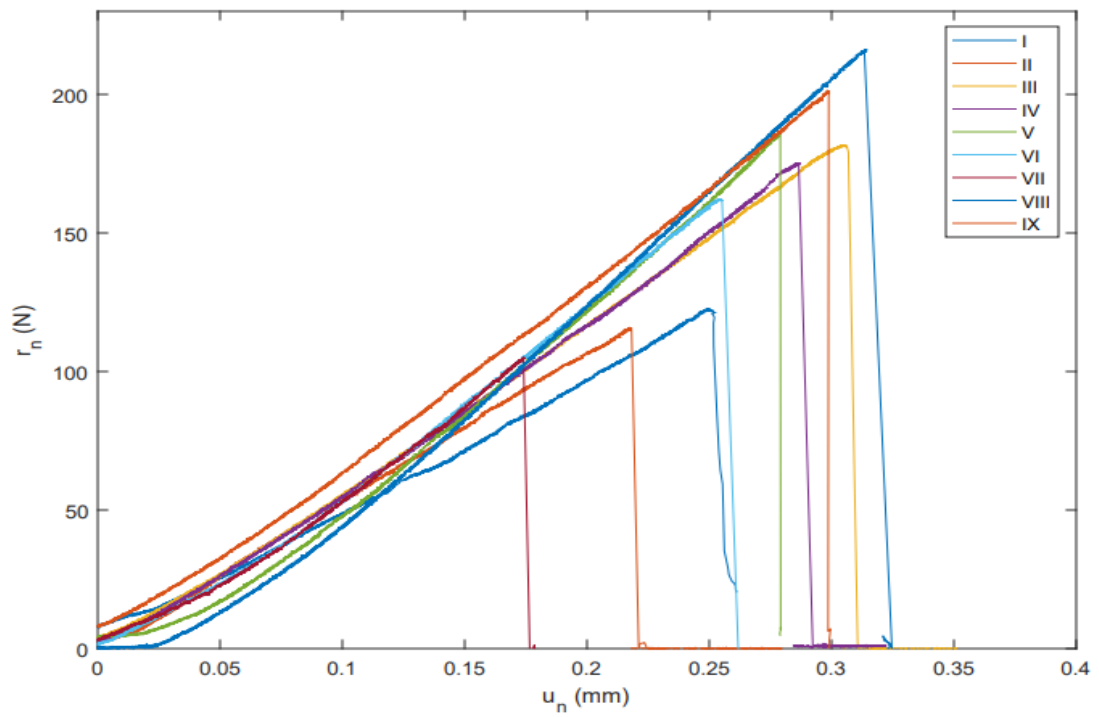


Figura 16. Grafica Fuerza vs Desplazamiento para la junta PLA-ACERO.



De acuerdo con los datos experimentales, se puede notar que todas las muestras presentan una pendiente y fuerzas similares garantizando que la variable de Rigidez ( $C_n$ ) tendrá consistencia, en la junta Acero/ABS por otro lado, la diferencia de las fuerzas máximas cambia sustancialmente el valor de la rigidez ( $C_n$ ) para el Acero/PLA, también para cada una de las muestras al llegar a la fuerza máxima fallan de inmediato, esto sucede debido a la baja viscosidad en el adhesivo utilizado, causando que su comportamiento no se adecue en su totalidad al modelo de Raous.

Al comparar el desplazamiento que obtuvieron los dos tipos de juntas se puede esperar que la energía de decohesión sea mayor en la junta Acero/PLA a la Acero/ABS, esto se debe a que el desplazamiento  $u_n$  es directamente proporcional a energía de decohesión  $w$ .

En este caso para poder encontrar la Rigidez ( $C_n$ ) se utiliza el ajuste por el método de mínimos cuadrados que ajusta la recta con el mínimo error medio cuadrático. Para la energía de decohesión ( $w$ ) se halla el área bajo la curva de la Fuerza vs Desplazamiento y la viscosidad se asumió constante.

**4.3.2.1 Resultado de la unión adhesiva.** A continuación, se presentan el resultado de las juntas Acero-PLA y Acero-ABS luego de haberlas sometido a esfuerzos de tracción.

Figura 17. Resultado de la unión adhesiva para las juntas Acero/PLA y Acero/ABS

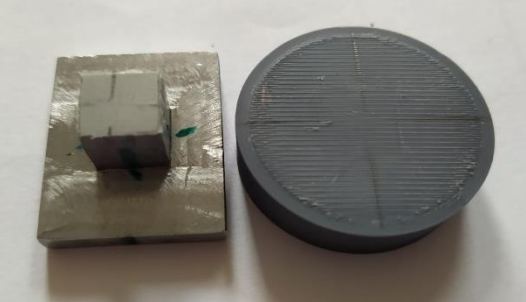
AB1



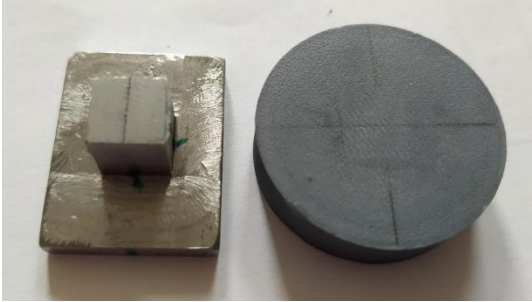
AB2



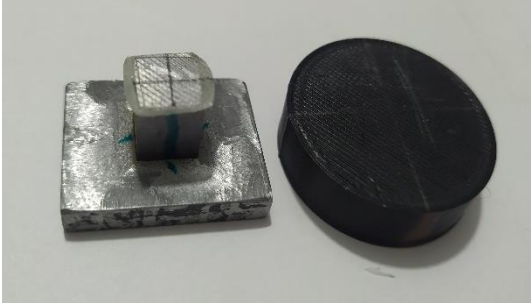
AB3



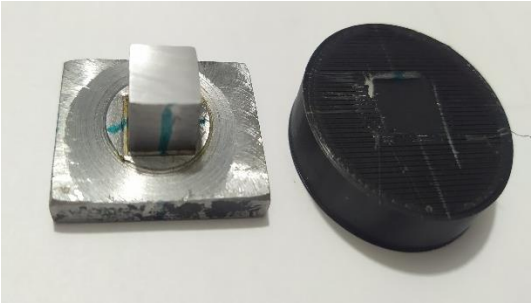
AB4



PL1



PL2



PL3



PL4



Tabla 1. Punto de rotura del adhesivo en la junta ABS-ACERO

# de Pruebas	Fuerza [N]	Distancia [mm]
AB1	47.00	0.207
AB2	39.60	0.146
AB3	41.77	0.165
AB4	51.51	0.192
AB5	33.60	0.128
AB6	43.56	0.128
AB7	52.37	0.157
AB8	51.09	0.174
AB9	35.74	0.166
Promedio	44.02	0.162

Tabla 2. Punto de rotura del adhesivo en la junta PLA-ACERO

# de Pruebas	Fuerza [N]	Distancia [mm]
PL1	121.74	0.271
PL2	115.57	0.223
PL3	181.34	0.312
PL4	174.97	0.283
PL5	185.65	0.277
PL6	161.78	0.252
PL7	104.65	0.176
PL8	216.15	0.288
PL9	201.44	0.298
Promedio	162.58	0.264

Figura 18. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para la fuerza  $r_n$  de la junta Acero/ABS

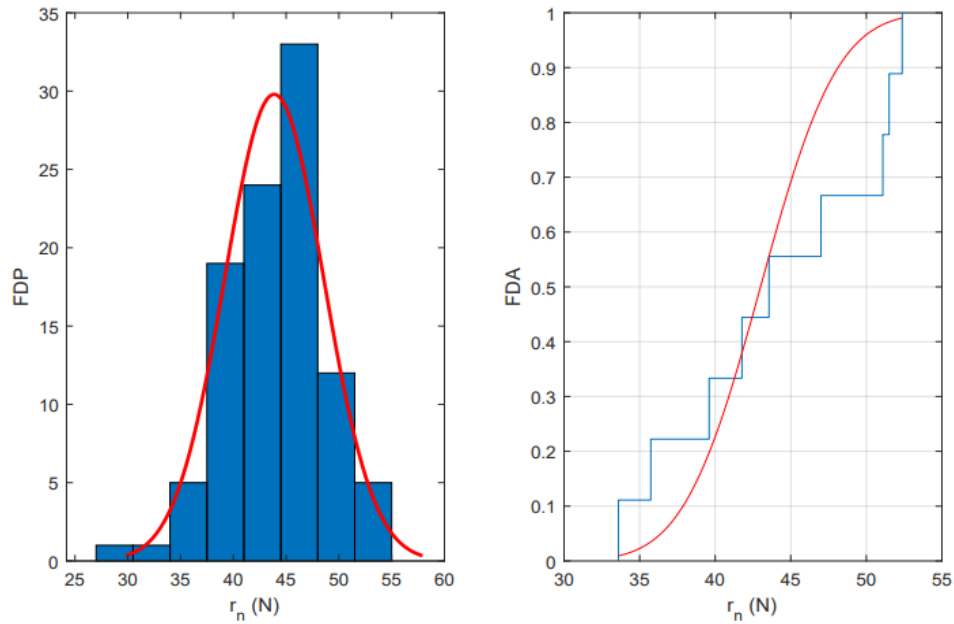
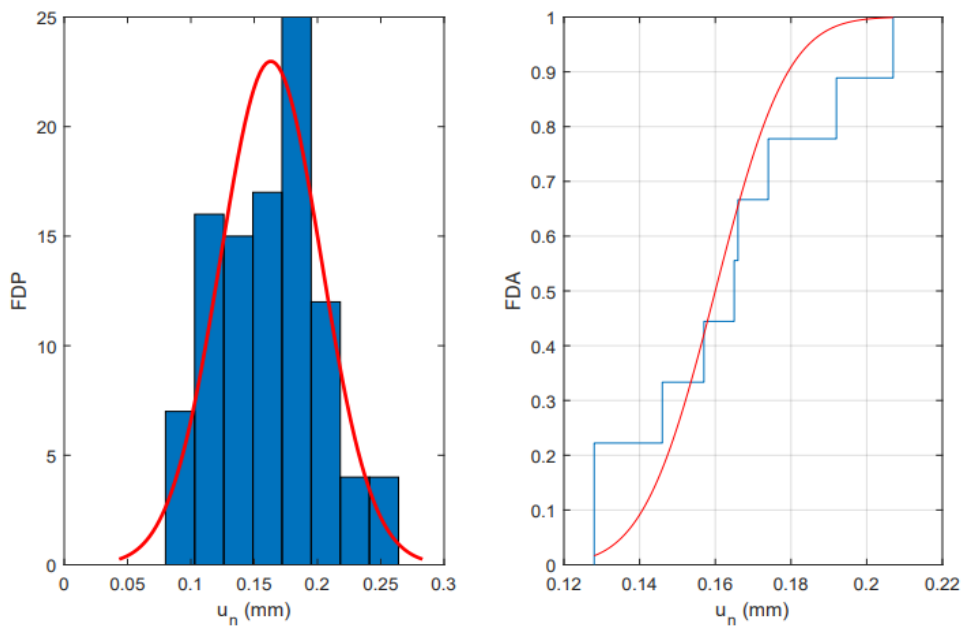


Figura 19. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para el desplazamiento  $u_n$  de la junta Acero/ABS



La probabilidad de que la fuerza  $r_n$  se encuentre en el rango de (40 - 47) [N] es del 60%, con una desviación estándar de  $\sigma = 5$  y la probabilidad para que el desplazamiento del

adhesivo este en el rango (0,15 - 0,17) [mm] es del 60%, con una desviación estándar de  $\sigma = 0,015$

Figura 20. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para la fuerza  $r_n$  de la junta Acero/PLA

