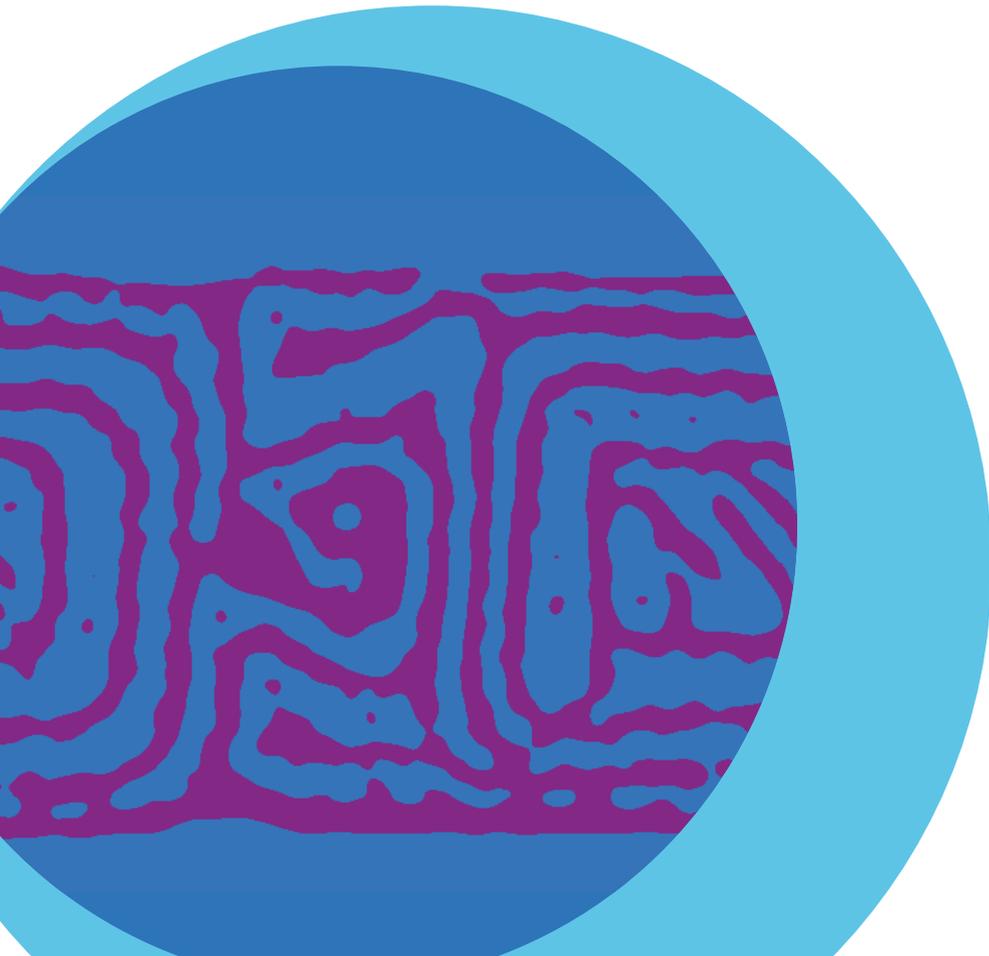


COLECCIÓN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO PARA TODOS

Estudio experimental y optimización de juntas pegadas de piezas impresas en 3D, con interfaz de superficie entrelazada

ERWIN ALFREDO MOLINO ÁLVAREZ
SERGIO ANDRÉS QUINTANA GONZÁLEZ
LUIS LISANDRO LÓPEZ TABORDA
ENRIQUE ESTEBAN NIEBLES NUÑEZ



COLECCIÓN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO PARA TODOS

Estudio experimental y optimización de juntas pegadas de piezas impresas en 3D con interfaz de superficie entrelazada

ERWIN ALFREDO MOLINO ÁLVAREZ

SERGIO ANDRÉS QUINTANA GONZÁLEZ

LUIS LISANDRO LÓPEZ TABORDA

ENRIQUE ESTEBAN NIEBLES NÚÑEZ



Sello Editorial

UNIVERSIDAD
DEL ATLÁNTICO

Molino Álvarez, Erwin Alfredo -- Quintana González, Sergio Andrés -- López Taborda, Luis Lisandro -- Niebles Nuñez, Enrique Esteban.

Estudio experimental y optimización de juntas pegadas de piezas impresas en 3D con interfaz de superficie entrelazada / Erwin Alfredo Molino Álvarez, Sergio Andrés Quintana González, López Taborda, Luis Lisandro, Enrique Esteban Niebles Nuñez. – 1 edición. – Puerto Colombia, Colombia: Sello Editorial Universidad del Atlántico, 2020.

Colección Investigación y desarrollo para todos

Ilustraciones. Incluye bibliografía

ISBN: 978-958-5131-79-8 (Digital descargable)

1. Impresión digital -- investigaciones. 2. Creación rápida de prototipos -- investigaciones. 3. Juntas adhesivas -- investigaciones. I. Autor. II. Título.

CDD: 001.4 E82



Sello Editorial
UNIVERSIDAD
DEL ATLÁNTICO

www.unitlantico.edu.co
Kilómetro 7, Antigua Vía a Puerto Colombia.
Barranquilla, Colombia.

© 2020, Sello Editorial Universidad del Atlántico.
ISBN 978-958-5131-79-8

Coordinación editorial
Sonia Ethel Durán.

Asistencia editorial
Estefanía Calderón Potes.

Diseño y diagramación
Joaquín Camargo Valle.

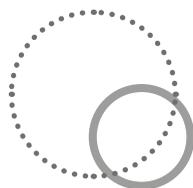
Revisión y corrección
Luis Ramos Palacín.

Impreso y hecho en Barranquilla, Colombia.
Ditar S.A. www.ditar.co
Kilómetro 7, Vía a Juan Mina.
Parque Industrial Clavería.

Printed and made in Barranquilla, Colombia.



Esta obra se publica bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0). Esta licencia permite la distribución, copia y exhibición por terceros de esta obra siempre que se mencione la autoría y procedencia, se realice con fines no comerciales y se mantenga esta nota. Se autoriza también la creación de obras derivadas siempre que mantengan la misma licencia al ser divulgadas.



La presente colección es posible gracias a las siguientes autoridades académicas de la Universidad del Atlántico:

José Rodolfo Henao Gil

Rector

Leonardo Niebles Núñez

Vicerrector de Investigaciones, Extensión y Proyección Social

Danilo Hernández Rodríguez

Vicerrector de Docencia

Mariluz Stevenson

Vicerrectora Financiera

Josefa Cassiani Pérez

Secretaria General

Miguel Caro Candezano

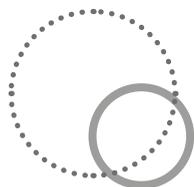
Jefe del Departamento de Investigaciones

Agradecimientos especiales

Facultad de Ingeniería

Decana Yussy Arteta Peña

2020



La colección ***Investigación y desarrollo para todos*** es una iniciativa liderada por la Vicerrectoría de Investigaciones, Extensión y Proyección Social de la Universidad del Atlántico, pensada como herramienta para la divulgación de la investigación y el conocimiento que se genera en el Caribe colombiano.

Contenido

Agradecimientos	13
1. Prefacio	15
1.1 Introducción.....	15
1.2 Objetivos	16
1.3 Origen	17
1.4 Cómo citar este libro.....	17
2. Marco referencial	18
2.1 Impresión 3D y modelado por deposición fundida – FDM.....	18
2.2 ABS como material de aplicación en la técnica FDM	22
2.3 Adhesivos.....	22
2.4 Juntas adhesivas	24
3. Metodología	29
3.1 Selección de la probeta	30
3.2 Velocidad de ensayo	31
3.3 Diseño de experimento	32
3.3.1 <i>Hipótesis</i>	32
3.3.2 <i>Factores experimentales</i>	32
3.3.3 <i>Variable de respuesta</i>	33
3.3.4 <i>Matrices de experimentos</i>	33
3.4 Diseño y fabricación de las probetas.....	38

4. Análisis de resultados.....	41
4.1 Fase experimental 1: selección del adhesivo	41
4.1.1 Fase experimental 1.1: inclinación en probetas con juntas	41
4.1.2 Fase experimental 1.2: probetas sin inclinación	46
4.1.3 Resumen resultado fase 1.2	51
4.2 Fase experimental 2: selección de la geometría de la junta.....	51
4.2.1 Verificación estadística	54
4.2.2 Resumen resultados fase 2	55
4.3 Fase 3: optimización	55
4.3.1 Ascenso pronunciado.....	55
4.3.2 Caracterización, cima de ascenso pronunciado	58
4.3.3 Probeta óptima.....	59
5. Conclusión	63
6. Referencias bibliográficas	65
7. Anexos.....	68
7.1 Diseño de experimento: selección de adhesivo	68
7.1.1 Hipótesis	68
7.1.2 Análisis estadístico	68
7.1.3 Resumen resultados fase selección adhesivo	74
7.2 Diseño de experimento selección: geometría de junta	75
7.2.1 Hipótesis	75
7.2.2 Análisis estadístico	76
7.2.3 Resumen de resultados de caracterización	80
7.3 Diseño de experimento: optimización	80
7.3.1 Análisis estadístico	81
7.3.2 Resumen de resultados probeta óptima	87
7.4 Verificación dimensional	87
Los autores.....	93

Índice de figuras

Figura 1. Esquema de la estereolitografía	19
Figura 2. Sinterizado selectivo por láser.....	19
Figura 3. Modelado por deposición fundida.	20
Figura 4. Promedio de esfuerzo de tensión (Mpa) de cada tipo de adhesivo.....	24
Figura 5. Geometría de juntas entrelazadas.....	25
Figura 6. Probetas con juntas de sutura.....	25
Figura 7. Curvas de carga vs. desplazamiento para probetas con juntas de sutura	26
Figura 8. Valores de esfuerzo de tensión para las juntas PC/PC, PC/Glass, COP/COP.....	27
Figura 9. Probeta tipo III (W , ancho de la sección estrecha; WO , ancho total; L , longitud de la sección estrecha; LO , longitud total; R , radio de filete; G , longitud de calibración; D , distancia entre mordazas.).....	31
Figura 10. Impresora Prusa I3 Mk2.....	39
Figura 11. Probetas macho y hembra, junta cilíndrica y junta trapezoidal. Geometría junta trapezoidal (a , ancho; l , longitud; h , altura; β , inclinación); geometría junta cilíndrica (r , radio; h , altura). .	40
Figura 13. Mejora del proceso de curado (a , proceso con presencia de la variable de inclinación; b , proceso sin presencia de la variable de inclinación).	42
Figura 14. Distancia entre fuerzas en ensayo de tensión.	43
Figura 15. Esfuerzo último vs. inclinación en probetas con juntas trapezoidales (probetas 1-6), barras de desviación estándar.....	44
Figura 16. Fallas de las probetas con inclinación.	45
Figura 17. Proceso de fallas de probetas con junta para selección de adhesivo, ensayadas a tensión (a , inicio de ensayo de tensión; b , falla inicial; c , falla final).	48
Figura 18. Esfuerzo vs. desplazamiento de probetas con juntas (N_d , eficiencia de la junta al esfuerzo de diseño; N_u , eficiencia la junta al esfuerzo último).	49
Figura 19. Ascenso pronunciado altura ascendente.	57
Figura 20. Datos atípicos con límites sigma de la geometría cilíndrica.....	78

Índice de tablas

Tabla 1. Esfuerzos de tensión para probetas impresas en orientación XY.	21
Tabla 2. Características del ABS eSun.	22
Tabla 3. Velocidades de ensayo.....	32
Tabla 4. Factores presentes en el estudio experimental.....	33
Tabla 5. Matriz de datos del diseño para la obtención del esfuerzo último promedio para probetas.	34
Tabla 6. Matriz de datos del diseño para la selección del adhesivo (probetas con juntas).....	34
Tabla 7. Matriz de datos del diseño para selección de junta (junta cilíndrica).....	35
Tabla 8. Matriz de datos del diseño para selección junta (junta trapezoidal).	36
Tabla 9. Matriz de ascenso pronunciado (junta cilíndrica).	37
Tabla 10. Matriz de caracterización de la cima (junta cilíndrica).	37
Tabla 11. Matriz experimentación probetas con junta optimizada.	38
Tabla 12. Parámetros de impresión.....	39
Tabla 13. Datos de esfuerzo último a tensión e inclinación en probetas con junta trapezoidal para experimento de la selección de adhesivo.....	42
Tabla 14. Tabla ANOVA para esfuerzo último a tensión por tipo de pegamento e inclinación	46
Tabla 15. Aumento porcentual de los esfuerzos últimos a tensión.....	47
Tabla 16. Esfuerzos de diseño y último.	47
Tabla 17. Eficiencias promedio de probetas con junta	50
Tabla 18. Tabla ANOVA para esfuerzo último a tensión por tipo de pegamento.....	50
Tabla 19. Esfuerzo último y de diseño a tensión (junta trapezoidal)...	52
Tabla 20. Esfuerzo último y de diseño a tensión (junta cilíndrica).	53

Tabla 21. Esfuerzo último y de diseño (ascenso pronunciado).	56
Tabla 22. Esfuerzo último y de diseño, caracterización de la cima del ascenso pronunciado.	58
Tabla 23. Modo de falla (adhesivo).	59
Tabla 24. Esfuerzo último y de diseño (probetas óptimas).	60
Tabla 25. Eficiencias promedio de probetas con junta.	61
Tabla 26. ANOVA esfuerzo último (probetas óptimas).	61
Tabla 27. ANOVA esfuerzo de diseño (probetas óptimas).	62
Tabla 28. Datos de esfuerzo último a tensión en probetas para la selección de adhesivo.	68
Tabla 29. Datos de esfuerzo último a tensión e inclinación en probetas para la selección de adhesivo.	69
Tabla 30. Tabla ANOVA para esfuerzo último a tensión por tipo de pegamento e inclinación.	69
Tabla 31. Medias y error estándar para esfuerzo último a tensión por tipo de adhesivo e inclinación.	70
Tabla 32. Coeficientes del modelo de regresión.	71
Tabla 33. Datos de esfuerzo último a tensión e inclinación en probetas para la selección de adhesivo.	72
Tabla 34. ANOVA para esfuerzo último a tensión por tipo de pegamento.	73
Tabla 35. Medias por mínimos cuadrados para esfuerzo último a tensión con intervalos de confianza del 95.0%.	74
Tabla 36. Aumento porcentual de los esfuerzos últimos a tensión.	75
Tabla 37. Esfuerzos últimos a tensión (junta trapezoidal).	76
Tabla 38. Esfuerzos últimos a tensión (junta cilíndrica).	77
Tabla 39. Resumen estadístico valor atípico (geometría cilíndrica).	77
Tabla 40. ANOVA comparación de geometrías de juntas (esfuerzo último).	78
Tabla 41. ANOVA comparación de geometrías de juntas (esfuerzo de diseño).	79
Tabla 42. Resumen estadístico comparación de medias.	79
Tabla 43. Puntos para ascenso pronunciado.	81
Tabla 44. Esfuerzo último y de diseño (ascenso pronunciado).	82
Tabla 45. ANOVA ascenso pronunciado (esfuerzo último).	82