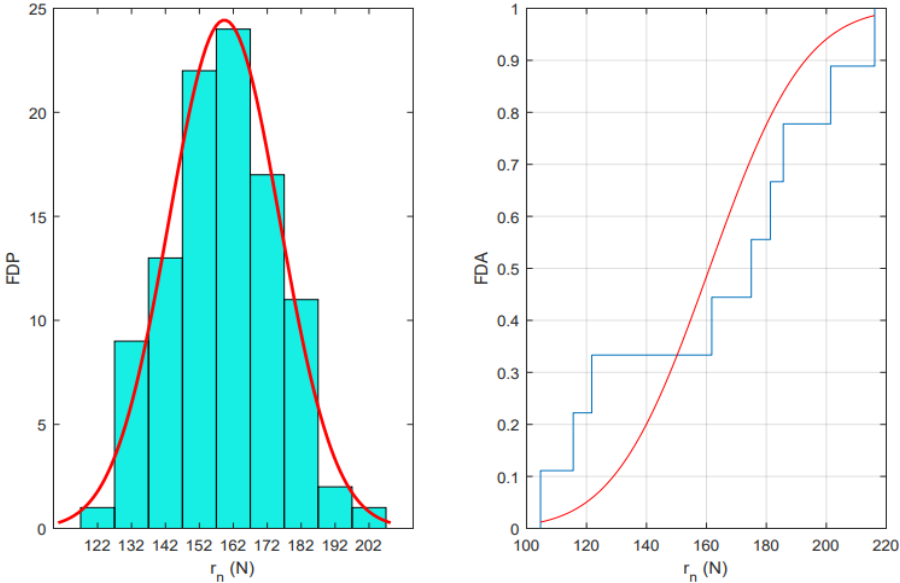
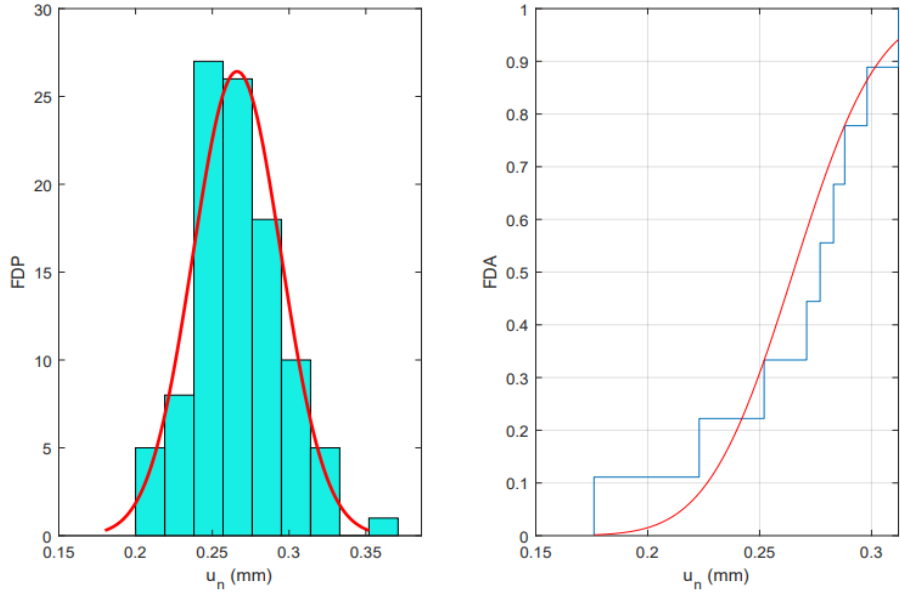


Figura 21. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para el desplazamiento  $u_n$  de la junta Acero/PLA



La probabilidad de que la fuerza  $r_n$  se encuentre en el rango de (140 - 182) [N] es del 60%, con una desviación estándar de  $\sigma = 13$  y la probabilidad desplazamiento del adhesivo que este en el rango (0,24 - 0,29) [mm] es del 60%, con una desviación estándar de  $\sigma = 0.03$ .

#### **4.4 CARACTERIZACIÓN**

A partir de los datos experimentales se procede a hallar los parámetros constitutivos del modelo de Raous, el termino  $p$ , según estipulado en el análisis de las variables del modelo es de  $p = 1$  y  $b$  se tomó constante con un valor de  $b = 10$  debido a que no se pudo adecuar del todo al modelo de Raous por la baja viscosidad del adhesivo. Para los demás parámetros  $C_n$ , se utilizó el Método de mínimos cuadrados descrito anteriormente y para  $w$ , se resolvió la ecuación (3) que soluciona el área bajo la curva de la gráfica Fuerza vs Desplazamiento. A continuación, se mostrará la solución computacional para  $C_n$  y  $w$  para las primeras dos juntas de Acero/ABS, AB1,AB2 y Acero/PLA, PL1, PL2 los demás se encontrarán en los anexos C y D del documento.

Figura 22. Energía de decohesión ( $w$ ) para la junta Acero/ABS, AB1 y AB2.

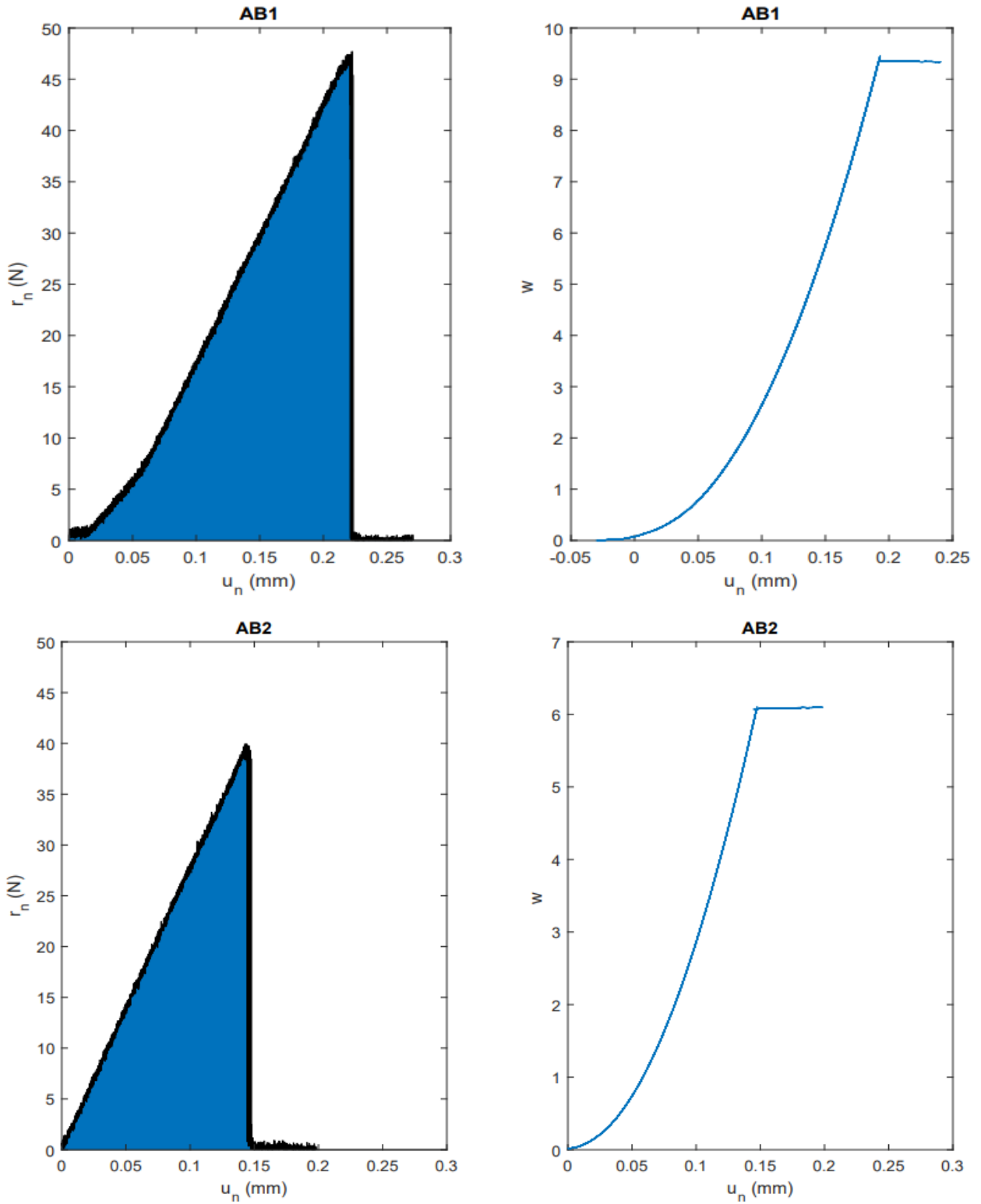


Figura 23. Energía de decohesión ( $w$ ) para la junta Acero/PLA, PL1 y PL2.

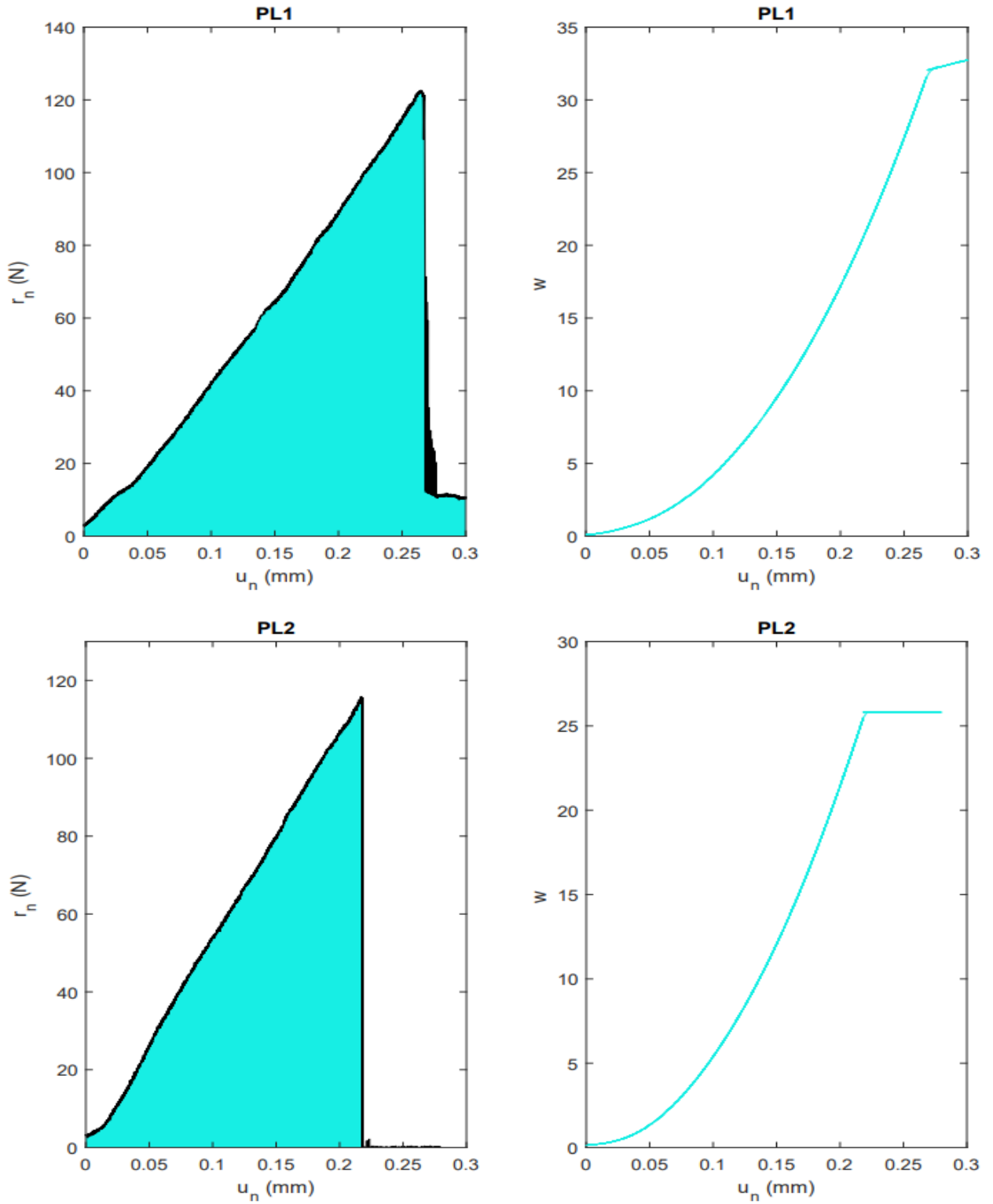


Figura 24. Rigidez (Cn) para la junta Acero/ABS, AB1 y AB2.