Tabla 46. ANOVA ascenso pronunciado (esfuerzo de diseño).	83
Tabla 47. Resumen estadístico comparación de medias.	83
Tabla 48. Esfuerzo último y de diseño (caracterización de la cima del ascenso pronunciado).	84
Tabla 49. ANOVA caracterización de la cima del ascenso pronunciado.	85
Tabla 50. Esfuerzo último y de diseño, probetas óptimas.	85
Tabla 51. ANOVA esfuerzo último (probetas óptimas).	86
Tabla 52. ANOVA esfuerzo de diseño (probetas óptimas).	86
Tabla 53. Resumen estadístico comparación de medias (probetas óptimas).	87
Tabla 54. Dimensiones probetas base.	88
Tabla 55. Dimensiones de probetas con junta trapezoidal (experimento de selección de adhesivo).	88
Tabla 56. Dimensiones de probetas con juntas cilíndricas (experimento de selección de adhesivo).	89
Tabla 57. Dimensiones de probetas con junta trapezoidal para el experimento de selección de geometría de la junta.	89
Tabla 58. Dimensiones de probetas con juntas cilíndricas para el experimento de selección de geometría de la junta.	90
Tabla 59. Dimensiones de probetas con juntas cilíndricas (ascenso pronunciado).	91
Tabla 60. Dimensiones de probetas con junta cilíndrica (caracterización de la cima del ascenso pronunciado).	91
Tabla 61. Dimensiones de probetas óptimas.	92

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecerte a ti, Padre Celestial, por permitirnos alcanzar esta meta, por darnos siempre la fortaleza para salir victoriosos ante cada reto y luchar día a día hasta lograr nuestros sueños. Gracias, asimismo, a nuestros padres, Jhon Quintana y Elguis Molino; y a nuestras madres, Gladys González y Stella Álvarez. Les agradecemos por ser nuestras guías y estar siempre a nuestro lado, dándonos aliento para seguir adelante, pero también por ser los principales patrocinadores económicos de nuestra carrera. Gracias a mi hermano Yeison Quintana por sus consejos acertados en esos momentos en que más los necesité. En general, mi gratitud para toda la familia.

Quiero, además, hacer una mención especial a nuestros directores, los ingenieros Luis López Taborda y Enrique Niebles, por su gran aporte, su atención y disposición en todo momento para atendernos y guiar la realización de este proyecto. Por supuesto, gracias a nuestros profesores por su acompañamiento durante nuestro período académico y por sembrar en nosotros el deseo de convertirnos en mejores seres humanos. Gracias a todos nuestros compañeros de estudio por todos esos buenos momentos, y a los demás compañeros de la tribu por sus consejos alentadores. Te agradezco a ti, María Camila, por estar conmigo en las buenas y en las malas, y por ser ese apoyo constante en cada etapa de esta hermosa carrera. Dios te bendiga siempre. Finalmente, a la Uniatlántico: gracias.

SERGIO QUINTANA GONZÁLEZ

Gracias al programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Atlántico por permitirnos ser parte de su familia. Al ingeniero Luis López Taborda por aceptar ser nuestro tutor, por su esfuerzo, dedicación, su constante guía en la elaboración del trabajo y todo el conocimiento y consejos brindados para la construcción de un verdadero perfil profesional con miras a la investigación. Al ingeniero Enrique Niebles Núñez por su asistencia y gran ayuda a la hora de dar inicio al proyecto y por facilitarnos su elaboración. También, toda mi gratitud hacia las familias Molino Álvarez y Quintana González por el constante y persistente apoyo moral y económico.

ERWIN MOLINO ÁLVAREZ

1. Prefacio

1.1 Introducción

La impresión en 3D se define como el proceso de fabricar objetos a partir de un modelo digital. Debido a la fácil adquisición de esta tecnología, al bajo costo de producción, a los diseños personalizados y al uso de diferentes materiales como termoplásticos, vidrios y cerámicos, la impresión 3D se ha adaptado en campos de la industria médica, aeroespacial, automotriz, así como en industrias de producción y construcción (Aliheidari, 2017). Existen diferentes procesos de impresión, como la estereolitografía y el sinterizado selectivo por láser, pero uno de los más usados es el modelado por deposición fundida (conocido como FDM por las siglas de su nombre en inglés, "Fused Deposition Modeling"), puesto que es el más económico del mercado y porque, además, todos sus materiales se pueden manipular con las manos, dejan pocos desechos y no requieren un posproceso, todo lo cual hace que esta técnica presente un bajo impacto ambiental.

Las piezas impresas mediante FDM que se utilizan en ingeniería experimentan cargas mecánicas, térmicas o higrotérmicas, por lo que su integridad estructural y su confiabilidad son cruciales a la hora de ser aplicadas en herramientas, electrónica, robótica, biomecánica, sensores y actuadores (Aliheidari, 2017). La impresión 3D está limitada por el volumen de trabajo de la impresora. Por lo tanto, si se requiere una pieza de gran tamaño, se hace necesaria la impresión de varias de ellas, las cuales deberán ser ensambladas posteriormente para así obtener la pieza requerida. La importancia de los ensamblajes es tal que si no se logran obtener propiedades cercanas a las de una estructura sólida, los resultados de la experimentación o uso estas piezas ensambladas no serán los deseados. En distintas aplicaciones ingenieriles es necesaria la utilización de unio-

nes y/o ensambles de diferentes piezas, ya sea por pernos, tornillos, soldadura, adhesivos, etc. Este último tipo de uniones (que son en las que se centra este estudio) son susceptibles de presentar defectos y sufrir separación, especialmente en uniones con una alta área de superposición. Sin embargo, los adhesivos también poseen ventajas, como alta resistencia, bajo peso y resistencia a la corrosión (Heidarpour, 2017; Arenas, 2012; Moya, 2017).

1.2 Objetivos

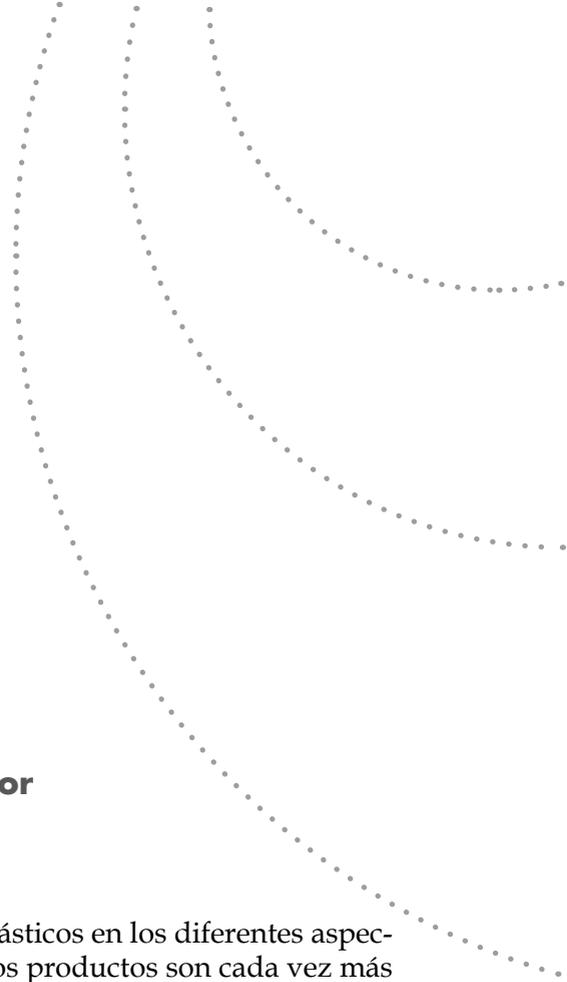
El objetivo general del presente proyecto fue estudiar experimentalmente optimizando juntas pegadas de piezas impresas en 3D con interfaz de superficie entrelazada. De este se desprenden los siguientes objetivos específicos: 1) Diseñar el experimento, técnica y estadísticamente, con el fin de definir los parámetros de entrada, su variación, la salida específica de medición, instrumentación y procedimiento de elaboración; por tanto, este objetivo está enfocado en el diseño de la experimentación de juntas mecánicas-adhesivas, las cuales constan de una junta macho y una hembra que se entrelazan entre sí, y una capa de adhesivo aplicada en todas las áreas de unión. 2) Diseñar y fabricar las probetas con juntas mediante el proceso de deposición fundida aplicando el diseño experimental preliminar para, de esta forma, obtener las probetas con juntas a las cuales se les realizarán las mediciones. Por medio de SolidWorks®, se diseñó un conjunto de probetas con y sin juntas, las cuales serán impresas con la ayuda de la empresa colombiana 3D Ingeniería BQ S. A. S., siguiendo la norma ASTM D638-03, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic" (ASTM, 2014). Realizar los ensayos mecánicos y mediciones geométricas de las probetas de acuerdo con la norma ASTM D638, con el fin de conseguir los resultados a analizar. Se realizaron ensayos de tensión a las piezas impresas para obtener valores de resistencia a tensión. 4) Analizar estadísticamente los resultados obtenidos para comparar la influencia de la variación de los parámetros de entrada en los valores finales de cada pieza. Se analizaron y compararon los resultados extraídos, lo cual permitió determinar la eficiencia de las probetas con juntas teniendo en cuenta su resistencia a tensión. Asimismo, se propusieron mejoras a dichas juntas con el objetivo de lograr valores cercanos a los de referencia (valores obtenidos del ensayo a tensión de probeta sin junta).

1.3 Origen

Este libro es producto de los resultados del proyecto de investigación conjunto realizado entre investigadores y estudiantes del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Atlántico, e investigadores y personal de apoyo del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma del Caribe. Es motivado por la amplia aplicabilidad de la impresión 3D en el campo de la ciencia y la industria, donde algunas componentes usadas en el desarrollo de nuevas tecnologías necesitan ser impresas en distintas piezas debido a su tamaño. Por lo tanto, la importancia de los prototipos es tal que si no se logran obtener propiedades cercanas a las de una estructura sólida al momento de realizar el ensamble de cada pieza por medio de juntas, los resultados de la experimentación con estos prototipos no serán confiables.

1.4 Cómo citar este libro.

A continuación, se especifica la forma como debe ser citado este libro: Molino, E. A., Quintana, S. A., López, L. L. y Niebles, E. E. (2020). *Estudio experimental y optimización de juntas pegadas de piezas impresas en 3D con interfaz de superficie entrelazada*. Barranquilla, Colombia: Sello Editorial Universidad del Atlántico.



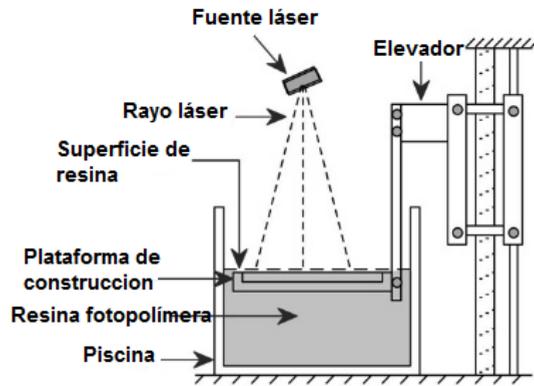
2. Marco referencial

2.1 Impresión 3D y modelado por deposición fundida - FDM

El crecimiento del uso de los productos plásticos en los diferentes aspectos de nuestra sociedad no se detiene. Estos productos son cada vez más complejos y exigen un mayor nivel de diseño, que implique tanto los aspectos del diseño mecánico para el rendimiento del producto como la estética del producto final (Baun, 1984). Lo mencionado anteriormente contribuyó al estudio de diferentes procesos y a la aparición de la impresión 3D y su uso en la ingeniería.

El proceso utilizado para materializar directamente los datos del diseño 3D asistido por computadora (CAD) se conoce como impresión 3D. Existen numerosas técnicas de este tipo de impresión para la fabricación de piezas funcionales en las áreas de ingeniería y medicina, (Pham, 1998); por ejemplo, la estereolitografía, que consiste básicamente en la creación, capa a capa, de una pieza mediante la aplicación de una fuente luminosa sobre una resina que reacciona a esta. La resina se polimeriza y pasa de líquida a sólida; luego, la plataforma de construcción deja un distancia entre ella y la superficie, con un espesor de capa predefinido que se rellena con resina líquida, la cual es expuesta a la fuente de luz para el curado de la capa. Este proceso se repite por capas hasta obtener la pieza deseada (Sanoa, 2018).

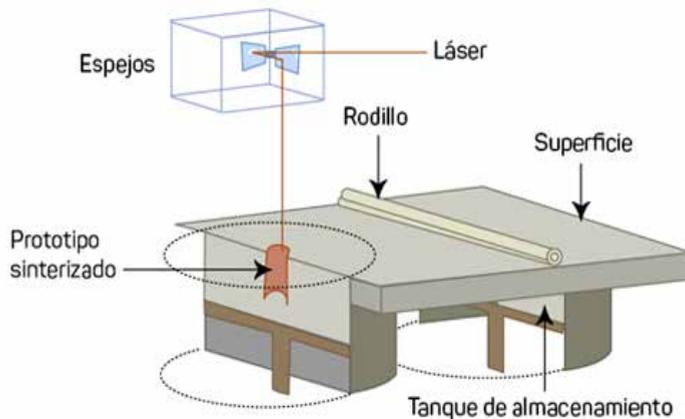
Figura 1. Esquema de la estereolitografía.



(Slideshare, s. f.)

Otra técnica empleada en la impresión 3D es el sinterizado selectivo por láser (SLS por las siglas de su nombre en inglés, "Selective Laser Sintering"), técnica que consiste principalmente en una impresión capa por capa a partir de polvos que se fusionan debido a la temperatura generada por un láser CO_2 (Danezan, 2017).

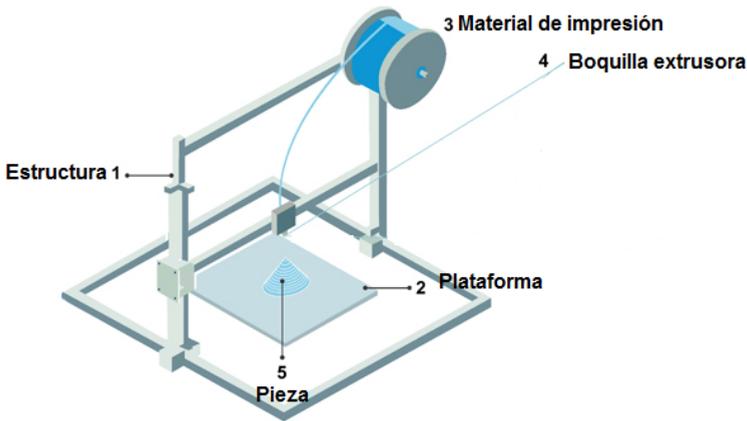
Figura 2. Sinterizado selectivo por láser.



(La fábrica de inventos, s. f.)

Estas técnicas, en su mayoría, consisten en dividir un modelo CAD en diversas capas 2D y en empezar a construir capa por capa para finalmente obtener como resultado el prototipo que se desea (Dawoud, 2016) El modelado por deposición fundida (FDM por las siglas de su nombre en inglés, "Fused Deposition Modeling") es de los más empleados (Kumar, 2010). En este tipo de técnica se funden los filamentos del material a través de una boquilla precalentada, lo que provoca que, por deposición, el material se deposite en una plataforma de construcción; la impresora maneja, aquí, un procedimiento de movimiento de tres ejes; la boquilla se mueve primeramente en el plano XY, imprimiendo una capa del prototipo deseado; una vez terminada esta capa, la plataforma de construcción se mueve un paso hacia abajo (este paso es conocido como grosor de corte) en orientación del eje Z, y así repetidamente hasta lograr el prototipo deseado (Pham, 1998).

Figura 3. Modelado por deposición fundida.



(Trimaker, s. f.)

Comparada con otras técnicas como la estereolitografía y el SLS, el FDM implica menor costo puesto que las impresoras utilizadas para esta técnica son las más económicas del mercado; además, todos sus materiales se pueden manipular con las manos, dejan pocos desechos y no requieren un postproceso. De la misma forma, en comparación con otros modelos de fabricación, como tecnologías de mecanizado y moldeado, el proceso

de impresión 3D por la técnica FDM es sumamente ventajoso gracias a que en él no se precisa el uso de moldes ni de herramientas de corte y/o sustracción de material costosas. Es importante resaltar lo anterior, porque en estos procesos se suele utilizar más material del necesario para lograr la pieza y acabados deseados. Otra ventaja ofrecida por esta técnica está en sus aplicaciones, ya que permite la creación de productos personalizados en masa: se usa para piezas de repuestos en el campo médico, odontológico, aeroespacial; también en el sector automotor, diseño, arquitectura, diversión, decoración y arte, principalmente para aplicaciones de validación de modelos visuales y/o partes funcionales. Pero, así como la técnica FDM brinda muchas ventajas, también ofrece ciertas desventajas: el acabado superficial es rugoso y el proceso es lento si se requiere una pieza de amplio volumen; también hay desventajas en la resistencia mecánica, en vista de que es necesario conocer los esfuerzos a los que se someterán las piezas para evitar coordenadas de impresión que faciliten la separación de las capas.

Para el ABS y los demás tipos de materiales usados en la técnica FDM, la resistencia a la tensión varía de acuerdo con los parámetros de impresión, temperatura de extrusión, temperatura de la placa, velocidad de impresión, orientación, relleno y la altura de capa. Se han realizado diferentes estudios experimentales acerca de estos parámetros de impresión.

Abbot et al. (2018), para una velocidad de impresión de 50 mm/s, obtuvieron los resultados relacionados en la Tabla 1.

Tabla 1. Esfuerzos de tensión para probetas impresas en orientación XY.

T (°C)	Velocidad de impresión (mm/s)	Altura de capa (mm)	Orientación	Esfuerzo a tensión (Mpa)
230	50	0.1	XY	10.2 ± 1.2
230	50	0.3	XY	16.8 ± 1.2
270	50	0.1	XY	15.1 ± 0.2
270	50	0.3	XY	22.8 ± 2.3

(Abbot et al., 2018).

2.2 ABS como material de aplicación en la técnica FDM

El ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) es uno de los materiales polímeros más usados en el mundo de la FDM, gracias a que es amorfo, duradero, resistente y tiene una excelente capacidad de impresión. Las características de este material se pueden observar en la Tabla 2. Debido a sus propiedades, el ABS es empleado en diferentes industrias; en la automotriz, por ejemplo, se usa para partes cromadas, partes internas y en cascos de motociclistas; en electrónica, para carcasas de televisores, consolas de videojuegos y ordenadores e impresoras 3D.

Tabla 2. Características del ABS eSun.

Características	ABS
Densidad	1.05 g/cm ³
Resistencia a la tensión	43 Mpa
Temperatura de distorsión	78 °C
Elongación de rotura	0.22%

(eSun, s.f.)

El ABS se puede mecanizar, lijar, limar, agujerear, pintar, pegar, etc., de forma muy fácil, y el acabado superficial continúa siendo bueno (Aliheidari, 2017; Arenas, 2012; Abbot et al., 2018). Además de su resistencia, posee flexibilidad; todo esto hace que sea un material idóneo y versátil para aplicaciones ingenieriles. Sin embargo, en lo que respecta a grandes piezas, su uso se encuentra limitado por el volumen de trabajo de la impresora, razón por la cual se hace necesaria la utilización de diferentes formas de uniones o ensambles.

2.3 Adhesivos

Los adhesivos son definidos como sustancias químicas aplicadas entre las superficies de materiales con el fin de lograr la unión resistente de los mismos e imposibilitar su separación (Real Academia Española, s. f. a). Como factores primordiales para una buena unión intervienen, además del tipo de material a unir, la geometría de este y las superficies, y la cohesión y adhesión del adhesivo aplicado, entendiendo *cohesión* como

la propiedad de un sellante, solicitado a tracción, de mantenerse unido por atracción intermolecular (Real Academia Española, s.f. b), y *adhesión* como la unión íntima de superficies bajo tensiones de compresión por formación de enlaces (Real Academia Española, s.f. c). Ante la falta de alguno de estos factores, se obtendrá como resultado una unión deficiente que redundará en fallas y en la no confiabilidad del ensamble o unión realizada.

Para las uniones, el empleo de adhesivos tiene amplias ventajas sobre otros métodos de fijación como el atornillado, soldadura y/o sujeción mecánica, los cuales implican remoción de material, corrosión, etc. Las ventajas son el ofrecimiento de un exterior suave, la buena distribución de la carga y la facilidad para unir materiales delgados o diferentes. Por estas razones, el uso de los adhesivos en las uniones estructurales está en constante desarrollo y crecimiento, hallando permanentemente nuevas y diversas aplicaciones (Adams, 1997).

Existen diferentes adhesivos idóneos para juntas en ABS; por ejemplo, acrílico, poliuretano, cianoacrilato, epóxido y silicona. Arenas (2012) realizó un estudio experimental de los adhesivos mencionados anteriormente; según los criterios de selección (tecnológico, económico, esfuerzo de la junta, seguridad y salud, ajuste al proceso de FDM), en el estudio se concluye que el adhesivo con mejor porcentaje de utilidad es el poliuretano, con aproximadamente un 28%; sin embargo, el adhesivo que obtuvo mejores resultados en el criterio de esfuerzo a tensión de la junta fue el cianoacrilato, con un esfuerzo promedio de 12.67 Mpa. Ver la Figura 4.

Figura 4. Promedio de esfuerzo de tensión (Mpa) de cada tipo de adhesivo.

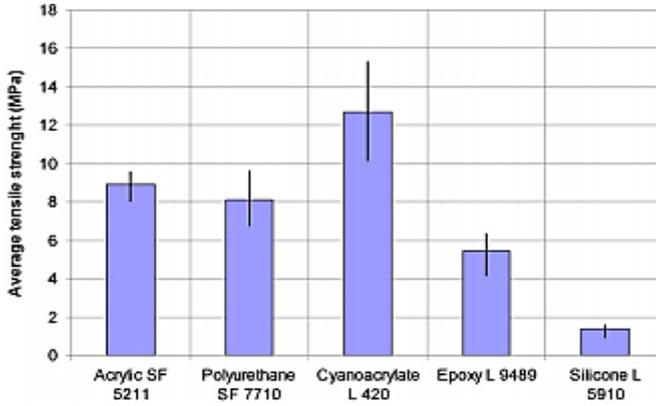


Fig. 5. Average tensile strength (in MPa) of each adhesive type.

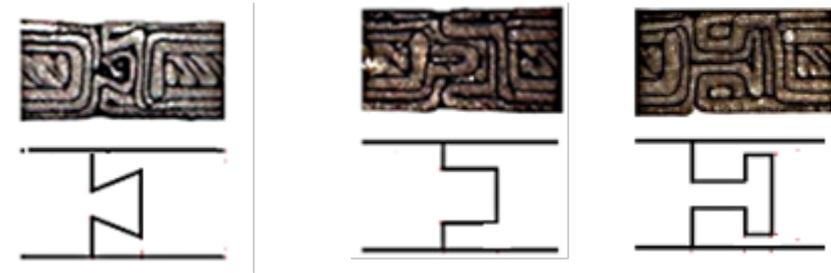
(Arenas, 2012).

2.4 Juntas adhesivas

La utilización de juntas para la unión de estructuras o piezas se hace necesaria en muchas aplicaciones prácticas de ingeniería. A razón de esto, es de suma importancia garantizar que las juntas empleadas sean confiables y tengan un alto grado de seguridad. Asimismo, es preciso conocer el comportamiento de este tipo de uniones sometidas a esfuerzos de tensión.

Para las uniones en las estructuras ingenieriles, es indispensable determinar el esfuerzo y la tensión bajo una cierta carga, así como predecir el potencial de falla. El comportamiento de estos esfuerzos debe ser analizado con el objetivo de conocer la influencia del material, de los diferentes tipos de geometrías de juntas y del adhesivo empleado en la resistencia de dichas uniones. Usando como materiales de impresión ácido poliláctico (PLA) y poliuretano termoplástico (TPU) frente a la necesidad de unir dos materiales de baja compatibilidad (PLA-TPU) y evaluar su comportamiento en comparación con la unión de un material de alta compatibilidad (PLA-PLA), Ribeiro et al. (2018) estudiaron el desempeño mecánico de juntas entrelazadas con geometrías como cola de milano, T y U, según se muestra en la Figura 5. Como resultado, se obtuvo que el tipo de junta con geometría T es la que ofrece mejores propiedades mecánicas.

Figura 5. Geometría de juntas entrelazadas.

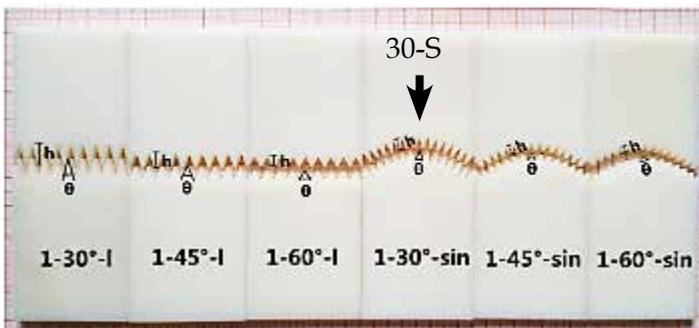


a. Geometría cola de milano b. Geometría U c. Geometría T

(Ribeiro et al., 2018)

Cao et al. (2019), en su estudio, proponen juntas con diferentes configuraciones (véase la Figura 6) usando como material de impresión polímero VeroWhitePlus, y como adhesivo, carboxymethyl cellulose.

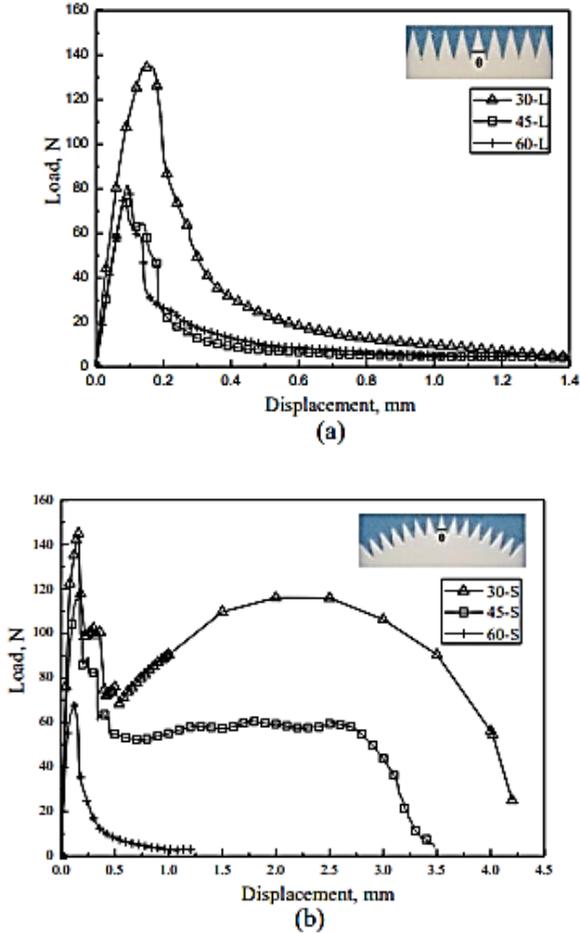
Figura 6. Probetas con juntas de sutura.



(Cao et al., 2019).

De los resultados obtenidos mediante el ensayo de tensión de las juntas propuestas por Cao et al. (2019), se concluye que la junta 30-S tiene mayor eficiencia, con un valor de 2%, en comparación con el esfuerzo último de tensión del material sin junta. Ver la Figura 7.

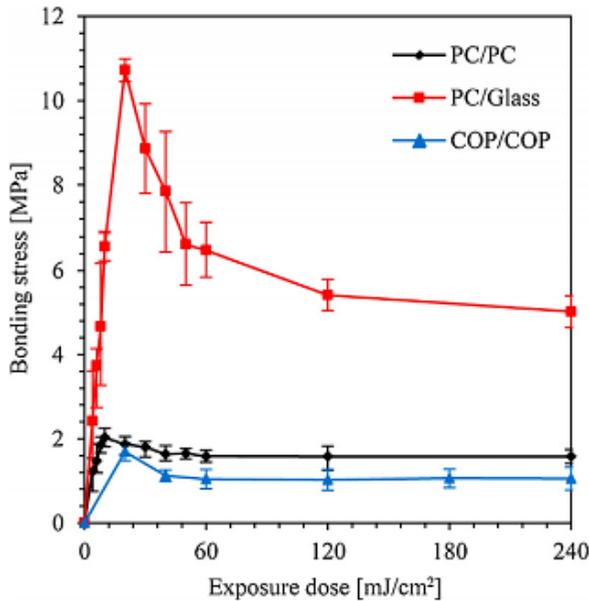
Figura 7. Curvas de carga vs. desplazamiento para probetas con juntas de sutura



Cao et al. (2019).