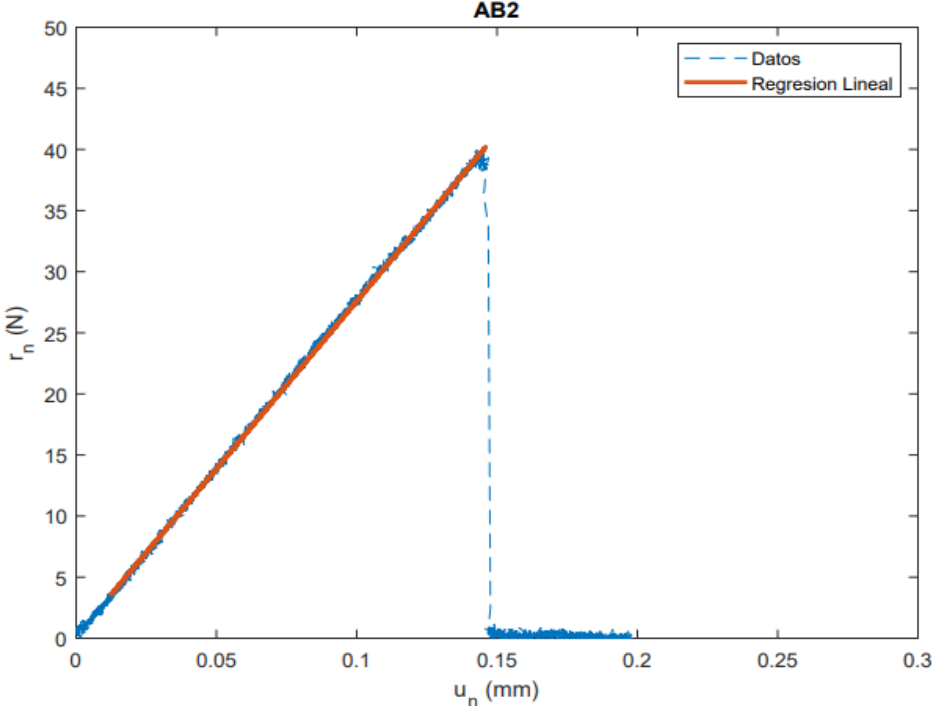
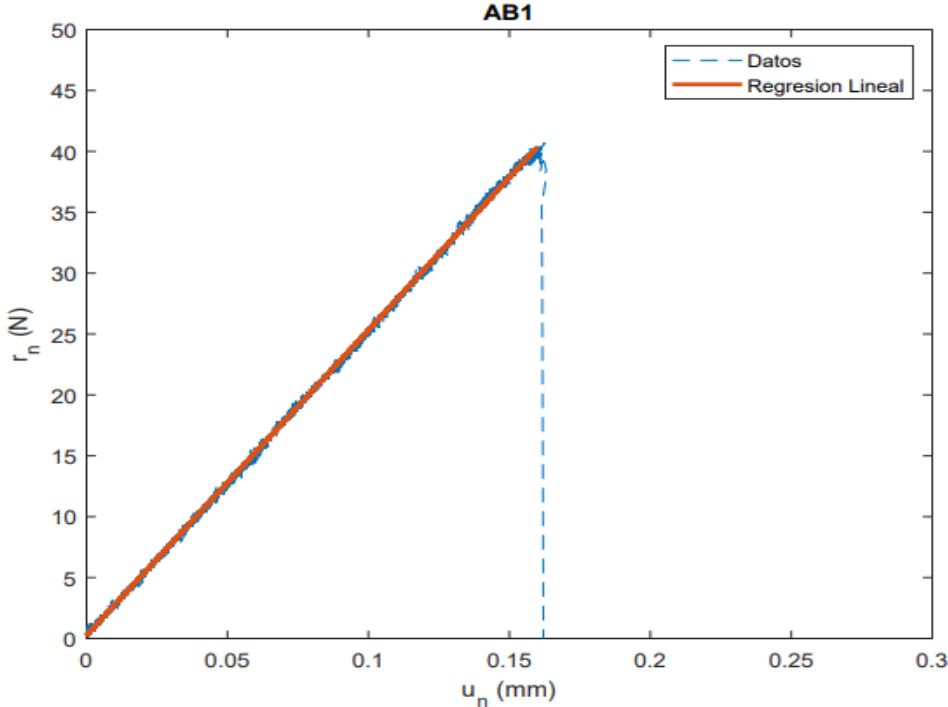
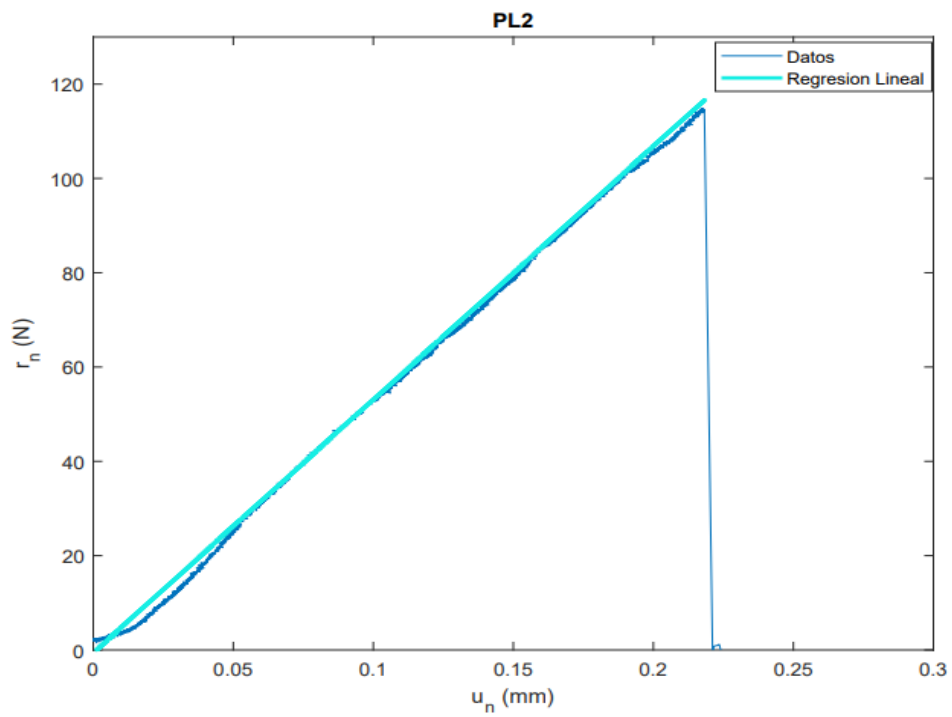
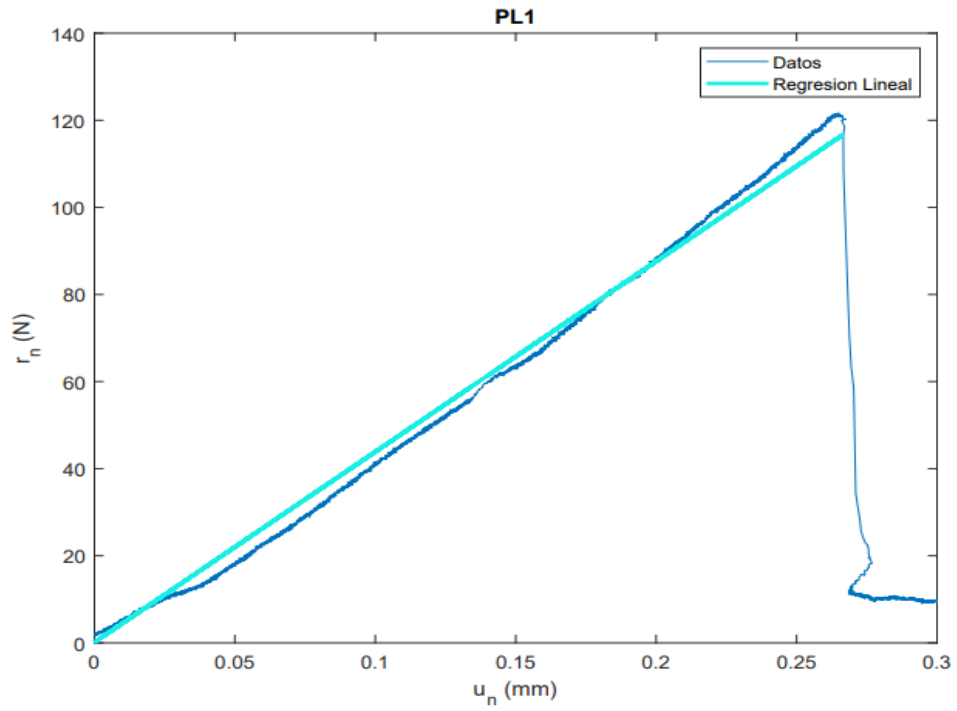


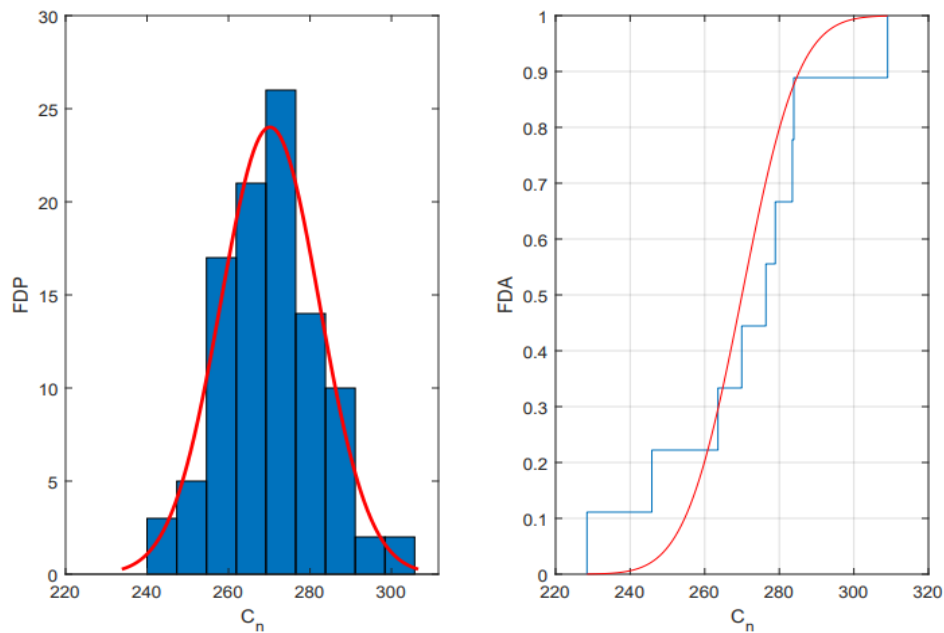
Figura 25. Rigidez (Cn) para la junta Acero/PLA, PL1 y PL2.



Cuadro 1. Parámetros estimados para ABS-Acero

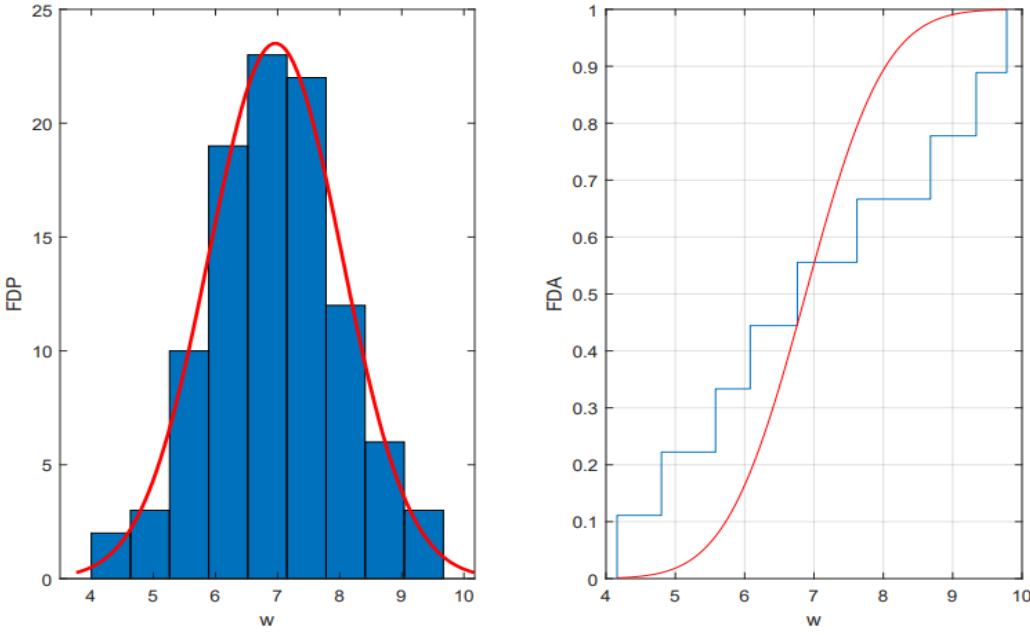
	$C_n$ [N/mm]	$b$ [N.mm.s]	$w$ [N. mm]
AB1	245.82	10	9.34
AB2	278.93	10	6.08
AB3	263.55	10	6.76
AB4	276.41	10	9.78
AB5	283.51	10	4.16
AB6	269.93	10	4.80
AB7	283.89	10	7.62
AB8	309.05	10	8.68
AB9	228.42	10	5.58
Promedio	271.06	10	6.98

Figura 26. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para el coeficiente de rigidez ( $C_n$ )