Hashimoto y Yamamoto (2017) investigaron la unión de copolímeros de olefina cíclica (COP), policarbonato (PC) y vidrio (*Glass*), mediante irradiación ultravioleta al vacío. Los resultados obtenidos en los ensayos de tensión fueron PC/PC = 2.0 Mpa, PC/glass = 10.7 Mpa y COP/COP = 1.7 Mpa, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Valores de esfuerzo de tensión para las juntas PC/PC, PC/Glass, COP/COP.



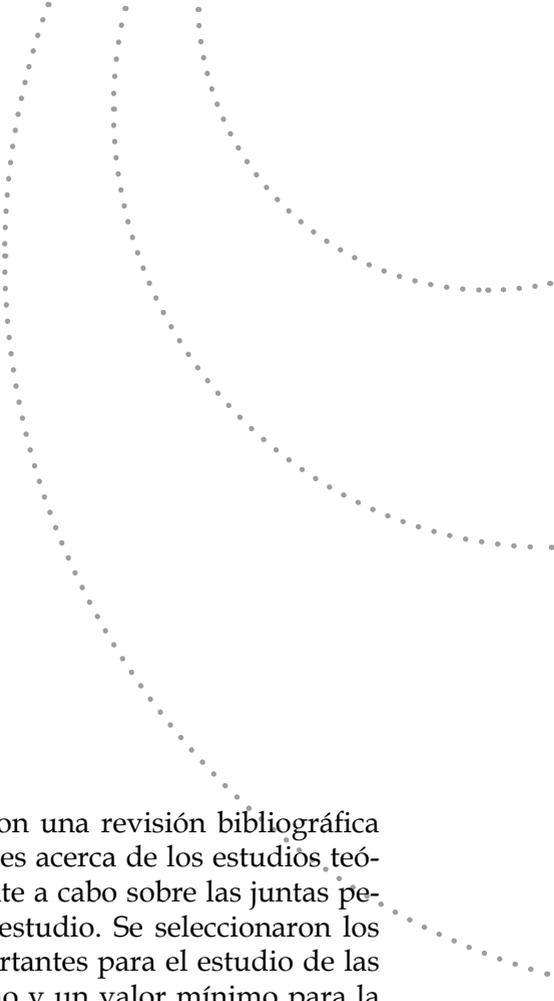
(Hashimoto y Yamamoto, 2017).

Se concluye, pues, que PC/Glass tiene la mayor eficiencia, con un valor de 18%, en comparación con el esfuerzo último de tensión de los otros materiales (Hashimoto y Yamamoto, 2017).

En las juntas superpuestas, la falla inicia normalmente en el adhesivo de las zonas externas de la junta, lo que conlleva a una falla repentina y catastrófica. Además, se ha encontrado, relativamente, una inactividad de carga en la zona central de la junta. Sobre la activación de la zona central de la junta, Corbett et al. (2017) afirman que la incorporación de superficies entrelazadas resultan en una distribución asimétrica del esfuerzo tangencial en la capa de adhesivo, con lo cual se reduce la media de esfuerzo comparado con las juntas superpuestas. En el tipo de juntas superpuestas existe una singularidad elástica en el final de la junta. La extensión de la longitud de solape sobre la cual se extiende la deformación plástica en material adhesivo a cualquier nivel de carga se conoce como el tamaño de la zona de plástica; en vista de que esto se puede convertir en una falla crítica en la junta, se han desarrollado análisis de

elementos finitos con software como NASTRAN (Sahoo, 2017). Para la elección de un adhesivo existen varias pruebas; por ejemplo, la prueba por corte puro. ABAQUS es un software de elementos finitos en el cual se pueden simular este tipo de pruebas para su posterior comparación con las gráficas de esfuerzo-deformación obtenidas experimentalmente (Riccio, 2016).

Como característica clave de este nuevo diseño, se propone un método de construcción mediante el ensamblaje de piezas con juntas de interfaz entrelazadas y adhesivos estructurales. Estas juntas adhesivas deben ser diseñadas específicamente para adaptarse al plástico y a la tecnología de fabricación FDM. Para conseguirlo, se requiere, en primer lugar, la selección del adhesivo estructural más adecuado, es decir, el que mejor conjugué los beneficios mecánicos y la adaptación al proceso de fabricación del FDM (Ahmed, 2017; Arenas, 2012), que es un proceso de manufactura aditiva con un alto porcentaje en esta técnica. La calidad del prototipo es consecuencia directa de distintos parámetros; de ahí que estos se hayan estudiado a través de la técnica de Taguchi (Anitha, 2011). Muchos estudios han sido enfocados en nuevos materiales y en la mejora de las propiedades mecánicas de prototipos fabricados por FDM.



3. Metodología

El estudio experimental realizado inició con una revisión bibliográfica que tenía como objetivo recolectar referentes acerca de los estudios teóricos y experimentales llevados previamente a cabo sobre las juntas pegadas y la impresión 3D en esta área de estudio. Se seleccionaron los parámetros o variables considerados importantes para el estudio de las juntas. Estos oscilan entre un valor máximo y un valor mínimo para la delimitación del experimento (Montgomery, 2016).

Se seleccionó, asimismo, el diseño de experimento, que permitió efectuar el análisis estadístico preliminar y la optimización. Posteriormente, se realizó el diseño previo de la geometría y las dimensiones de la probeta de acuerdo con la norma ASTM D638, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic" (ASTM, 2014), así como el diseño de la probeta con junta.

Este estudio experimental de juntas pegadas de piezas impresas en 3D está dividido en tres fases: en la primera se llevaron a cabo los ensayos de tensión para tres probetas con el fin de obtener el promedio de esfuerzo último a tensión; seguidamente, se realizó un experimento para determinar la elección entre dos tipos de adhesivos para las juntas. En la segunda fase se ejecutaron experimentos para dos tipos de juntas, cilíndrica y trapezoidal, en los cuales las variables son el radio y la altura para la junta cilíndrica; la longitud, el ancho, la altura y la inclinación angular, para la junta trapezoidal. Estas variables se modificaron hasta obtener

las variables con mayor influencia en los resultados obtenidos en los parámetros de salida (fuerza última a tracción, esfuerzo último a tracción y deformación), para en la tercera fase lograr la optimización del tipo de junta con mejores resultados. Lo anterior mediante la teoría de diseño y análisis estadístico de experimento (Montgomery, 2006), con la ayuda del software de análisis estadísticos Statgraphics Centurión®.

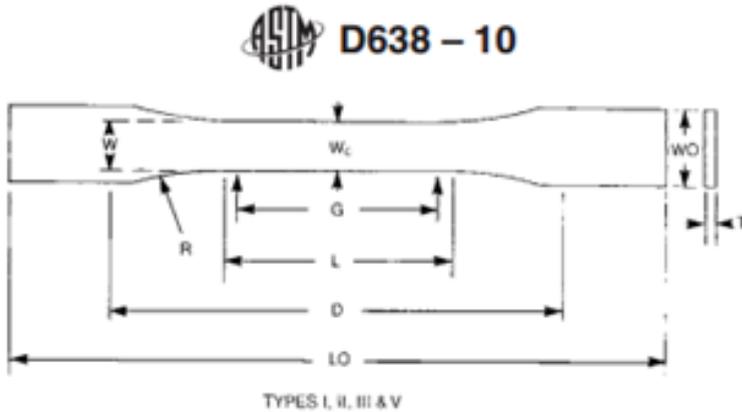
3.1 Selección de la probeta

De acuerdo con la norma ASTM D638-03, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic" (ASTM, 2014), la selección de la probeta depende principalmente del tipo de material a evaluar, su disponibilidad, sus propiedades mecánicas generales, entre otros factores. Los criterios para la elección de esta probeta son especificados a continuación:

1. El tipo de material seleccionado para las probetas de ABS.
2. El espesor de la probeta, debido al dimensionamiento de la geometría de la junta y al requerimiento de aumentar los niveles de fuerza registrada durante el ensayo a fin de favorecer una mejor relación señal-ruido.

Con estos criterios establecidos y el conocimiento de las propiedades generales del material a ser usado, es decir, ABS Esun® (acrilonitrilo butadieno estireno), se escoge la probeta tipo III del estándar.

Figura 9. Probeta tipo III (W, ancho de la sección estrecha; WO, ancho total; L, longitud de la sección estrecha; LO, longitud total; R, radio de filete; G, longitud de calibración; D, distancia entre mordazas.)



Specimen Dimensions for Thickness, T, mm (in.)^A

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
W—Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) ^{B,C}
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02) ^C
WO—Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
LO—Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	+ 3.18 (+ 0.125)
G—Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) ^C
G—Gage length ^J	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) ^C
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)

(ASTM, 2014).

De acuerdo con la norma, el espesor de la probeta puede estar entre los valores de 7 a 14mm. Se selecciona un espesor de 10mm, ya que con este espesor se obtienen las dimensiones de las juntas adecuadas para la experimentación, usando la menor cantidad de material de impresión posible.

3.2 Velocidad de ensayo

Se seleccionó la velocidad de ensayo teniendo en cuenta la norma ASTM D638-03, “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic”, que demanda que se determine la elección de la velocidad de ensayo mediante la especificación del material a ensayar o, en su defecto, por acuerdo de los interesados (ASTM, 2014).

Tabla 3. Velocidades de ensayo.

Clasificación	Tipo de probeta	Velocidad de ensayo, mm/min	Velocidad de deformación nominal al inicio de la prueba, mm/mm
		$5 \pm 25\%$	0.1
Rígidos	III	$50 \pm 10\%$	1
		$500 \pm 10\%$	10

(ASTM, 2014).

En función del adhesivo a experimentar, se usó una velocidad $1.5 \pm 25\%$ mm/min de ensayo; esto permite la obtención de resultados con una mejor resolución para la interpretación del comportamiento de las juntas (Bagherian, 2018; Abbott et al., 2018).

3.3 Diseño de experimento

3.3.1 Hipótesis

La resistencia a la tensión de las juntas mecánico-adhesivas con interfaz de geometría entrelazada es mayor que la de las juntas adhesivas.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Donde μ_1 representa la media de las juntas mecánico-adhesivas y μ_2 la media de las juntas adhesivas.

3.3.2 Factores experimentales

Se realizó una clasificación de los factores experimentales presentes en este estudio. Ver Tabla 4.

Tabla 4. Factores presentes en el estudio experimental.

Tipo de factor	Factor	Descripción
Factores de diseño	Geometría de las juntas	Cilíndrica Rectangular inclinada
	Tipo de adhesivo	Loctite 420 ® Loctite 495 ®
Factores constantes	Material de impresión	ABS Esun ®
	Temperatura de impresión	Temperatura de la placa de impresión Temperatura de la tobera
	Velocidad de impresión	-
	Orientación	XY o
	Altura de capa	Espesor de la capa de impresión
Factores variables	Temperatura ambiente	-
	Humedad del ambiente	-

Autoría propia.

3.3.3 Variable de respuesta

Mediante los ensayos de tensión se obtuvo como variable de respuesta el esfuerzo último de tensión y el esfuerzo en el cual se da la falla inicial, que es llamado esfuerzo de diseño.

3.3.4 Matrices de experimentos

De forma preliminar, se realizaron ensayos de tensión a tres probetas sólidas y, así, se obtuvo la curva de esfuerzo vs. Desplazamiento, el valor del esfuerzo último a tensión y el valor del esfuerzo del límite elástico, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Matriz de datos del diseño para la obtención del esfuerzo último promedio para probetas.

Secuencia de prueba	Número de corrida
1	3
2	1
3	2

Autoría propia.

Posteriormente, con dos tipos de adhesivos y dos tipos de geometría de juntas, se realizó un experimento factorial con tres réplicas para la elección del adhesivo, tal como se relaciona en la Tabla 6.

Tabla 6. Matriz de datos del diseño para la selección del adhesivo (probetas con juntas)

Probeta	Número de corrida	Factor	
		Adhesivo	Geometría
1	6	Loctite 420	Trapezoidal
2	3	Loctite 495	Trapezoidal
3	5	Loctite 420	Trapezoidal
4	1	Loctite 495	Trapezoidal
5	4	Loctite 420	Trapezoidal
6	2	Loctite 495	Trapezoidal
7	11	Loctite 420	Cilíndrica
8	9	Loctite 495	Cilíndrica
9	7	Loctite 420	Cilíndrica
10	8	Loctite 495	Cilíndrica
11	12	Loctite 420	Cilíndrica
12	7	Loctite 495	Cilíndrica

Autoría propia.

Una vez elegido el adhesivo y habiendo comprobado si había relación entre este y la geometría, se experimentaron dos tipos de juntas, una ci-

límpica y otra trapezoidal, a las cuales se les variaron sus dimensiones; en consecuencia, se implementaron dos diseños experimentales: el primero, factorial más un punto central con cinco réplicas, como se ve en la Tabla 7; el segundo, factorial más un punto central con cinco réplicas, como se muestra en la Tabla 8. Esto equivale a un total de 21 muestras para el análisis experimental.

Tabla 7. Matriz de datos del diseño para selección de junta (junta cilíndrica).

Probeta	Número de corrida	Factor	
		Radio (mm)	Altura (mm)
1	6	7	1
2	4	2	4
3	8	7	4
4	9	2	1
5	3	4.5	2.5
6	1	4.5	2.5
7	2	4.5	2.5
8	7	4.5	2.5
9	5	4.5	2.5

Autoría propia.

Tabla 8. Matriz de datos del diseño para selección junta (junta trapezoidal).

Probeta	Número de corrida	Factor			
		Longitud (mm)	Ancho (mm)	Altura (mm)	inclinación (°)
1	6	5	5	1	52
2	14	14	5	1	52
3	4	5	14	1	52
4	1	14	14	1	52
5	18	5	5	3	52
6	16	14	5	3	52
7	8	5	14	3	52
8	13	14	14	3	52
9	7	5	5	1	88
10	5	14	5	1	88
11	20	5	14	1	88
12	17	14	14	1	88
13	11	5	5	3	88
14	15	14	5	3	88
15	9	5	14	3	88
16	2	14	14	3	88
17	3	9.5	9.5	2	75
18	12	9.5	9.5	2	75
19	10	9.5	9.5	2	75
20	21	9.5	9.5	2	75
21	19	9.5	9.5	2	75

Autoría propia.

Por último, después de la selección de la geometría, se efectuó la optimización, empezando por un experimento de ascenso pronunciado, que constó a su vez de seis experimentos; luego se realizó la caracterización de la cima mediante un experimento equirradial hexagonal con tres puntos centrales, para terminar con la evaluación de seis probetas con geometría optimizada, todo lo cual se relaciona en la Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11, respectivamente.

Tabla 9. Matriz de ascenso pronunciado (junta cilíndrica).

Probeta	Número de corrida	Factor	
		Radio (mm)	Altura (mm)
1	6	4.80	3.30
2	4	5.15	4.20
3	5	5.45	5.00
4	2	6.80	0.65
5	3	6.60	0.30
6	1	0.00	0.00

Autoría propia.

Tabla 10. Matriz de caracterización de la cima (junta cilíndrica).

Probeta	Número de corrida	Factor	
		Radio (mm)	Altura (mm)
1	6	5.15	4.60
2	4	5.15	3.80
3	5	5.45	4.40
4	2	5.45	4.00
5	3	4.85	4.00
6	8	4.85	4.40
7	9	5.15	4.20
8	7	5.15	4.20
9	1	5.15	4.20

Autoría propia.

Tabla 11. Matriz experimentación probetas con junta optimizada.

Secuencia de prueba	Número de corrida	Factor	
		Radio (mm)	Altura (mm)
1	2	5.45	4.60
2	5	5.45	4.60
3	6	5.45	4.60
4	3	0.00	0.00
5	1	0.00	0.00
6	4	0.00	0.00

Autoría propia.

3.4 Diseño y fabricación de las probetas

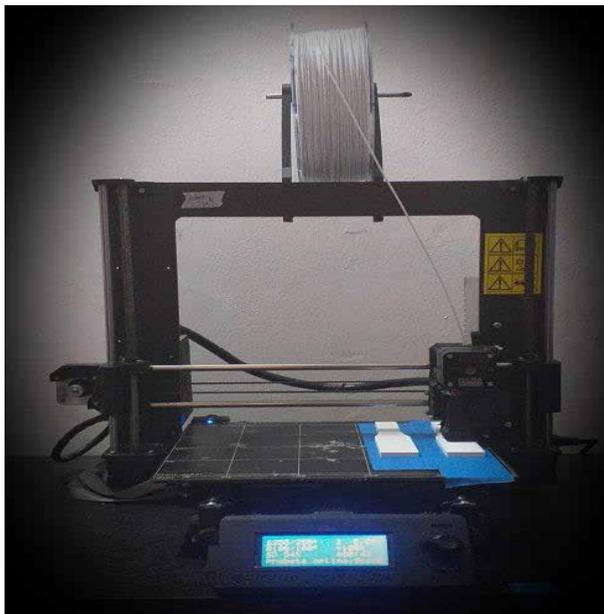
Se fabricaron probetas con junta, utilizando dos tipos de geometría: trapecoidal y cilíndrica, macho y hembra (ver la Figura 11). Todas las probetas fabricadas fueron modeladas usando el software SolidWorks®; a continuación, fueron exportadas como un archivo STL y, con el uso del software Simplify3D®, se establecieron los parámetros de impresión (ver la Tabla 12), con lo cual se obtuvo el G-code. Para la fabricación se utilizó la impresora Prusa i3 MK2®, con un volumen de trabajo de 10500 , altura de capa desde 0.05 mm hasta 0.5 mm, boquilla de 0.4 mm para filamento de 1.75 mm y compensación automática de inclinación de ejes.

Tabla 12. Parámetros de impresión.

Parámetros de impresión	Designación
Altura de capa	0.3 mm
Temperatura de la placa de impresión	100 °C
Temperatura de la tobera	255 °C
Velocidad de impresión	3600 mm/min
Relleno	100 %
Orientación	XY ± 45°

Autoría propia.

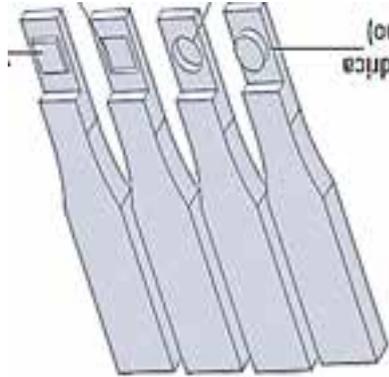
Figura 10. Impresora Prusa I3 Mk2.



Autoría propia.

Figura 11. Probetas macho y hembra, junta cilíndrica y junta trapezoidal.

Geometría junta trapezoidal (a , ancho; l , longitud; h , altura; β , inclinación); geometría junta cilíndrica (r , radio; h , altura).



Durante el proceso de fabricación se monitorearon las condiciones ambientales del laboratorio, de manera que quedara entre 30°C y 32°C, con una humedad de 68% a 70%. Se usó 3Dlac como material adherente entre la placa de impresión y la primera capa de material para obtener mayor fijación de la pieza impresa, evitar defectos en las dimensiones y facilitar su retiro sin dañarla.

4. Análisis de resultados

La base de referencia y comparación para las consecuentes fases experimentales está determinada por el comportamiento del material frente al esfuerzo de tensión de las probetas sólidas (sin junta pegada). De acuerdo con el diseño experimental, se realizaron tres ensayos de tensión a este tipo de probetas para obtener la curva de esfuerzo vs. Desplazamiento. Bajo los parámetros de impresión (Tabla 12), se obtuvo para el esfuerzo último un valor de 15.64 Mpa, comparable con los valores reportados por Abbot et al (2018) y que pueden verse en la Tabla 1.

4.1 Fase experimental 1: selección del adhesivo

Se verificaron dimensionalmente, con el uso de un calibrador (o vernier) con resolución de 0.05 mm, todas las probetas fabricadas con anterioridad. Las dimensiones de las probetas cumplen con la tolerancia de ± 0.5 mm especificada en la norma ASTM D638-03 (ASTM, 2014). Para esto, ver el Anexo 8.4, la Tabla 55 y la Tabla 56. De acuerdo con el diseño experimental, para la primera fase se realizaron dieciocho ensayos de tensión para la selección del adhesivo.

4.1.1 Fase experimental 1.1: inclinación en probetas con juntas

Se usó un nivel de gota para verificar la rectitud de las probetas y se evidenció, de este modo, la presencia de una inclinación en las probetas con juntas, motivo por el cual se procedió al análisis del origen e influencia de

esta desviación en los resultados de esfuerzos presentados. Ver la Tabla 13.

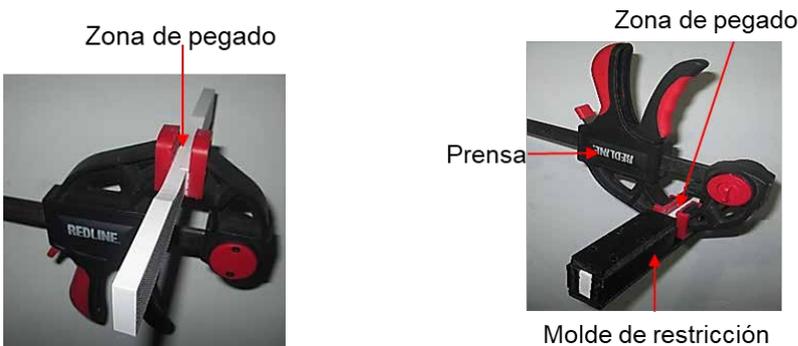
Tabla 13. Datos de esfuerzo último a tensión e inclinación en probetas con junta trapezoidal para experimento de la selección de adhesivo.

Probeta	Adhesivo	Inclinación (°)	Esfuerzo último (Mpa)
1	Loctite 420	2.0	1.68
2	Loctite 495	1.8	0.82
3	Loctite 420	0.5	3.27
4	Loctite 495	1.5	1.16
5	Loctite 420	1.0	2.18
6	Loctite 495	1.0	2.16

Autoría propia.

De los resultados, se resalta la influencia que tiene el proceso de pegado y curado de las probetas con juntas, por lo que se empleó un molde de restricción de movimiento para el control y corrección de esta variable no deseada, como se muestra en la Figura 13.

Figura 13. Mejora del proceso de curado (a, proceso con presencia de la variable de inclinación; b, proceso sin presencia de la variable de inclinación).



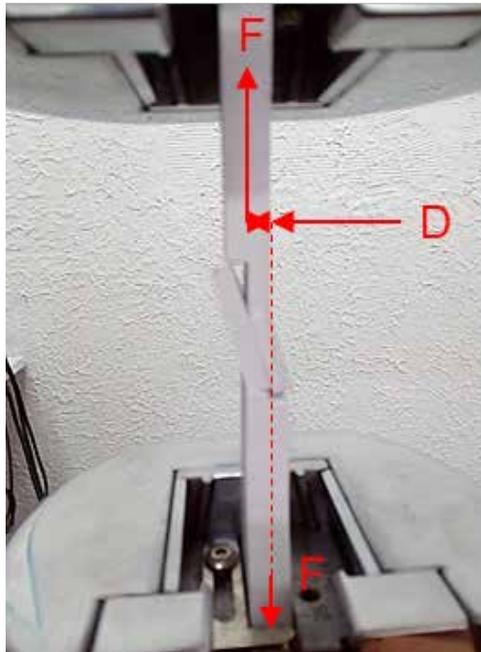
a. Pegado y curado bajo carga con presencia de inclinación

b. Pegado y curado bajo carga con molde de restricción y sin presencia de inclinación

Autoría propia

En la Figura 15 se evidencia una diferencia en el esfuerzo último, producto de los ángulos de inclinación presentes en las probetas relacionadas en la Tabla 13, lo cual reafirma que esta variable afecta directamente el esfuerzo último. Esto se explica por los esfuerzos de flexión en las probetas, que resultan de la distancia entre las dos fuerzas aplicadas durante los ensayos de tensión, así como de la inclinación presente en las probetas. Lo anterior se describe en la Figura 14.

Figura 14. Distancia entre fuerzas en ensayo de tensión.

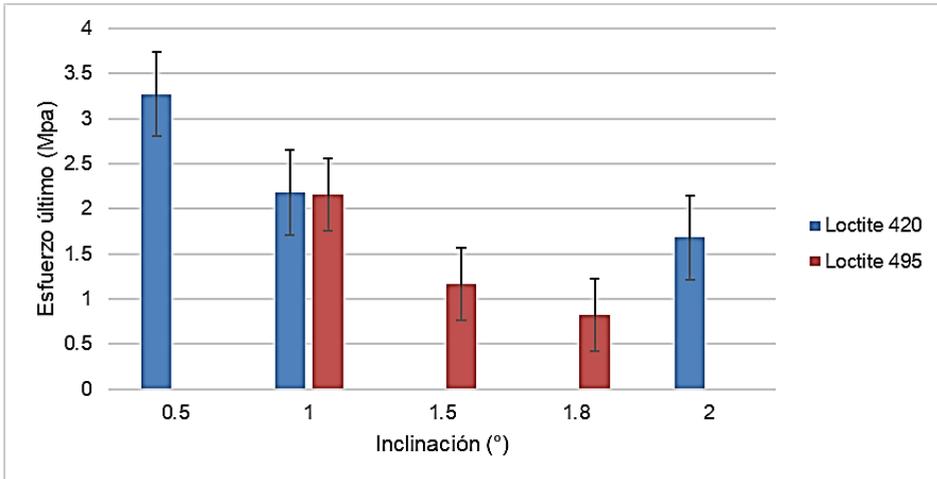


a. F, fuerza de tensión aplicada

b. D, distancia causada por la inclinación de las probetas

Autoría propia.

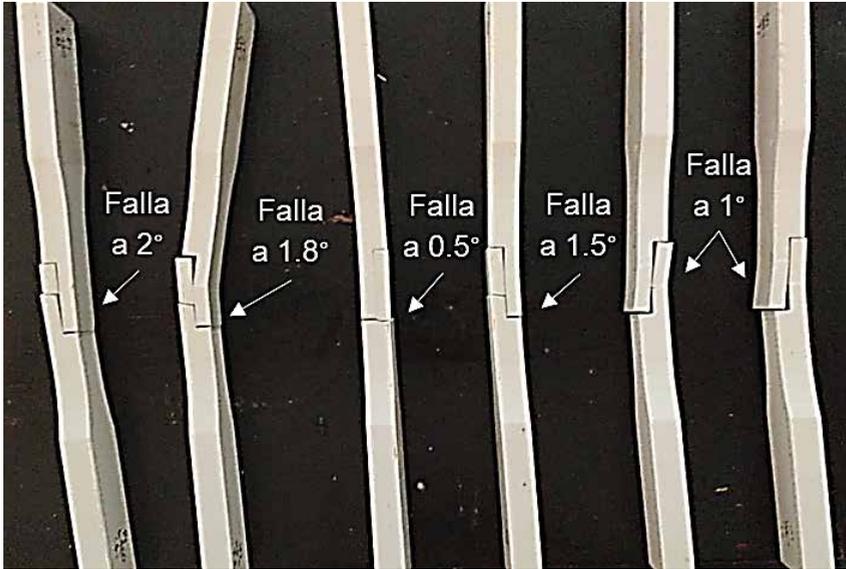
Figura 15. Esfuerzo último vs. inclinación en probetas con juntas trapezoidales (probetas 1-6), barras de desviación estándar.



Autoría propia.

La probeta con inclinación de 2° muestra un valor que difiere del comportamiento de las restantes probetas ensayadas. Para esta probeta se esperaba un menor valor de resistencia a la tensión en comparación con el resto, como se ve en la Figura 16. Este comportamiento puede explicarse dada la presencia del adhesivo y la falla por cohesión ocurrida inmediatamente después de la falla por adhesión, que a su vez se debió a la geometría de la junta por el lado de la probeta hembra, no del adhesivo. Esto indica que, en este caso, hubo mejor respuesta del adhesivo a los esfuerzos, como se muestra, también, en la Figura 16, en la que se observa menos daño cohesivo por flexión en la falla a 2°.

Figura 16. Fallas de las probetas con inclinación.



Autoría propia.

4.1.1.1 Verificación estadística

Con el apoyo del software StartGraphics Centurion[®], se determina que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los diferentes ángulos de inclinación presentes, para un valor-p de 0.0108, como se ve en la Tabla 2. Para un análisis estadístico completo, ver el Anexo 8.1.2.1.

Tabla 14. Tabla ANOVA para esfuerzo último a tensión por tipo de pegamento e inclinación

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Tipo de adhesivo					
Entre grupos	1.49002	1	1.49002	2.6	0.1822
Intra grupos	2.29247	4	0.573117		
Total	3.78248	5			
Inclinación					
Entre grupos	3.78228	4	0.945571	4727.85	0.0108
Intra grupos	0.0002	1	0.0002		
Total	3.78248	5			

Autoría propia.

4.1.2 Fase experimental 1.2: probetas sin inclinación

Durante esta fase se realizaron doce ensayos para seis probetas con juntas de geometría trapezoidal (Pt) y seis probetas con juntas de geometría cilíndricas (Pc).