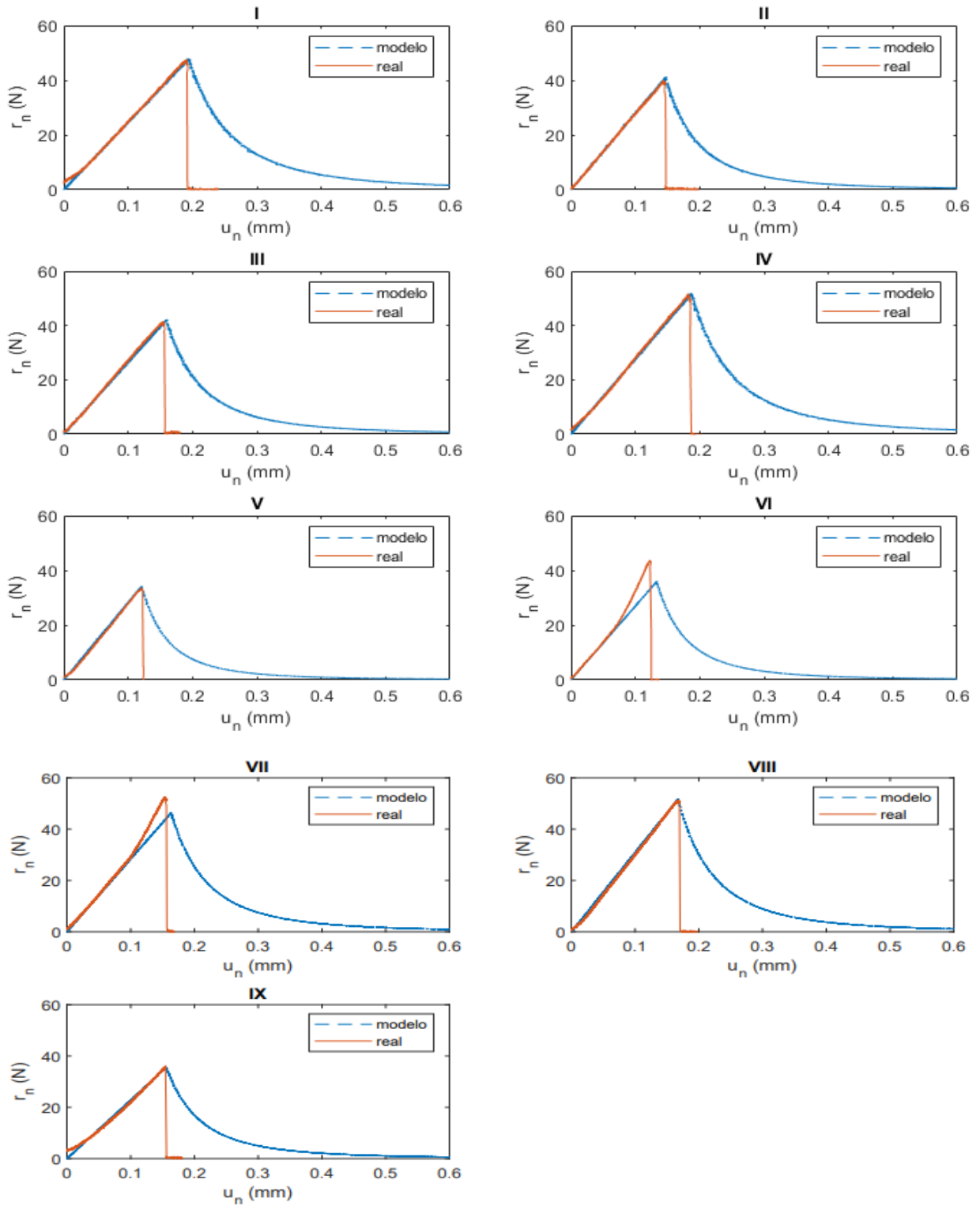
La probabilidad de que el valor del coeficiente de rigidez  $C_n$  se encuentre entre los valores (260 - 280) es del 60% y una desviación estándar de  $\sigma = 15$ .

Figura 27. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para la energía de decohesión ( $w$ )



Para la energía de decohesión  $w$  la probabilidad de que se encuentre entre los valores (6.1 – 7.6) es del 60% y una desviación estándar de  $\sigma = 1$ .

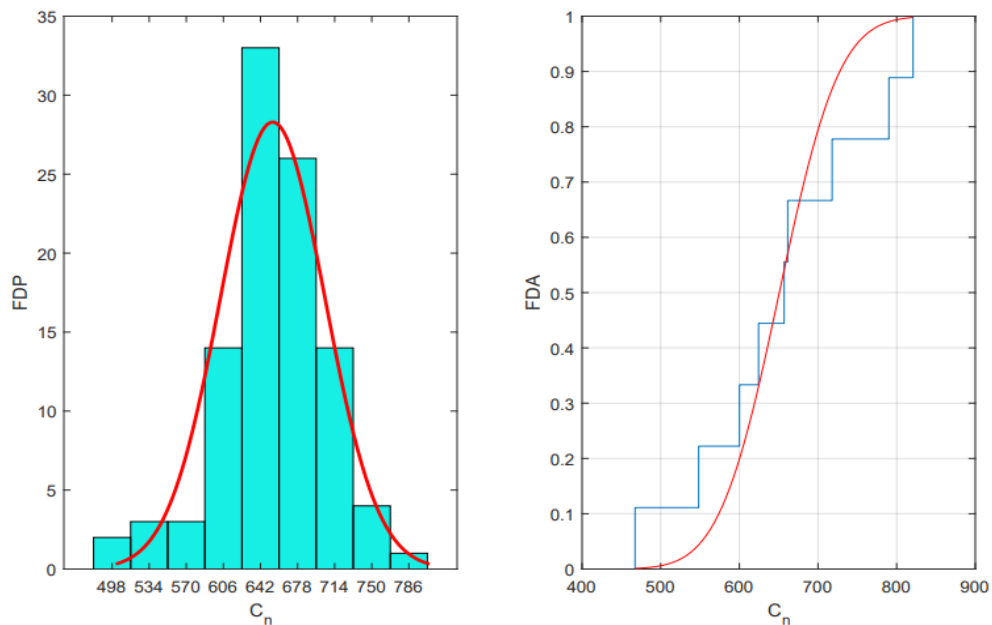
Figura 28. Comportamiento de la fuerza de reacción experimental vs modelo en la junta ACERO-ABS.



Cuadro 2. Parámetros estimados para PLA-Acero

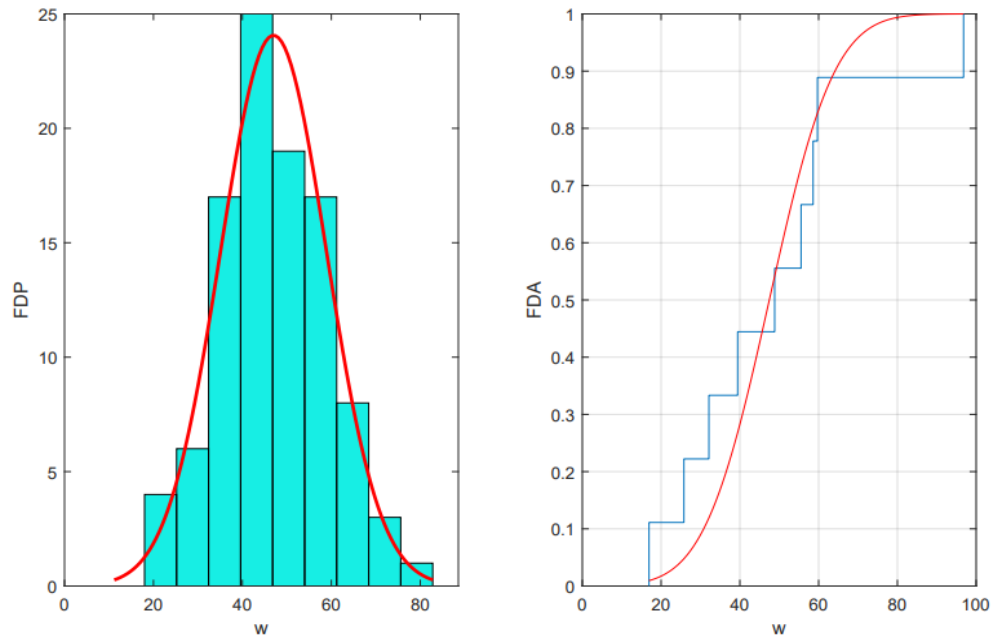
	$C_n$ [N/mm]	$b$ [N.mm.s]	$w$ [N.mm]
PL1	467.37	10	32.14
PL2	548.27	10	25.80
PL3	624.38	10	55.54
PL4	600.15	10	48.84
PL5	790.11	10	96.80
PL6	717.95	10	39.44
PL7	661.49	10	16.94
PL8	820.88	10	58.60
PL9	656.97	10	59.70
Promedio	654.17	10	48.20

Figura 29. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para el coeficiente de rigidez ( $C_n$ )



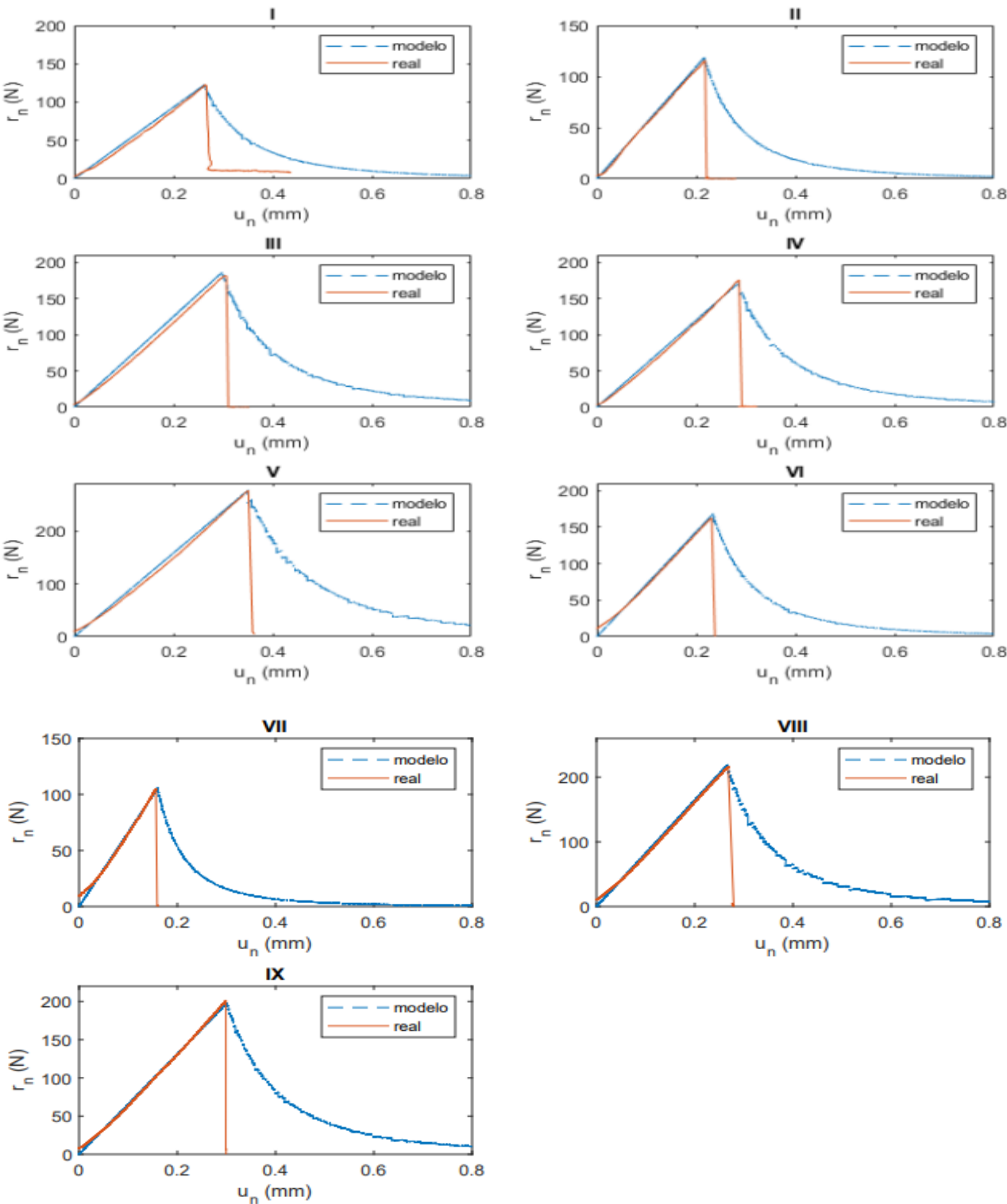
La probabilidad de que el valor del coeficiente de rigidez  $C_n$  se encuentre entre los valores (600-700) es del 60% y una desviación estándar de  $\sigma = 60$ .