Al eliminar el factor de inclinación, se obtuvo un aumento considerable en los esfuerzos últimos de tensión, relacionados en la Tabla 15. Además, se observó la presencia de una falla inicial debido a la presencia de esfuerzos en la sección externa de la junta donde solo actúa el adhesivo, hecho que valida la teoría expuesta por Corbett et al. (2017). Posteriormente, se apreció una falla final ubicada en la sección de la geometría en la junta donde se obtuvieron los esfuerzos último a tensión. Ver la Tabla 16 y la Figura 17.

Tabla 15. Aumento porcentual de los esfuerzos últimos a tensión.

Adhesivo	Factor	Aumento porcentual
Loctite 420	Media	58.91
	valor máximo	55.05
	valor mínimo	44.05
Loctite 495	Media	229.95
	valor máximo	124.07
	valor mínimo	418.29

Autoría propia.

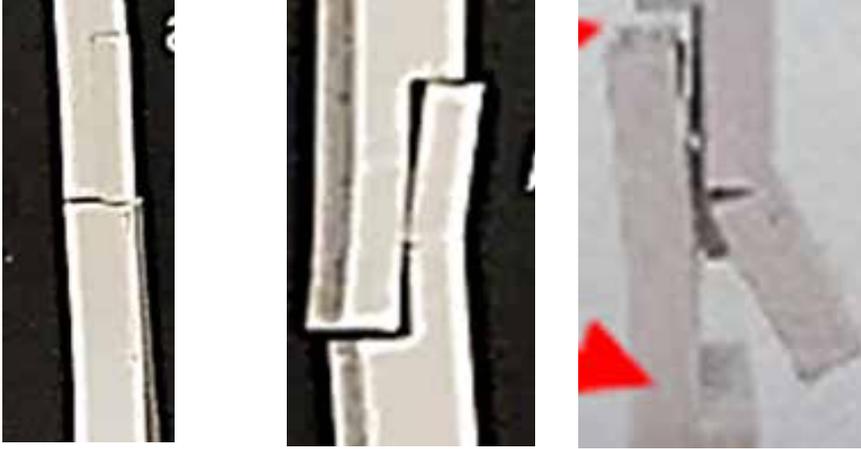
Tabla 16. Esfuerzos de diseño y último.

Probeta	Adhesivo	Tipo de junta	Esfuerzo de diseño (Mpa)	Esfuerzo último (Mpa)
			Falla inicial	Falla final
1	Loctite 420	Pt	2.78	3.84
2	Loctite 495	Pt	1.83	4.57
3	Loctite 420	Pt	1.93	2.42
4	Loctite 495	Pt	1.60	4.25
5	Loctite 420	Pt	3.33	5.07
6	Loctite 495	Pt	4.64	4.84
7	Loctite 420	Pc	2.15	2.29
8	Loctite 495	Pc	2.86	2.88
9	Loctite 420	Pc	2.90	2.95
10	Loctite 495	Pc	3.40	3.90
11	Loctite 420	Pc	1.30	1.91
12	Loctite 495	Pc	1.70	2.80

Autoría propia.

En la Figura 17 se pueden observar las tres etapas del proceso de falla en los ensayos de tensión realizados en las probetas con juntas.

Figura 17. Proceso de fallas de probetas con junta para selección de adhesivo, ensayadas a tensión (a, inicio de ensayo de tensión; b, falla inicial; c, falla final).

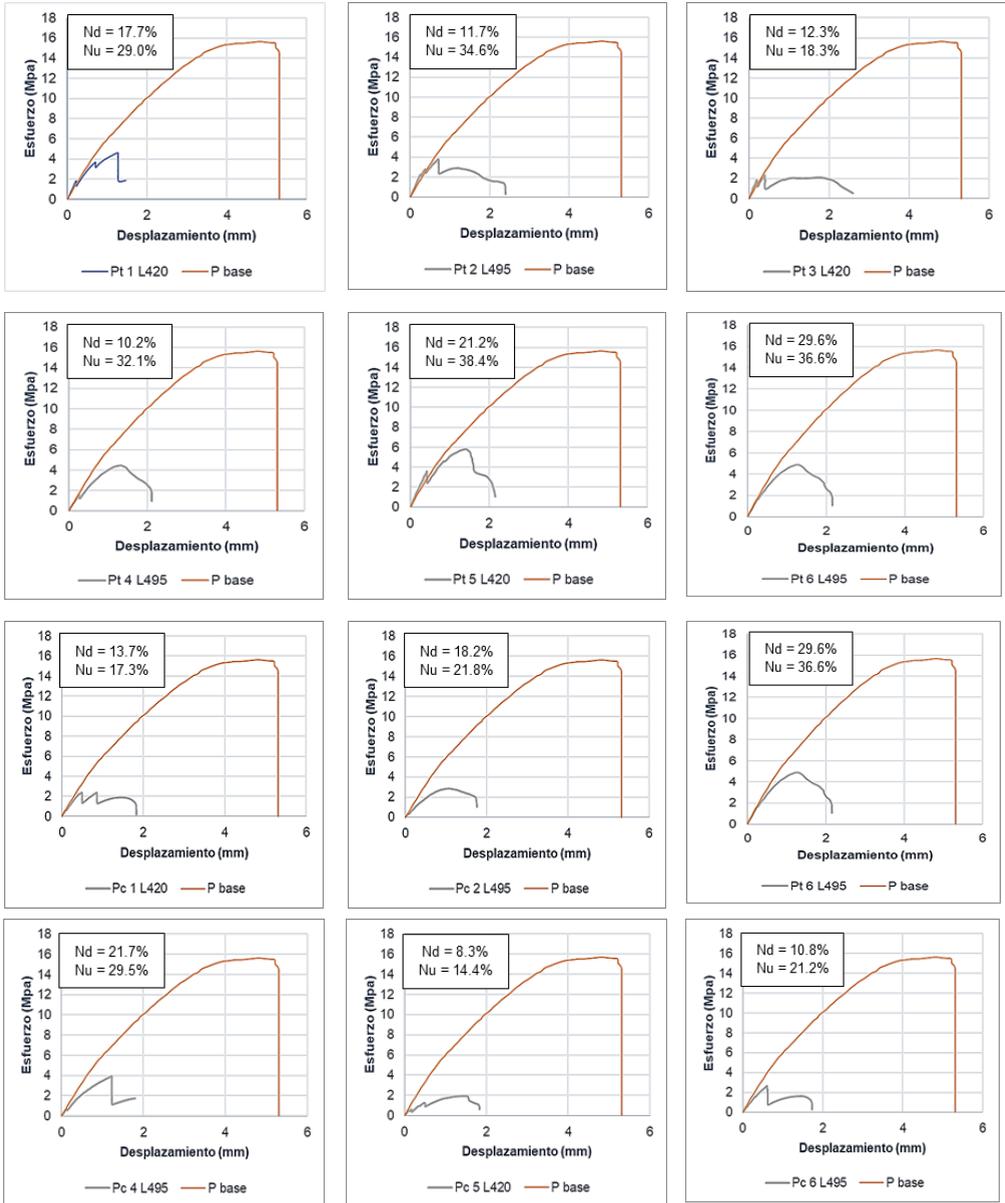


a. Inicio de ensayo de tensión, probeta recta. b. Falla inicial en los extremos de la junta c. Falla final

Autoría propia.

En la Figura 18, por su parte, se observa la existencia de la falla inicial en cada uno de los casos de las probetas sin juntas; por lo tanto, se realiza el estudio teniendo en cuenta un esfuerzo de diseño, que es el esfuerzo donde se presenta la falla inicial y el esfuerzo último. En la primera fase se calculó la eficiencia de las probetas, lo cual puede verse, asimismo, en la Figura 18. Las eficiencias promedio para el esfuerzo de diseño (N_d) y para el esfuerzo último (N_u) están, a su vez, relacionadas en la Tabla 17.

Figura 18. Esfuerzo vs. desplazamiento de probetas con juntas (Nd, eficiencia de la junta al esfuerzo de diseño; Nu, eficiencia la junta al esfuerzo último).



Autoría propia.

Tabla 17. Eficiencias promedio de probetas con junta

Probeta	Nu	Nd
Pt	17.17%	31.5%
Pc	15.25%	21.1%

Autoría propia.

4.1.2.1 Verificación estadística

Con el apoyo del software StartGraphics Centurion ®, se determina que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los adhesivos Loctite 420 ® y Loctite 495 ®, ni entre la interacción entre el tipo de adhesivo y el tipo de junta; sin embargo, existe una diferencia estadísticamente significativa entre los dos tipos de geometría en las juntas para un valor-p de 0.0142, como se relaciona en la Tabla 18. Para el análisis estadístico completo, ver el Anexo 8.1.2.2.

Tabla 18. Tabla ANOVA para esfuerzo último a tensión por tipo de pegamento.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Tipo de adhesivo	2.05013	1	2.05013	3.34	0.1048
B: Tipo de junta	5.9643	1	5.9643	9.73	0.0142
INTERACCIONES					
AB	0.000833333	1	0.000833333	0	0.9715
RESIDUOS	4.9032	8	0.6129		
TOTAL	12.9185	11			

Autoría propia.

4.1.3 Resumen resultado fase 1.2

Luego de los ensayos y análisis realizados, se decide continuar con la siguiente fase; en esta se emplea el adhesivo Loctite 495 ® para el pegado de las juntas con geometrías tanto cilíndrica como trapezoidal, teniendo en cuenta que este adhesivo posee una media mayor y presenta menor desviación entre los resultados, lo cual proporciona mayor control sobre este factor.

4.2 Fase experimental 2: selección de la geometría de la junta

Con el uso de un calibrador (o vernier) con resolución de 0.05 mm, se verificaron dimensionalmente todas las probetas previamente fabricadas. Las dimensiones de estas cumplen con la tolerancia de ± 0.5 mm especificada en la norma ASTM D638-03 (ASTM, 2014), tal como se aprecia en el Anexo 8.4. De acuerdo con el diseño experimental, para esta fase se llevaron a cabo treinta ensayos de tensión para la selección de la geometría de la junta.

Se realizó el estudio experimental para los dos tipos de geometrías de la junta: trapezoidal y cilíndrica. Luego del ensayo a tensión, se obtuvieron como resultado los datos que se relacionan en la Tabla 19 y la Tabla 20.

Tabla 19. Esfuerzo último y de diseño a tensión (junta trapezoidal).

Probeta	Geometría	Esfuerzo de diseño (Mpa)	Esfuerzo último (Mpa)
		Falla inicial	Falla final
1	Trapezoidal	1.21	2.51
2	Trapezoidal	1.86	3.50
3	Trapezoidal	1.05	1.87
4	Trapezoidal	1.26	3.51
5	Trapezoidal	0.67	1.60
6	Trapezoidal	1.43	2.84
7	Trapezoidal	0.72	1.96
8	Trapezoidal	1.42	2.42
9	Trapezoidal	0.85	1.49
10	Trapezoidal	1	3.90
11	Trapezoidal	2.52	3.07
12	Trapezoidal	1.6	3.24
13	Trapezoidal	0.9	2.62
14	Trapezoidal	2.37	2.79
15	Trapezoidal	1.4	3.71
16	Trapezoidal	1.5	3.18
17	Trapezoidal	1.05	3.31
18	Trapezoidal	1.72	3.48
19	Trapezoidal	0.9	2.60
20	Trapezoidal	1.96	3.63
21	Trapezoidal	1.8	3.90

Autoría propia.

Se observó que, a causa de la inclinación presente en las juntas de geometría trapezoidal, la resistencia a la tensión alcanzó una eficiencia media: Nu, 18.55%; Nd, 8.86%. A menor grado de inclinación, menor es la resistencia a la separación del ensamble sometido a tensión. Esto pudo ser causado por un deslizamiento entre las superficies entrelazadas. Se aprecia, asimismo, que el modo de falla de las juntas con menor grado de inclinación fue por separación de la junta, sin presentar daño en su es-

estructura, a diferencia de las juntas con mayor grado de inclinación en su geometría, en las que se evidencian sendas fallas catastróficas en el cuerpo y en la geometría de la junta. Esta última falla es por esfuerzo cortante.

Se comparó, después, la junta de geometría cilíndrica con la junta de geometría trapezoidal. En la segunda se evidencia que, por su configuración geométrica, presenta aristas y vértices que actúan como concentradores de esfuerzos, las cuales afectan principalmente la parte más débil de la unión, que es la junta hembra, lo cual provoca una menor resistencia a la tensión. Por su parte, la junta con geometría cilíndrica, al no presentar cambios bruscos de sección en su geometría, tiene una mejor distribución de esfuerzos, lo que la hace más resistente a la tensión, como se evidencia en los resultados obtenidos, que se referencian en la Tabla 20. Con un aumento Nu, 5.37%; y Nd, 5.49%, estas probetas superan la eficiencia alcanzada por las probetas con geometría trapezoidal. En la verificación estadística 4.2.1 se analizaron los resultados para comprobar las diferencias entre los resultados extraídos en ambos tipos de geometrías de junta.

Tabla 20. Esfuerzo último y de diseño a tensión (junta cilíndrica).

Probeta	Geometría	Esfuerzo de diseño (Mpa)	Esfuerzo último (Mpa)
		Falla inicial	Falla final
1	Cilíndrica	3.62	4.70
2	Cilíndrica	1.95	4.28
3	Cilíndrica	1.63	3.21
4	Cilíndrica	1.69	3.30
5	Cilíndrica	2.69	4.25
6	Cilíndrica	0.92	2.06
7	Cilíndrica	2.35	3.79
8	Cilíndrica	2.79	4.03
9	Cilíndrica	2.63	4.16

Autoría propia.

Hay dos modos de fallas para las juntas con geometría cilíndrica: el primero, debido al esfuerzo cortante; en el segundo, la falla se presenta en el cuerpo de la junta. Sin embargo, a diferencia de las juntas trapezoidales, se evidencia una falla en la probeta macho por causa de la variación del radio. El modo de falla ocurrió de la siguiente forma: para el radio menor, 2 mm, se dio el primer modo de falla; para el radio central, 4.5mm, se dio el segundo modo de falla en la probeta macho; por último, para el radio mayor, 7mm, se dio el segundo modo de falla en la probeta hembra.

4.2.1 Verificación estadística

Con el apoyo del software StartGraphics Centurion®, se analizó estadísticamente la geometría trapezoidal y se encontró que las variables con mayor influencia son la inclinación y la longitud, como se ve en la Figura 11. Para un aumento de la inclinación, se predice un aumento del esfuerzo último a tensión mediante el modelo de regresión realizado. Teóricamente, para un ángulo de inclinación de 82° y una longitud de 10 mm, el mejor resultado para esta zona estaría dado con un esfuerzo último 8.14 Mpa.

$$\sigma_{ut} = 0.95133 l - 0.0453322 l^2 + 0.000470313 \beta^2 \quad (1)$$

Para la geometría cilíndrica, se determinó estadísticamente que las variables con mayor influencia son el radio y la altura (ver la Figura 11). A través del modelo de regresión realizado, con el aumento de la altura se predice un aumento del esfuerzo último a tensión. Teóricamente, para un radio de 5 mm y una altura de 1 mm, el mejor resultado para esta zona estaría dado con un esfuerzo último de 11.32 Mpa; sin embargo, para este mismo radio y una altura de 4mm, se predice un esfuerzo último de 10.71 Mpa.

$$\sigma_{ut} = 10.8839 r - 16.3129 h - 1.20028 r^2 + 3.22174 h^2 \quad (2)$$

De esta forma, se determina que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las geometrías de las juntas circular y trapezoidal, para un valor-p de 0.0010 y 0.0014, con un nivel del 95% de confianza, comparando el esfuerzo último a tensión y de diseño, respectivamente. Para el análisis estadístico completo, ver el Anexo 8.2.2.

4.2.2 Resumen resultados fase 2

Finalizada la fase experimental 2 del análisis estadístico-comportamental, se concluye que las juntas de geometría cilíndrica ofrecen mejores resultados para esfuerzos último y de diseño a tensión, en comparación con las juntas de geometría trapezoidal. Para el análisis estadístico se obtuvo que, para un 95% de confianza, la junta cilíndrica es significativamente diferente a la junta trapezoidal, como se aprecia en el Anexo 8.2. Además, se realizó la proyección, tras la cual fue posible determinar que el tipo de junta cilíndrica ofrece mayores posibilidades de mejora con respecto al esfuerzo último de tensión. Estas mejoras se llevaron a cabo en la siguiente fase. Adicionalmente, se extrajo como resultado que la media de los esfuerzos de las juntas con geometría cilíndrica es más eficiente en comparación con la media de las juntas con geometría trapezoidal.

4.3 Fase 3: optimización

Se verificaron dimensionalmente, con el uso de un calibrador (o vernier) con resolución de 0.05 mm, todas las probetas previamente fabricadas. Las dimensiones de las probetas cumplen con la tolerancia de ± 0.5 mm especificada en la norma ASTM D638-03 (ASTM, 2014), según se relaciona en el Anexo 8.4. De acuerdo con el diseño experimental 4.3.4, para esta fase se realizaron veintiún ensayos de tensión para la optimización de la junta con geometría cilíndrica.

4.3.1 Ascenso pronunciado

Debido al comportamiento del modelo de regresión obtenido para la junta cilíndrica (Figura 24), se decidió hacer el ascenso pronunciado en dos direcciones; la primera (ascenso pronunciado A), variando la altura entre 3.30 y 5 mm; la segunda (ascenso pronunciado B), variando la altura entre 0 y 0.65 mm. La matriz experimental y los resultados están relacionados en la Tabla 21.

Tabla 21. Esfuerzo último y de diseño (ascenso pronunciado).

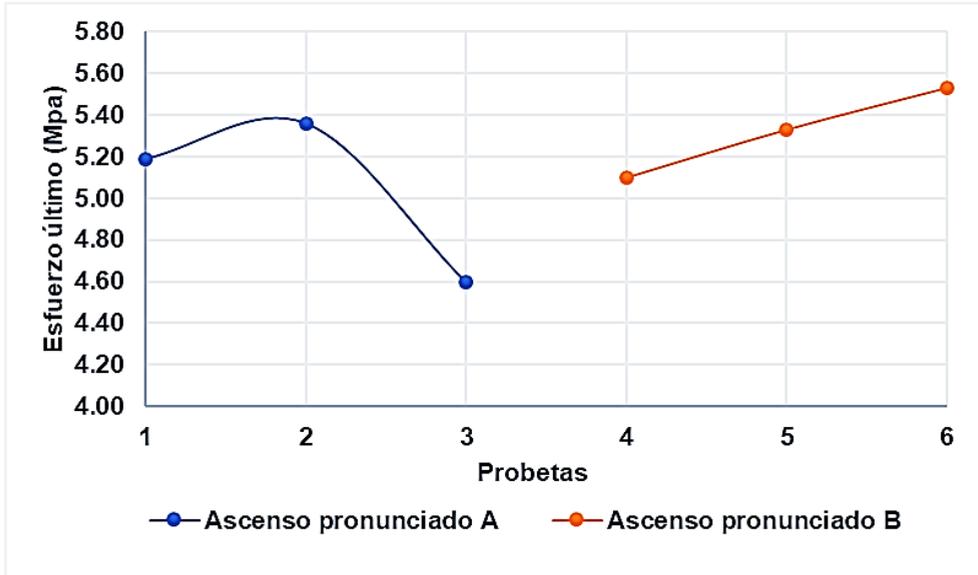
Probeta	Número de corrida	Factor		Esfuerzo último (Mpa)	Esfuerzo de diseño (Mpa)
		Radio (mm)	Altura (mm)		
Ascenso pronunciado A					
1	6	4.80	3.30	5.19	3.51
2	4	5.15	4.20	5.36	3.46
3	5	5.45	5.00	4.60	3.76
Ascenso pronunciado B					
4	2	6.80	0.65	5.10	3.49
5	3	6.60	0.30	5.33	4.62
6	1	0.00	0.00	5.53	3.02

Autoría propia.

En el ascenso pronunciado A se obtuvo el mayor resultado de esfuerzo para la probeta sin geometría (probeta 6), pues solo actuó el adhesivo, que de esta manera soportó todo el esfuerzo cortante presente en el ensayo. El resultado se corrobora con los datos de la ficha técnica del adhesivo (Henkel, 2010a y 2010b); aquí, el esfuerzo cortante del adhesivo usado en ABS es de 6 Mpa. Esta variación se puede explicar porque el ensayo se realizó a diferentes condiciones. Para las probetas 4 y 5, a causa de su geometría entrelazada, el adhesivo presenta esfuerzo cortante y a tensión; este último está presente en la falla inicial, la cual contribuyó al desprendimiento de las juntas debido a la altura del pin: a mayor altura, mayor aumento de separación en la falla inicial, lo que, a su vez, provoca valores de esfuerzos menores según aumenta la altura del pin.

Como probeta óptima para el ascenso pronunciado A, se escogió la probeta sin geometría, con radio 0 mm y altura 0 mm, ya que esta se encuentra en la cima, como se observa en la Figura 19; sin embargo, se decide realizar la caracterización de la cima (probeta 2) del ascenso pronunciado B (Figura 19) debido al análisis estadístico de los resultados obtenidos: 4.3.1.

Figura 19. Ascenso pronunciado altura ascendente.



Autoría propia.

4.3.1.1 Verificación estadística

Con el apoyo del software StartGraphics Centurion[®], se realizó la comparación entre los resultados de esfuerzo último y de diseño del ascenso pronunciado. Puesto que los valores-p 0.3604 y 0.7965 son mayores que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos variables con un nivel del 95.0% de confianza. Para el análisis estadístico completo, ver el Anexo 7.3.1.3.

4.3.1.2 Resumen de resultados fase Ascenso Pronunciado

Siguiendo el anterior análisis comportamental y estadístico, se decidió realizar la caracterización de la cima del ascenso pronunciado B. Así, como probeta óptima para el ascenso pronunciado A, se eligió la probeta sin geometría, la cual será comparada con la probeta óptima que se obtuvo en el siguiente análisis.

4.3.2 Caracterización, cima de ascenso pronunciado

En obediencia a la comparación estadística realizada previamente, se tomó la decisión de realizar nueve ensayos de tensión para la caracterización, de los cuales se obtuvieron los resultados relacionados en la Tabla 22.

Tabla 22. Esfuerzo último y de diseño, caracterización de la cima del ascenso pronunciado.

Probeta	Geometría	Esfuerzo de diseño (Mpa)	Esfuerzo último (Mpa)
		Falla inicial	Falla final
1	Cilíndrica	4.34	3.03
2	Cilíndrica	4.13	2.34
3	Cilíndrica	5.02	3.42
4	Cilíndrica	4.36	3.88
5	Cilíndrica	4.28	2.25
6	Cilíndrica	4.35	3.86
7	Cilíndrica	4.38	3.82
8	Cilíndrica	4.06	3.07
9	Cilíndrica	5.36	3.46

Autoría propia.

En los ensayos llevados a cabo se observó un solo modo de falla para todas las probetas (ver la Figura 30): la pieza falla por la probeta hembra. Esto se explica por la cavidad en su interfaz, la cual genera concentradores de esfuerzos; además, se sigue dando la falla inicial, que, debido a la flexión que se presenta, también contribuye al acontecimiento de este modo de falla. En la zona de la falla inicial se dan dos modos de falla para el adhesivo: falla cohesiva y adhesiva, como se muestra en la Figura 30. Ambas fallas fueron medidas y su porcentaje de falla se relacionó en la Tabla 23. Cabe también resaltar que el pin macho no sufrió daños en ninguno de los casos, a diferencia de las probetas ensayadas en las fases anteriores.

Tabla 23. Modo de falla (adhesivo).

Probeta	Geometría	Área de falla (mm ²)	Falla por adhesión (%)	Falla por cohesión (%)
1	Cilíndrica	190.49	35.61	64.39
2	Cilíndrica	184.63	70.52	29.48
3	Cilíndrica	183.25	33.50	66.50
4	Cilíndrica	184.54	44.12	55.88
5	Cilíndrica	196.32	55.25	44.75
6	Cilíndrica	175.36	28.95	71.05
7	Cilíndrica	178.58	26.75	73.25
8	Cilíndrica	179.03	29.56	70.44
9	Cilíndrica	179.57	28.85	71.15

Autoría propia.

4.3.2.1 Verificación estadística

Con el apoyo del software StartGraphics Centurion®, se comprobó estadísticamente que, para la geometría cilíndrica, las variables con mayor influencia son el radio y la altura. Mediante el modelo de regresión realizado (4) y evaluado en la Figura 31, para un aumento en el radio y en la altura se observa un aumento del esfuerzo último a tensión. Por lo tanto, se estimó que, para un radio de 5.45 mm y una altura de 4.6 mm, el mejor resultado para esta zona estaría dado con un esfuerzo último de 6.98 Mpa. De lo anterior se extrae que esta sería la probeta óptima para la junta con geometría circular.

$$\sigma_{ut} = 0.0582382 r^2 + 1.34572 h \quad (3)$$

4.3.3 Probeta óptima

Se decidió comparar las dos probetas óptimas obtenidas luego del análisis y la caracterización del ascenso pronunciado. La primera probeta, con junta sin geometría; la segunda, con junta de geometría cilíndrica, radio 5.45 mm y altura 4.6mm. Se realizaron seis ensayos de tensión para este

análisis, tres para cada tipo de probeta. Los resultados se relacionan en la Tabla 24.

Tabla 24. Esfuerzo último y de diseño (probetas óptimas).

Probeta	Geometría	Esfuerzo último (Mpa)	Esfuerzo de diseño (Mpa)
1	Cilíndrica	5.78	4.43
2	Cilíndrica	6.54	6.16
3	Cilíndrica	5.78	4.45
4	-	5.47	2.95
5	-	5.38	2.52
6	-	5.53	3.02

Autoría propia.

En los ensayos desarrollados se observó que las probetas sin geometría se comportaron de acuerdo con lo analizado en el inciso del ascenso pronunciado: 4.3.1. Sin embargo, en las probetas con geometría cilíndrica ocurrieron cambios en el modo de falla: la separación en los extremos de la falla inicial disminuyó hasta el punto de ser similar a la falla dada en la probeta sin geometría; a pesar de esto, la resistencia al esfuerzo de diseño donde se presenta esta falla es menor en las probetas sin geometrías, como se observa en la Tabla 24. Esto se explica porque la geometría óptima cumple la función de distribuir asimétricamente el esfuerzo tangencial en la capa del adhesivo y reduce el esfuerzo en los extremos de la junta (Corbett et al., 2017). A causa del aumento de la resistencia al esfuerzo de diseño, el modo de falla final pasó de tener lugar en la geometría de la junta hembra, a los extremos de la junta. La falla ocurre solo por esfuerzo de tensión.

Asimismo, se observó que el comportamiento de la curva de esfuerzo vs. desplazamiento de las probetas con geometría cilíndrica (Poptc) tiende a ser igual, contrariamente a lo que sucede con las probetas sin geometría (Poptsg). Esto se da debido al aumento de la resistencia a la tensión en la falla inicial, ya que, luego de este punto, los esfuerzos se distribuyen por toda la junta, consecuencia de lo cual esta se comporta como la probeta base.

En la primera fase se calculó, igualmente, la eficiencia de las probetas. Las eficiencias promedio para el esfuerzo de diseño (Nd) y para el esfuerzo último (Nu) están relacionadas en la Tabla 25.

Tabla 25. Eficiencias promedio de probetas con junta.

Probeta	un	Nd
Pc	38.44%	37.94%
Pt	34.80%	21.40%

Autoría propia.

Vale resaltar que este estudio experimental logró obtener una eficiencia 20% mayor que otros estudios de juntas en polímeros, como los de Cao et al. (2019) y Hashimoto y Yamamoto (2017).

4.3.3.1 Verificación estadística

Con el apoyo del software estadístico StartGraphics Centurion®, se ejecutó un análisis estadístico para la comparación de los esfuerzos últimos y de diseño a tensión entre las probetas óptimas. Puesto que el valor-p 0.0896 es mayor que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa, con un nivel del 95% de confianza para los esfuerzos últimos. Sin embargo, dado que el valor-p 0.0213 es menor que 0.05, sí existe una diferencia estadísticamente significativa, con un nivel del 95% confianza para los esfuerzos de diseño. El resumen del anterior análisis se relaciona en la Tabla 26 y en la Tabla 27.

Tabla 26. ANOVA esfuerzo último (probetas óptimas).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.49	1.00	0.49	4.97	0.0896
Intra grupos	0.40	4.00	0.10		
Total (Corr.)	0.89	5.00			

Autoría propia.

Tabla 27. ANOVA esfuerzo de diseño (probetas óptimas).