Figura 30. Función de densidad y función de probabilidad acumulada para la energía de decohesión ( $w$ )



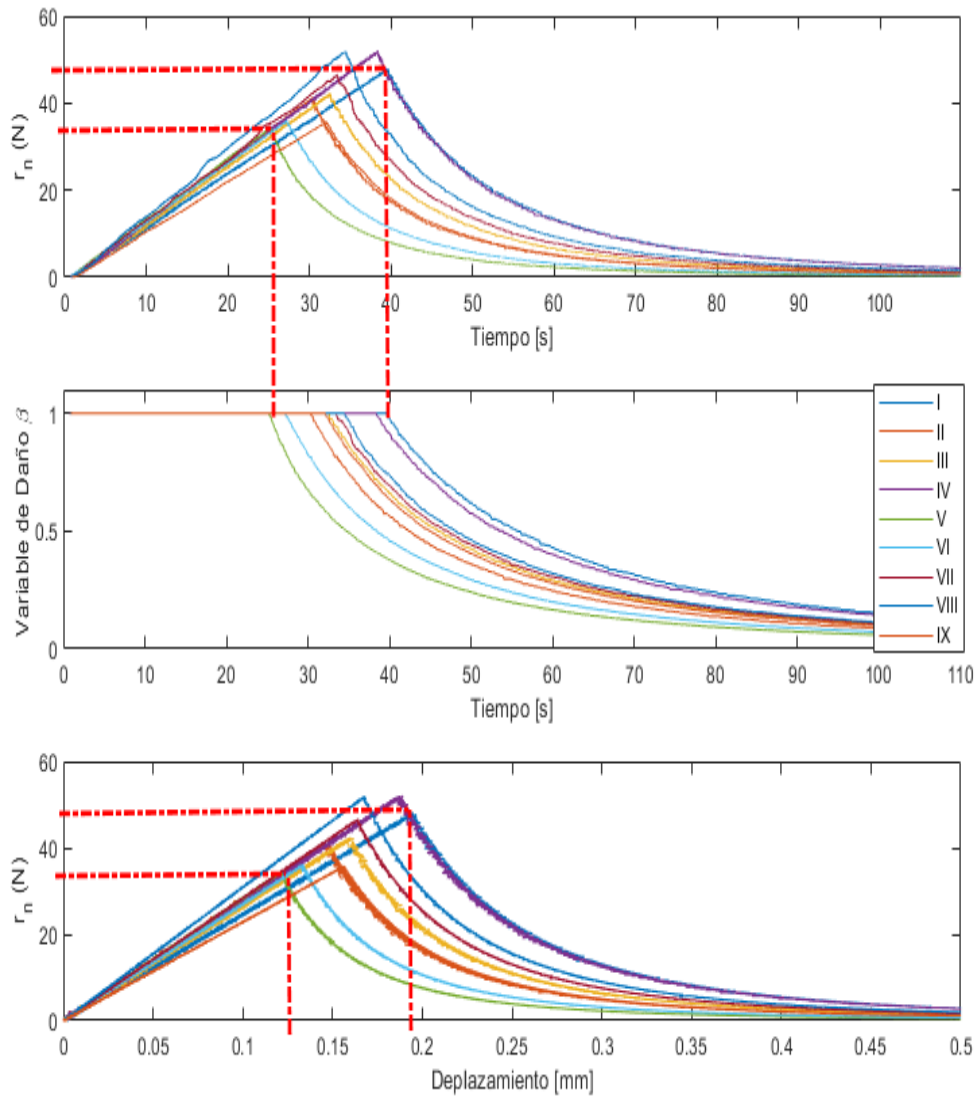
Para la energía de decohesión  $w$  la probabilidad de que se encuentre entre los valores (30-64) es del 60% y una desviación estándar de  $\sigma = 13$ .

Figura 31. Comportamiento de la fuerza de reacción experimental vs modelo en la junta ACERO-PLA.



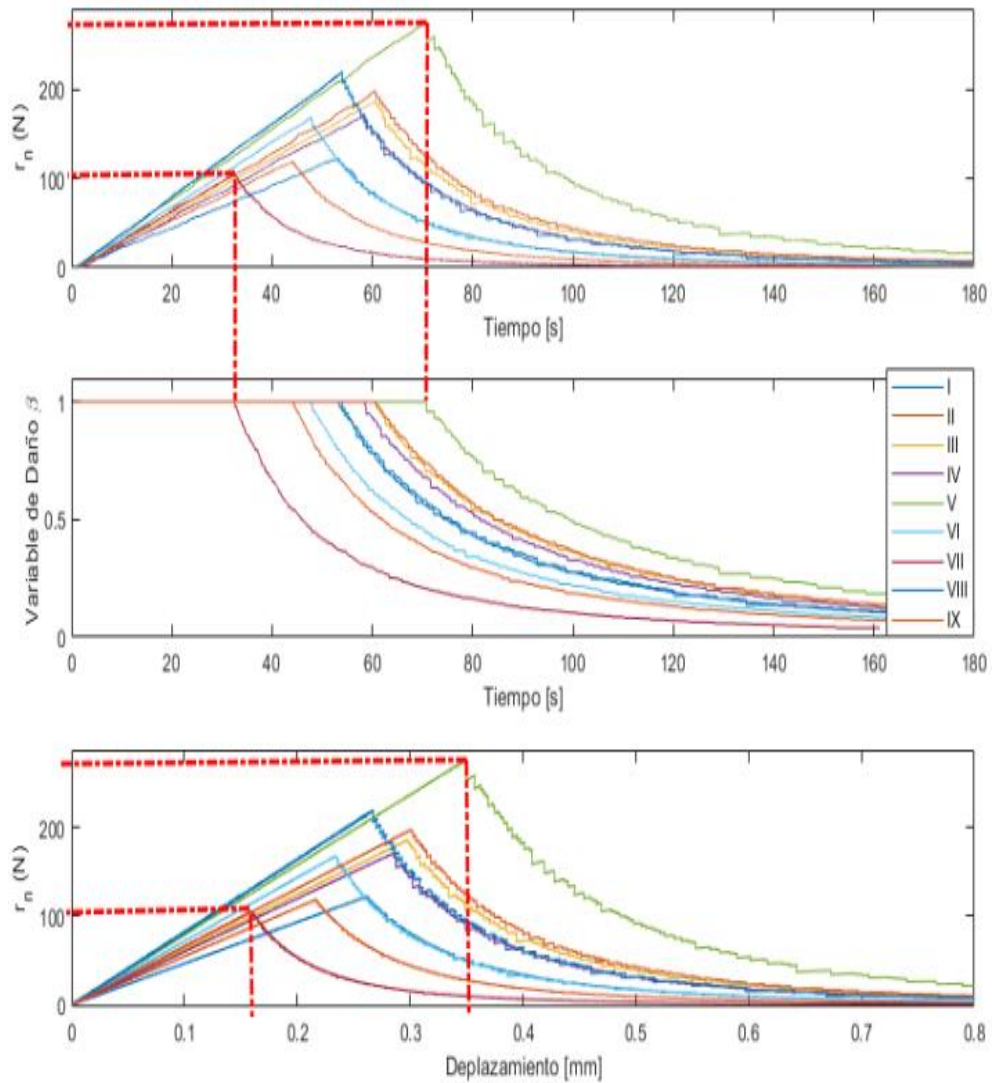
#### 4.4.1 Análisis del comportamiento del modelo calibrado.

Figura 32. Variables del modelo de Raous calibrado en la junta ACERO-ABS.



Para la junta de Acero/ABS en la figura 25 se ve el comportamiento del modelo calibrado, en el cual la variable de daño  $\beta$  se activa en un rango de 33-48 [N] y un desplazamiento mayor a 0,125 [mm].

Figura 33. Variables del modelo de Raous calibrado en la junta ACERO PLA.



Para la junta Acero/PLA en la figura 26 que la variable de daño  $\beta$  se activa en un rango de fuerza de 104-276 [N], también se puede observar en la gráfica Fuerza vs Desplazamiento, la variable de daño  $\beta$  se activa a partir del desplazamiento de 0,159 [mm].

## 5. CONCLUSIONES

Para el análisis de la unión adhesiva se evidenció que el adhesivo al tener una baja viscosidad no se ajustó al modelo de Raous, esto se visualiza en las figuras 15 y 16, en los cuales, los datos experimentales muestran una caída abrupta de la fuerza al llegar a su máximo sin presentar un comportamiento no lineal, debido a esto la variable de la viscosidad ( $b$ ) para la junta Acero/ABS y Acero/PLA se asumió de 10 [N.mm.s].

Al examinar las variables del modelo de Raous se evidenció que el valor de la rigidez  $C_n$  afecta el valor de la fuerza  $r_n$ , esto se corrobora la figura 32 del modelo calibrado de la junta Acero/PLA, El parámetro al tener un rango (467 – 820) [N/mm], la fuerza varía entre (102 – 277) [N]. Para el caso de la junta Acero/ABS, figura 31 la rigidez tuvo un rango de (245 - 309) [N/mm], y la fuerza varía entre (33 – 52) [N].

En la junta Acero/PLA la energía de decohesión ( $w$ ) tuvo valores entre (16 – 96) [N.mm], con un desplazamiento de 0.16 [mm], en comparación a la junta Acero/ABS su rango fue de (4 – 9.7) [N.mm], con un desplazamiento de 0.12 [mm], esto permite corroborar que la energía de decohesión ( $w$ ) marca el punto en el que la variable de daño empieza a actuar en el adhesivo, y entre mayor es el valor, también su deformación.

El adhesivo Loctite Epoxi Bonder a base de bisfenol-A presenta una mejor adhesión en el PLA en comparación que el ABS, ya que la fuerza soportada por la junta de Acero/PLA en las pruebas de tracción fue 3 veces mayor al Acero/ABS. También se presentaron para ambas el tipo de fallo adhesivo, en la junta Acero/ABS fallo el sustrato de ABS y para el Acero/PLA el Acero, concluyendo que las moléculas del adhesivo a base de bisfenol-A tuvo una mejor interacción con el PLA en comparación al ABS.

El ajuste de los parámetros mostró una mejor consistencia en la junta Acero/ABS esto se debe a los datos experimentales obtenidos tiene valores de fuerza y desplazamiento

similares para las nueve muestras. Para el caso de la junta Acero/PLA la fuerza varia bastante generando que la variable de rigidez  $C_n$  lo hiciera de igual modo.

## **6. RECOMENDACIONES**

Para obtener una mejor trazabilidad de cada uno de los ensayos se sugiere analizar la rugosidad de la superficie de cada uno de los materiales a unir, con el fin de obtener una perspectiva del comportamiento del adhesivo y los adherentes. También el uso de un adhesivo que tenga una mayor viscosidad, el cual permitirá que el modelo de Raous describa su comportamiento en su totalidad.

## BIBLIOGRAFÍA

ALBUQUERQUE, E. B; CASTELLO, D. A Y BORGES, L. A. Calibration of adhesion models based on bayesian inference. En: *Inverse problems in science and engineering*. 2016, vol.24, no.5, p.1-26. En: <http://dx.doi.org/10.1080/17415977.2015.1077444>. ISSN 1741-5985.

ANAGUANO. A, Diana del Pilar. LOACHAMIN. S, Carlos Mauricio. Análisis de uniones por adhesión para materiales metálicos. Trabajo de grado Tecnólogo en procesos de producción mecánica. Quito. Escuela Politécnica Nacional. 2008. 222 p.

GORDELIER, Tessa. J, et al. Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review. En: *Rapid prototyping Journal*. 2019, vol.25, no.6, p.953-971. En : [www.emeraldinsight.com/1355-2546.htm](http://www.emeraldinsight.com/1355-2546.htm). ISSN 1355-2546

HARSHIT. K, Dave, et al. Investigation on tensile strength and failure modes of FDM printed part using in-house fabricated PLA filament. En: *Advances in materials and processing technologies*. 2022, vol.8, no.1, p.576-597. En: <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1829951>.

HELICIO. R, B. Orlande. Inverse Heat Transfer Problems. En: *Heat Transfer Engineering*. 2011, vol.32, no.9, p.715-717. En: DOI: 10.1080/01457632.2011.525128. ISSN 1521-0537

JINGXIN. Na, et al. Evaluation method of adhesive joint strength based on the normal-shear stress of adhesive interface and its application in engineering. *Advances in Mechanical Engineering*. En: *Advances in Mechanical Engineering*. 2015, vol.7, no.5, p.1-9. En: doi:10.1177/1687814015584255. ISSN 1687-8140

LIESA, Francisco y BILURBINA, Luis. Adhesivos Industriales. España. Marcombo Boixareu Editores. 1990. 128 p. ISBN 84-267-0785-8.

M. NECATI, Ozisik y HELCIO R, B. Orlande. Inverse Heat Transfer Fundamentals and applications. 2 ed. Boca Raton. Taylor & Francis Group, 2021. 277 p. ISBN 978-1-003-15515-7.

MURILLO. Daniela y VEGA. Laura. Caracterización y comparación de las propiedades mecánicas para juntas metálicas utilizando adhesivo de resina sintética tipo epoxi pura y modificada a base de lignina. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2018. 86 p.

ONWUBOLU, Godfrey C. y RAYEGANI, Farzad. Characterization and Optimization of Mechanical Properties of ABS Parts Manufactured by the Fused Deposition Modelling Process. En: *International Journal of Manufacturing Engineering*. 2014, vol.2014, p. 1-13. En: <https://doi.org/10.1155/2014/598531>. ISSN 2314-5781

PACHECO C. Gustavo I. Análisis de tracción de probetas impresas en 3D mediante deposición de hilo fundido de PLA, ABS Y PLA/MLO. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Cuenca. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. 2019. 88 p.

PIERO, Gianpietro y RAOUS, Michel. A unified model for adhesive interfaces with damage, viscosity, and friction. En: *European Journal of Mechanics A/Solids*. 2010, vol.29, no.4, p. 496-507. En: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2010.02.004>. ISSN 0997-7538

RAOUS, M; CANGÉMI, L y COCU, M. A consistent model coupling adhesion, friction, and unilateral contact. En: *Computer Methods Engineering in Applied Mechanics and Engineering*. 1999, vol.177. no.4, p. 383-399. En: [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(98\)00389-2](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(98)00389-2). ISSN 0045-7825

SILVA G, L. S, et al. Calibration of adhesion models base on the extended Kalman filtering. En: *The journal of adhesion*. 2016, vol.00, no.00, p. 1-27. En: <http://dx.doi.org/10.1080/00218464.2016.1188382>

TAHMASBI, Vahid y NOORI Sahar. Application of Levenberg–Marquardt Method for Estimation of the Thermophysical Properties and Thermal Boundary Conditions of Decomposing Materials. En: *Heat Transfer Engineering*. 2020, vol 41, no.5, p. 449-475. En: <https://doi.org/10.1080/01457632.2018.1558010>

VEGA, M. Mario. Tecnología de la adhesión: Departamento técnico de Loctite. En: Seminario sobre adhesivos. España. p .1-59.

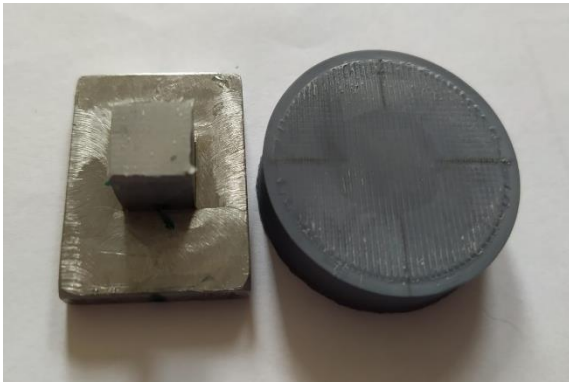
WONG, Kaufui V y HERNANDEZ, Aldo. A Review of Additive Manufacturing. En: *International Scholarly Research Network*. 2012, vol.2012. p. 1-10. En: <https://doi.org/10.5402/2012/208760>. ISSN 2356-7872

ZÚÑIGA C, Oscar y VEGA R. Rodrigo. Estimación de parámetros en modelos no lineales: Algoritmos y aplicaciones. En: *Revista EIA*. vol.13. no.25. Colombia. 2016. p. 81-98. ISSN 1794-1237

## ANEXOS

### Anexo A. Resultado de la unión adhesiva para la junta Acero/ABS

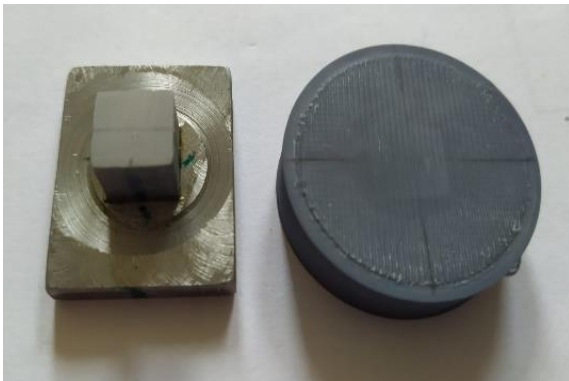
AB5



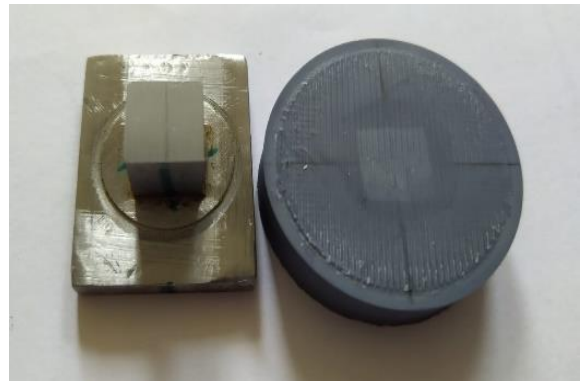
AB6



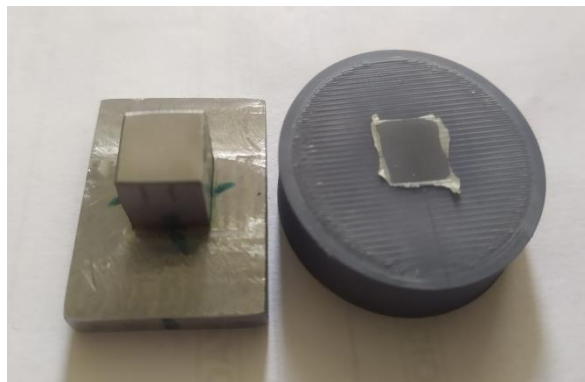
AB7



AB8

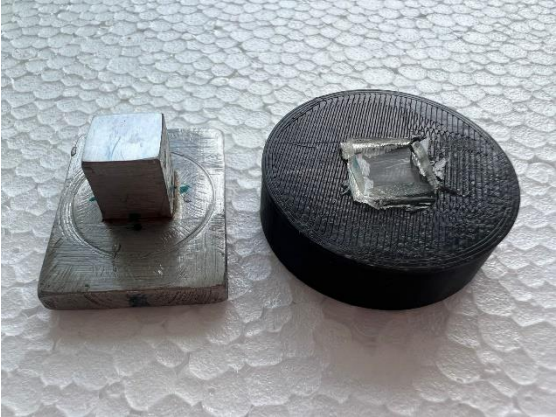


AB9



Anexo B. Resultado de la unión adhesiva para la junta Acero/PLA

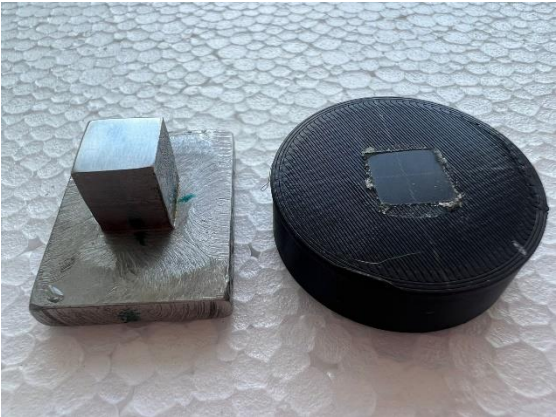
PL5



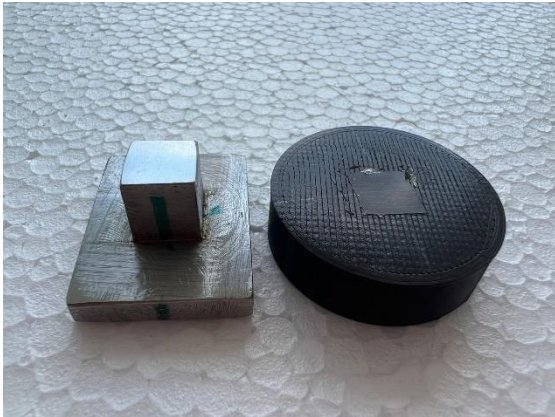
PL6



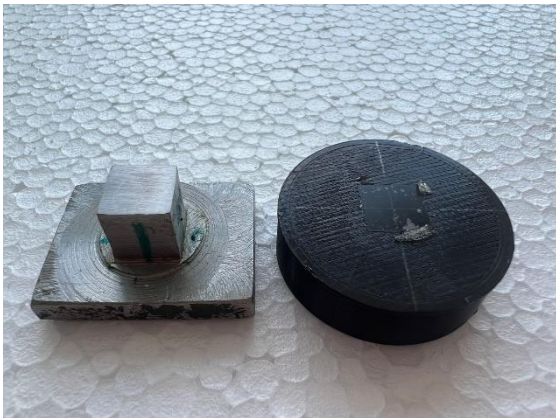
PL7



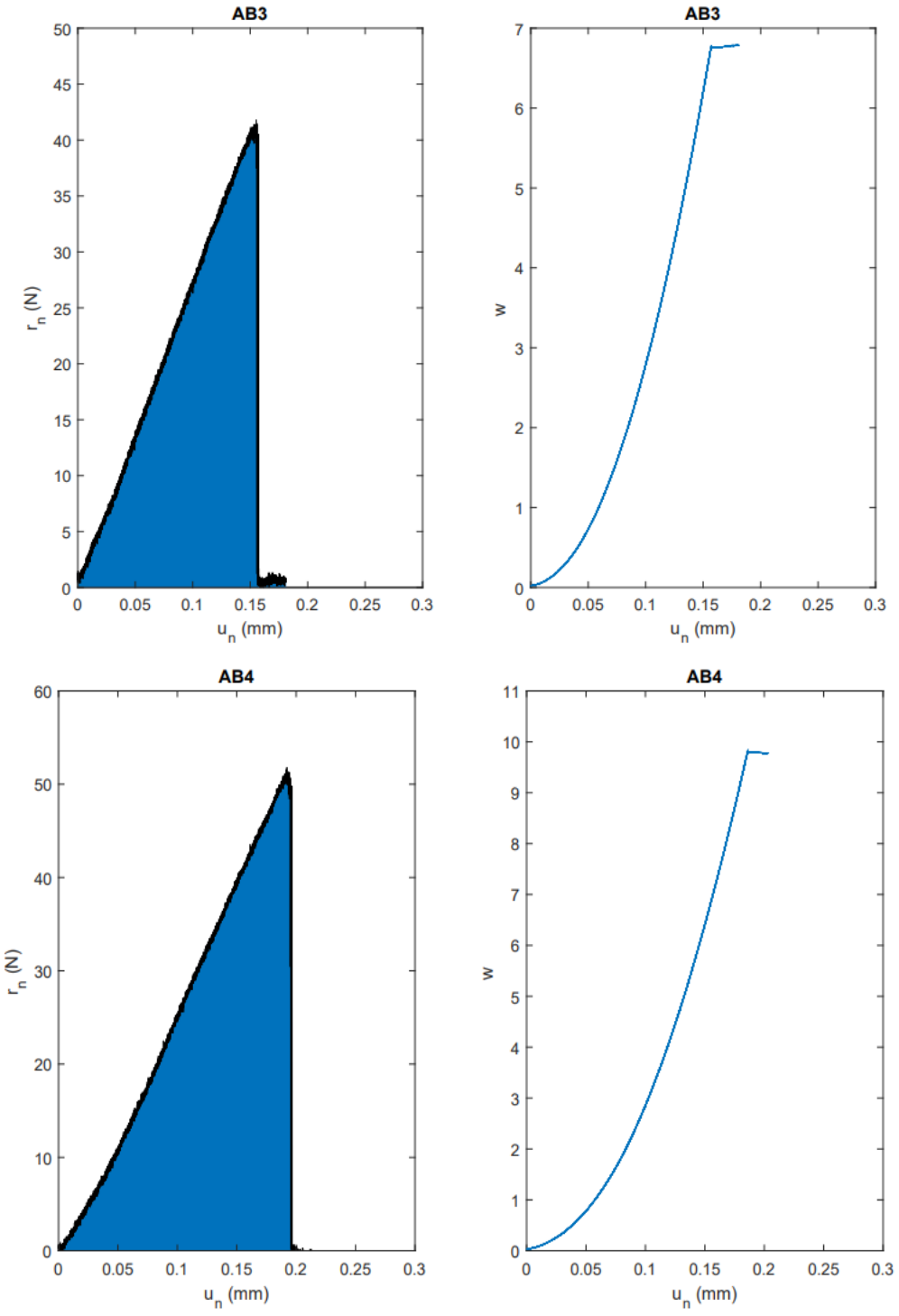
PL8

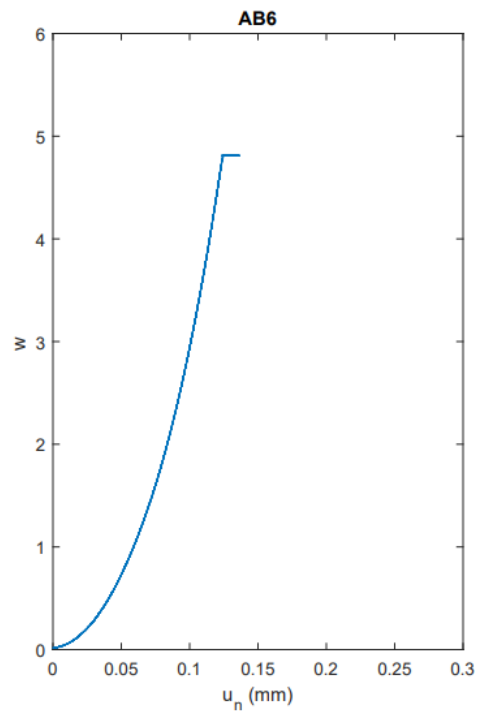
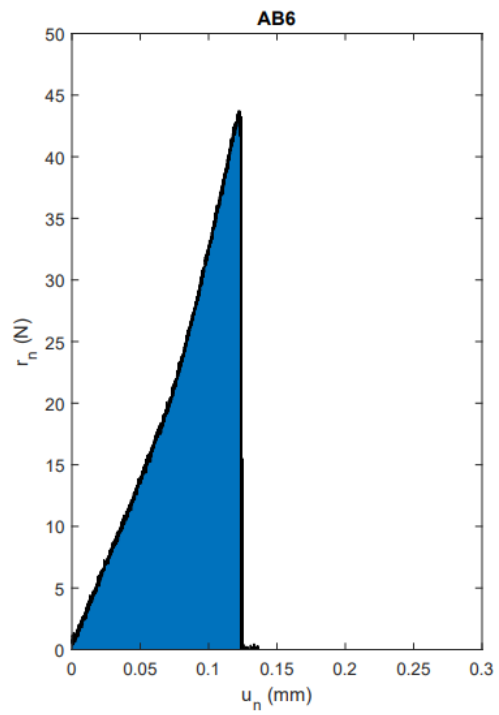
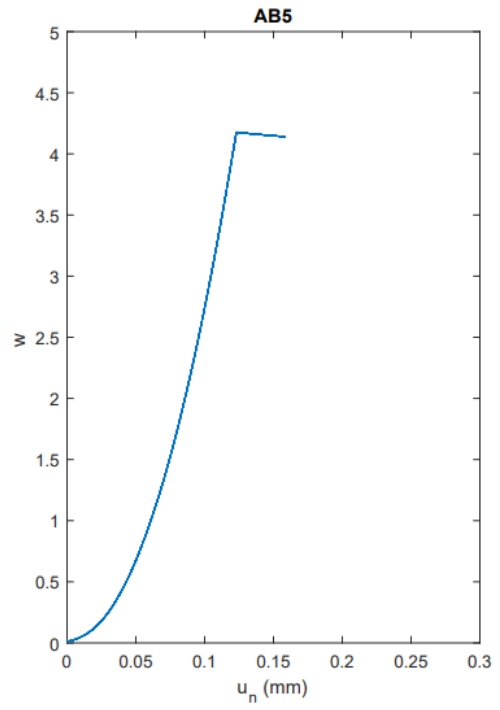
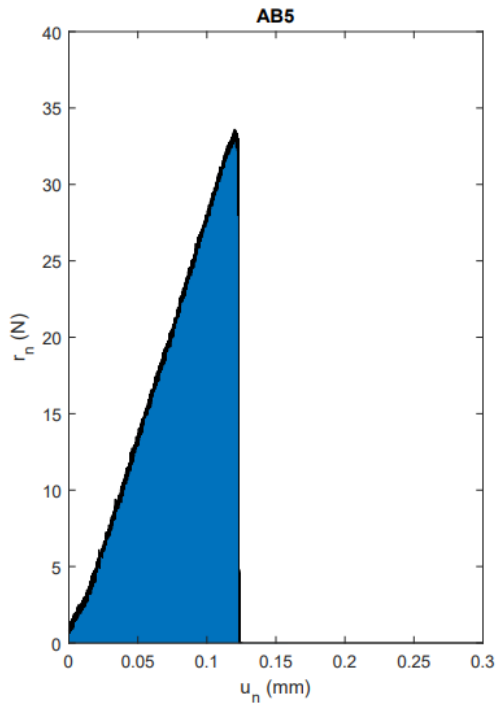


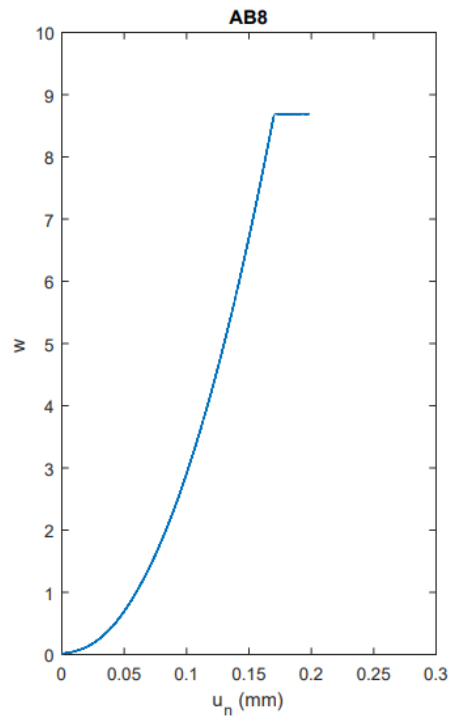
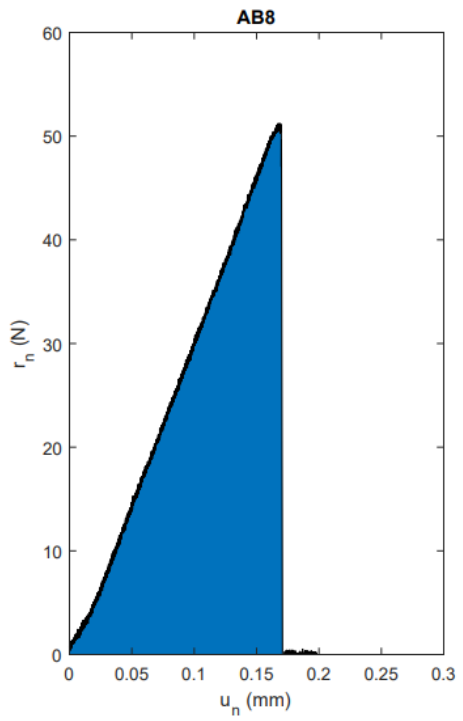
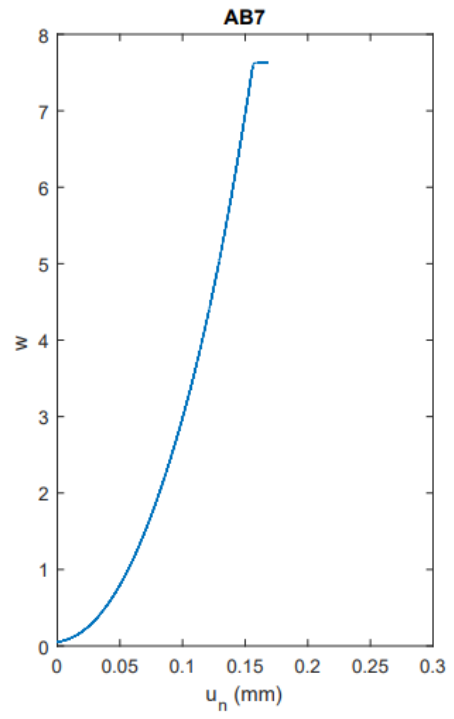
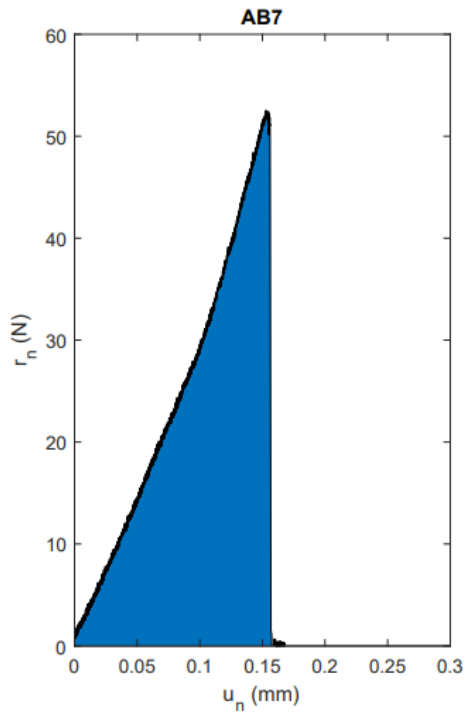
PL9

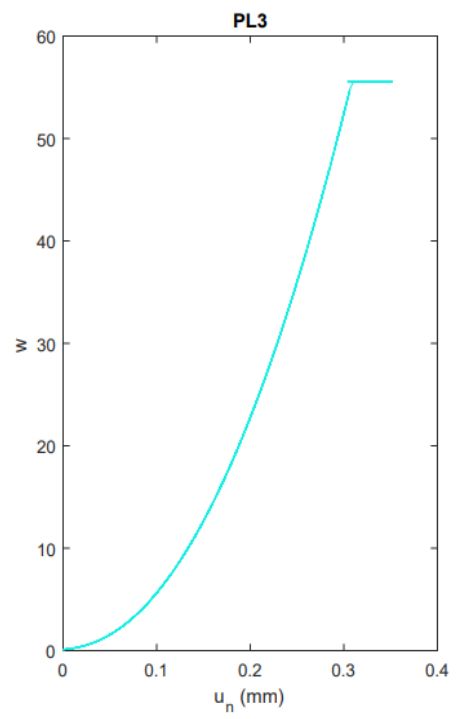
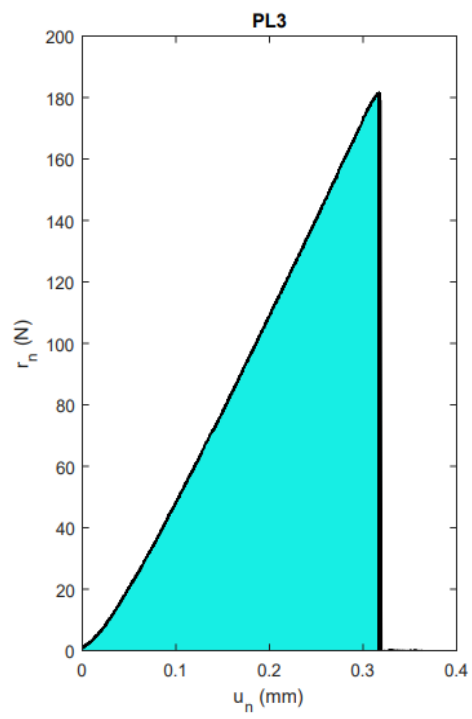
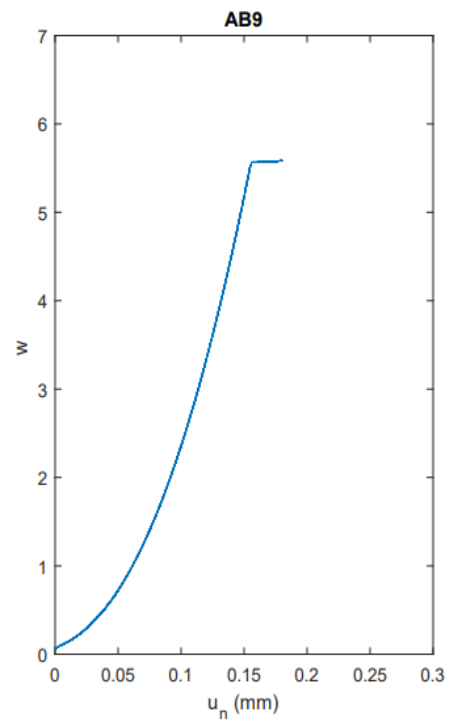
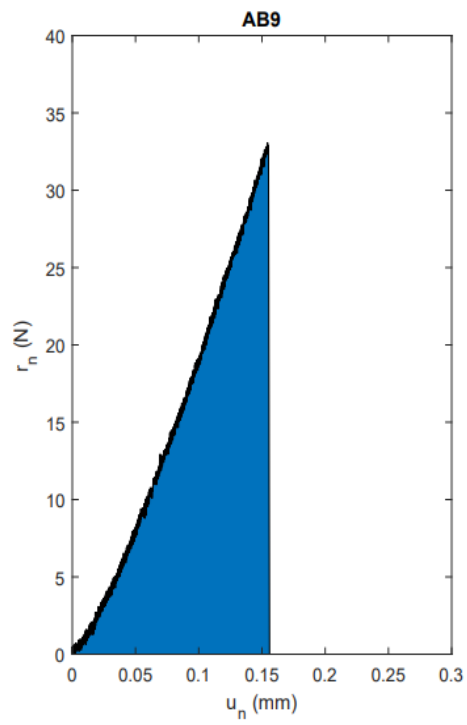


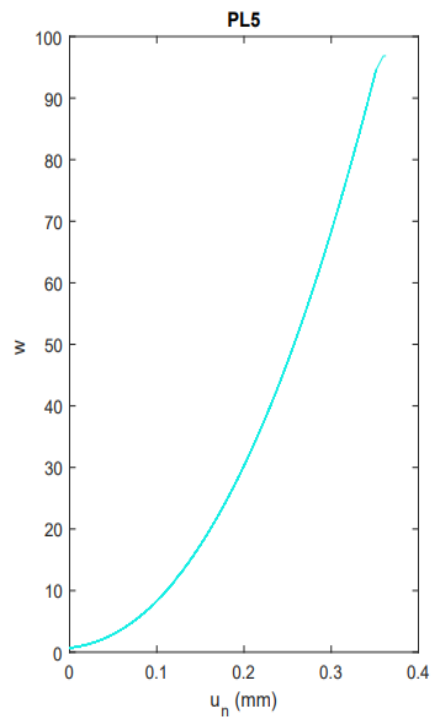
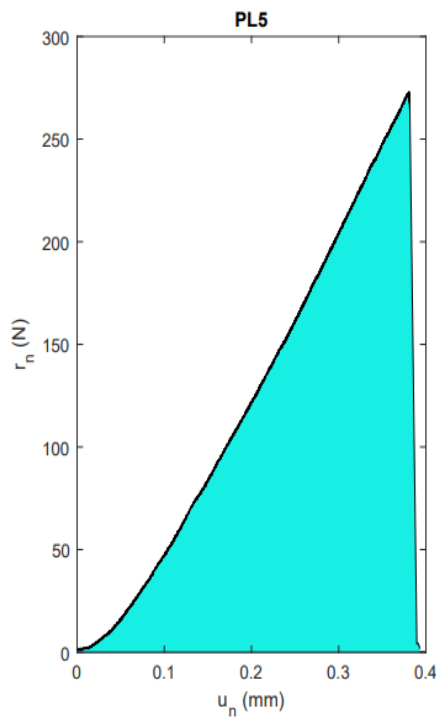
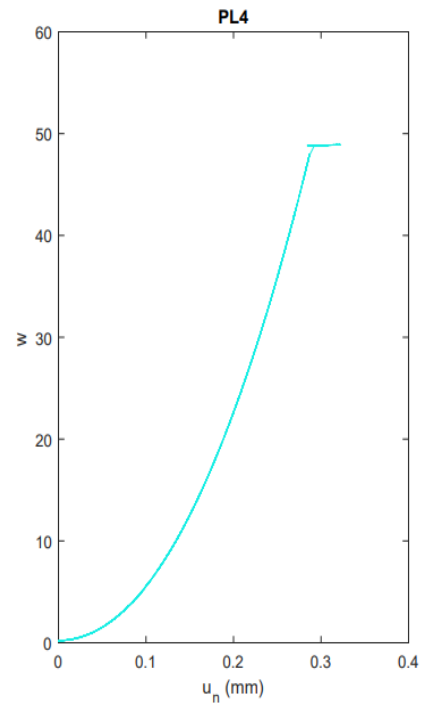
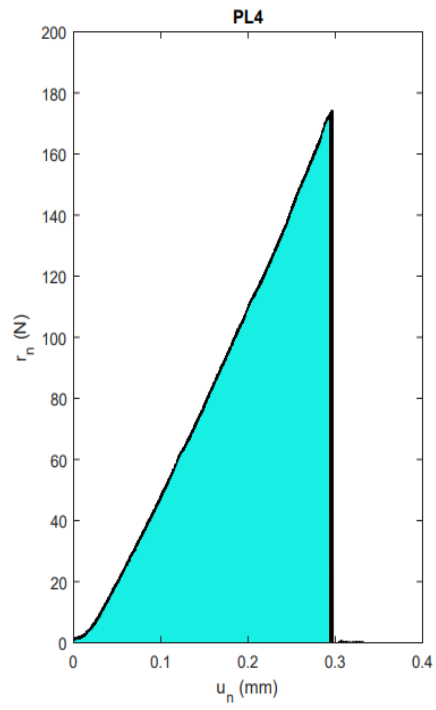
Anexo C. Energía de decohesión (w) para las juntas Acero/ABS y Acero/PLA

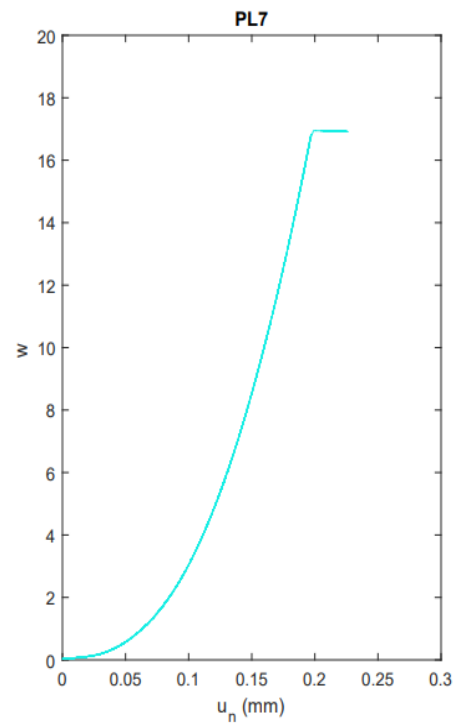
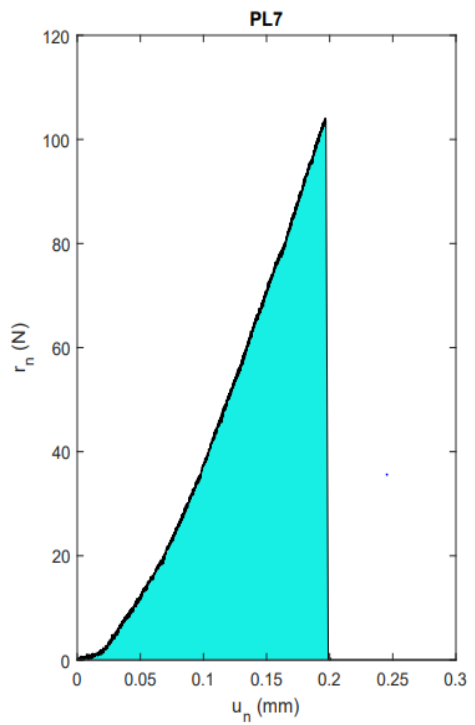
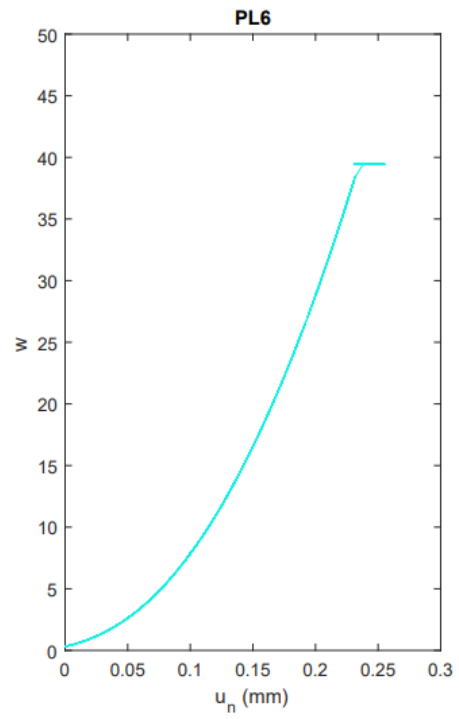
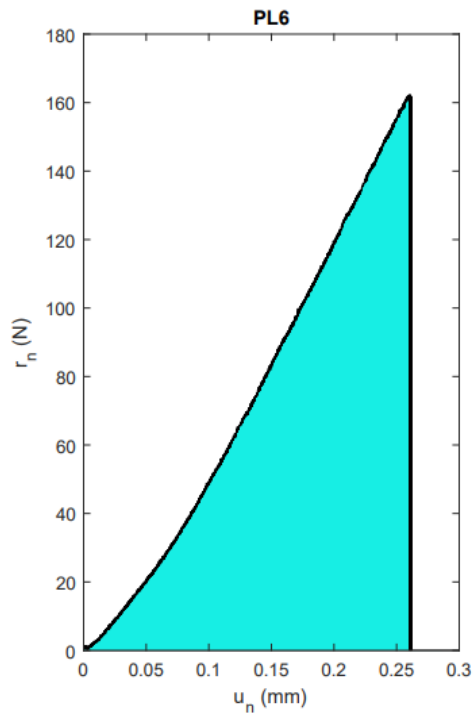


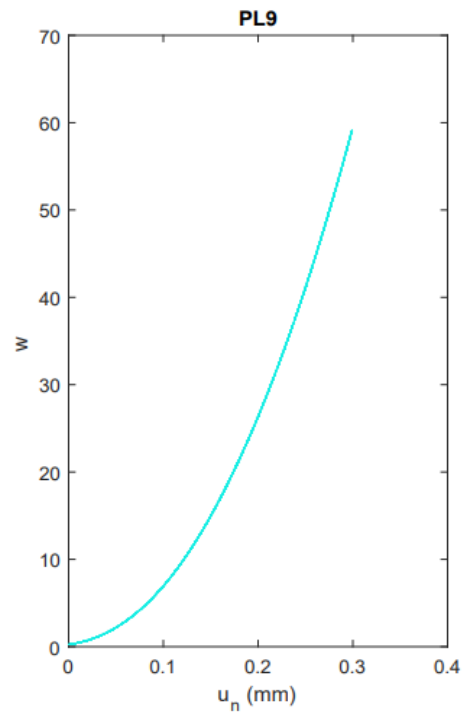
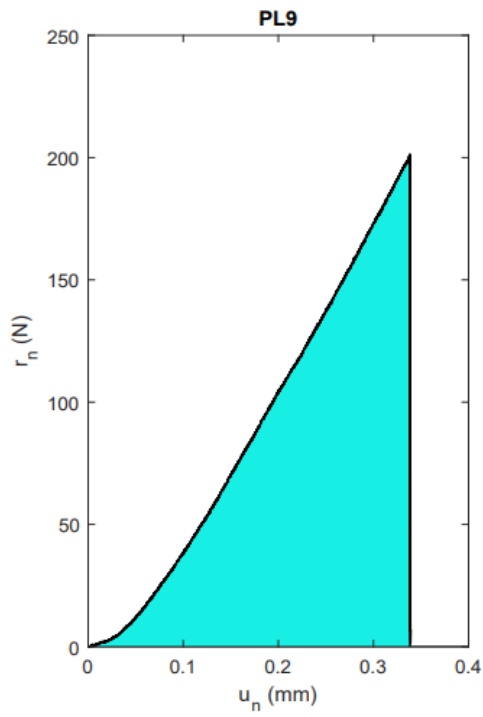
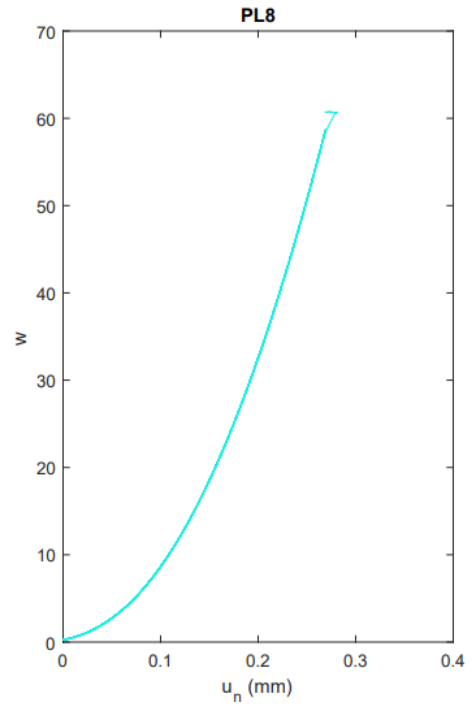
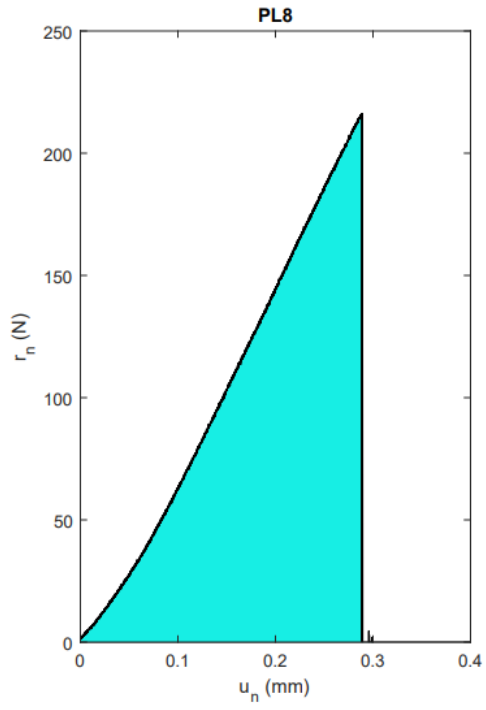












Anexo D. Rigidez (Cn) para las juntas Acero/ABS y Acero/PLA