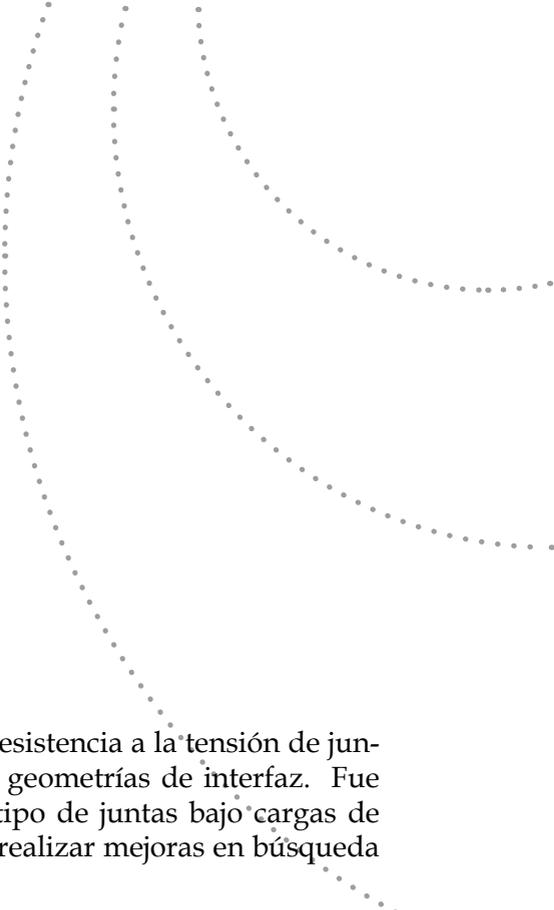
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	7.15	1.00	7.15	13.50	0.0213
Intra grupos	2.12	4.00	0.53		
Total (Corr.)	9.27	5.00			

Autoría propia.

De igual manera, se realizó una comparación de las medias de los esfuerzos último y de diseño a tensión para las probetas óptimas con geometría y sin geometría. En los resultados se observa que la media de las juntas con geometría cilíndrica ofrece mayor resistencia al esfuerzo de diseño a tensión; sin embargo, no hay diferencias entre las medias al esfuerzo último a tensión.

4.3.3.2 Resumen resultados fase probeta óptima

Gracias al análisis de la caracterización se logró optimizar la probeta con junta de geometría cilíndrica entrelazada. Una vez realizada la comparación entre las dos posibles probetas óptimas, se concluye que la probeta óptima es la probeta con junta de geometría cilíndrica, debido a su mejor resistencia a la falla inicial, ya que es un 16.54% más eficiente a pesar de tener valores estadísticamente iguales respecto a su resistencia a la falla final.



5. Conclusión

En este estudio experimental se evaluó la resistencia a la tensión de juntas mecánicas-adhesivas, con dos tipos de geometrías de interfaz. Fue posible analizar cómo se comportan este tipo de juntas bajo cargas de tensión, y tomar acciones que permitieron realizar mejoras en búsqueda de optimizar su rendimiento mecánico.

A partir de los resultados obtenidos a través de los ensayos de tensión se determinó que, entre ambos adhesivos (Loctite 420 ® y Loctite 495 ®), no existe diferencia comportamental ni estadística. Con el uso de las geometrías entrelazadas se genera una zona débil en la probeta hembra, lo cual se explica por la creación de concentradores de esfuerzos causados por la cavidad en su interfaz. El tipo de geometría cumple una función importante, debido al aporte de más concentradores de esfuerzos en geometrías donde hay vértices y aristas que suponen cambios bruscos de sección. Descrito esto, la geometría que presentó mejor resistencia a la tensión fue la geometría cilíndrica.

El estudio reflejó que, para el esfuerzo último a tensión, las juntas superpuestas (sin interfaz de geometría de entrelazado) y las juntas con geometría de entrelazado no son estadísticamente diferentes entre sí; no obstante, un factor determinante para la elección de la probeta óptima fue el esfuerzo de diseño; allí, las probetas con geometría cilíndrica tuvieron mayor resistencia en la falla inicial. Como valor agregado, el comportamiento de la curva de esfuerzo vs. desplazamiento para la última es similar al comportamiento de la probeta base, que, por ser recurrente, puede predecirse mejor. De lo anterior se concluye que la probeta óptima

es la que posee geometría cilíndrica de las siguientes dimensiones: radio (r), 5.45 mm; altura (h), 4.6mm.

Además, en virtud de que la zona de falla está los extremos de la junta, contigua a la separación de los extremos, y debido a que la falla inicial se presenta en alguna de las dos probetas (hembra o macho), se determina que el esfuerzo último a tensión para la probeta óptima debe ser aproximadamente el doble del registrado en el ensayo, puesto que en la zona de la falla final la carga está siendo soportada por alguna de las dos probetas (hembra o macho) en la sección de la junta donde el espesor es la mitad de la probeta unida.

6. Referencias bibliográficas

- Abbott, A. C., Tandon, G. P., Bradford, R. L., Koerner, H. y Baur, J. W. (2018). Process-Structure-Property Effects on ABS Bond Strength in Fused Filament Fabrication. *Additive Manufacturing*, 29-38.
- Adams, R. D. (1997). *Structural Adhesive Joints in Engineering*. London, England: Chapman & Hall.
- Ahmed, O. (2017). Experimental Investigation of Time-Dependent Mechanical Properties of PC-ABS Prototypes Processed by FDM Additive Manufacturing Process. *Material Letters*, 58-62.
- Aliheidari, N. (2017). Fracture Resistance Measurement of Fused Deposition Modeling 3D Printed Polymers. *Polymer Testing*, 94-101.
- Anitha, R. (2001). Critical Parameters Influencing the Quality of Prototypes in Fused Deposition Modelling. *Materials Processing Technology*, 385-388.
- Arenas, J. M. (2012). Multi-Criteria Selection of Structural Adhesives to Bond ABS Parts Obtained by Rapid Prototyping. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 67-74.
- ASTM (2014). "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics" (D638-14). Recuperado de <http://www.astm.org>

- Bagherian, R. (2018). Measurement and evaluation of joint properties in friction stir welding of ABS sheets reinforced by nanosilica addition. *ELSEVIER*, 198-204.
- Baun, W. L. (1984). *Adhesive Joints. Formation, Characteristics, and Testing-Springer US*.
- Cao, Y., Wang, W., Wang, J. y Zhang, C. (2019). Experimental and Numerical Study on Tensile Failure Behavior of Bionic Suture Joints. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 6-14.
- Corbett, M. C., Sharos, P. A., Hardiman, M. y McCarthy, C. T. (2017). Numerical Design and Multi-Objective Optimisation of Novel Adhesively Bonded Joints Employing Interlocking Surface Morphology. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 111-120.
- Danezan, A. (2017). Selective Laser Sintering of Porcelain. *Journal of the European Ceramic Society*, 769-775.
- Dawoud, M. (2016). Mechanical Behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, 39-45.
- eSun (s.f.). *eSuncolombia*. Recuperado de <http://esuncolombia.com/materiales-esun>
- Hashimoto, Y. y Yamamoto, T. (2017). Solid State Direct Bonding of Polymers by Vacuum-Ultraviolet Light below 160nm. *Applied Surface Science*, 152-8550.
- Heidarpour, F. (2017). Experimental Investigation of the Effects of Adhesive Defects on the Single Lap Joint Strength. *International Journal of Adhesion and Adhesives*.
- Henkel (2010a). TDS LOCTITE® 420™.
- Henkel (2010b). TDS LOCTITE® 495 (OLD).
- Kumar, A. (2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & Design*, 287-295.
- La fábrica de inventos (s.f.). Recuperado el 04 de 05 de 2019, de <https://lafabricadeinventos.com/sinterizado-selectivo-por-laser-sls/>
- Montgomery, D. C. (2006). *Diseño y análisis de experimentos*. México D.F: Limusa Wiley.

- Moya, E. M. (2017). Effect of the Geometry in the Strength of Single-Lap Adhesive Joints of Composite Laminates Under Uniaxial Tensile Load. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23-29.
- Pham, D. T. (1998). A Comparison of Rapid Prototyping Technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1257-1287.
- Real Academia Española. (s.f. a). Adhesivo. En *Diccionario de la lengua española*. Recuperado de <https://dle.rae.es/adhesivo?m=form>
- Real Academia Española. (s.f. b). Cohesión. En *Diccionario de la lengua española*. Recuperado de <https://dle.rae.es/cohesi%C3%B3n>
- Real Academia Española. (s.f. c). Adhesión. En *Diccionario de la lengua española*. Recuperado de <https://dle.rae.es/adhesi%C3%B3n?m=form>
- Ribeiro, M., Sousa, O. y Ferreira, A. (2018). Interface Geometries in 3D Multi-Material Prints by Fused Filament Fabrication. *Rapid Prototyping Journal*.
- Riccio, A. (2016). Numerical Investigation of the Failure Phenomena in Adhesively Bonded Joints by Means of a Multi-Linear Equivalent Plastic Stress/Strain Approach. *Procedia Engineering*, 168-175.
- Sahoo, P. K. (2017). Strength Prediction of Adhesively Bonded Joints Using Plastic Zone Size Criterion. *Procedia Engineering*, 1635-1641.
- Sanoa, Y. (2018). 3D Printing of Discontinuous and Continuous Fibre Composites Using Stereolithography. *Additive Manufacturing*, 521-527.
- Slideshare (s.f.). Recuperado el 04 de 05 de 2019, de <https://es.slideshare.net/LeonardoABonilla/fabricacin-digital-prototipado-rpido>
- Trimaker (s.f.). Recuperado el 04 de 05 de 2019, de <https://trimaker.com/guia-impresion-3d-2-que-es-fdm-2/>

7. Anexos

7.1 Diseño de experimento: selección de adhesivo

7.1.1 Hipótesis

Los esfuerzos últimos promedios obtenidos mediante el uso de los pegamentos Loctite 420 ® y Loctite 495 ® son diferentes.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Donde μ_1 representa la media del adhesivo Loctite 420 ® y μ_2 la media del adhesivo Loctite 495 ®.

Los esfuerzos obtenidos mediante los ensayos de tensión realizados se pueden observar en la Tabla 28.

Tabla 28. Datos de esfuerzo último a tensión en probetas para la selección de adhesivo.

Adhesivo	Observaciones (MPa)			Total	Promedio
	1	2	3		
Loctite 420	1.68	3.27	2.18	7.13	2.38
Loctite 495	0.82	1.16	2.16	4.14	1.38

Autoría propia.

7.1.2 Análisis estadístico

7.1.2.1 Probetas con junta adhesiva e inclinación

Con el apoyo del software estadístico StartGraphics Centurion ®, se realiza un análisis estadístico del efecto de los dos adhesivos y de la inclina-

ción que presentaron las probetas con juntas. Los datos para este análisis se relacionan en la Tabla 29.

Tabla 29. Datos de esfuerzo último a tensión e inclinación en probetas para la selección de adhesivo

Probeta	Adhesivo	Inclinación (°)	Esfuerzo último (MPa)
1	Loctite 420	2.0	1.68
2	Loctite 495	1.8	0.82
3	Loctite 420	0.5	3.27
4	Loctite 495	1.5	1.16
5	Loctite 420	1.0	2.18
6	Loctite 495	1.0	2.16

Autoría propia.

Los resultados del análisis ANOVA realizado se relacionan en la Tabla 30.

Tabla 30. Tabla ANOVA para esfuerzo último a tensión por tipo de pegamento e inclinación.

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Tipo de adhesivo					
Entre grupos	1.49002	1	1.49002	2.6	0.1822
Intra grupos	2.29247	4	0.573117		
Total (Corr.)	3.78248	5			
Inclinación					
Entre grupos	3.78228	4	0.945571	4727.85	0.0108
Intra grupos	0.0002	1	0.0002		
Total (Corr.)	3.78248	5			

Autoría propia.

Para un 95.0 % de confianza, como el valor-p igual a 0.1822 de la razón-F es mayor o igual que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media del esfuerzo último a tensión entre los dos tipos de adhesivo; por lo tanto, se cumple la hipótesis nula.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

Para la variable de la inclinación en las probetas con un valor-p igual a 0.0108 menor que 0.05 existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media del esfuerzo último a tensión y la inclinación presente en las probetas.

Tabla 31. Medias y error estándar para esfuerzo último a tensión por tipo de adhesivo e inclinación.

Variable	Casos	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
Tipo de adhesivo					
I420	3	2.377	0.437	1.519	3.235
I495	3	1.380	0.437	0.522	2.238
Total	6	1.878			
Inclinación					
0.5	1	3.270	0.014	3.143	3.397
1	2	2.170	0.010	2.080	2.260
1.5	1	1.160	0.014	1.033	1.287
1.8	1	0.820	0.014	0.693	0.947
2	1	1.680	0.014	1.553	1.807
Total	6	1.878			

Autoría propia.

Se realizó un modelo de regresión lineal para describir la relación entre el esfuerzo último a tensión y la inclinación presente en las probetas. La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

$$\sigma_{ut} = 3.58458 - 1.3125 \beta$$

Tabla 32. Coeficientes del modelo de regresión.

	Mínimos Cuadrados	Error	Estadístico	
Parámetro	estimado	estándar	T	Valor-P
Intercepto	3.585	0.560	6.400	0.003
Pendiente	-1.313	0.400	-3.278	0.031
Coefficiente de correlación	-0.854			
R-cuadrada	72.869			

Autoría propia.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 72.869% de la variabilidad en esfuerzo último a tensión. El coeficiente de correlación es igual a -0.853632, lo que indica una relación moderadamente fuerte entre las variables.

7.1.2.2 Probetas con junta adhesiva sin inclinación

Mediante el uso del software estadístico StartGraphics Centurion®, se realiza un análisis estadístico del efecto de los dos adhesivos Loctite 420® y Loctite 495 y de las dos geometrías – rectangular inclinada y cilíndrica – con la variable de inclinación controlada.

Tabla 33. Datos de esfuerzo último a tensión e inclinación en probetas para la selección de adhesivo.

Probeta	Geometría	Adhesivo	Esfuerzo último (MPa)
1	Trapezoidal	Loctite 420	3.84
2	Trapezoidal	Loctite 495	4.57
3	Trapezoidal	Loctite 420	2.42
4	Trapezoidal	Loctite 495	4.45
5	Trapezoidal	Loctite 420	5.07
6	Trapezoidal	Loctite 495	4.84
7	Cilíndrica	Loctite 420	2.29
8	Cilíndrica	Loctite 495	2.88
9	Cilíndrica	Loctite 420	2.95
10	Cilíndrica	Loctite 495	3.9
11	Cilíndrica	Loctite 420	1.91
12	Cilíndrica	Loctite 495	2.8

Autoría propia.

Debido a que el valor-p 0.1048 es mayor a 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de esfuerzo último a tensión y los dos tipos de adhesivos con un nivel de 95% de confianza. Sin embargo, debido a que el valor-p 0.0142 es menor a 0.05 para el tipo de junta, sí existe una diferencia estadísticamente significativa. Esta diferencia se analizará en la siguiente fase experimental. Por su parte, la interacción entre el tipo de junta y el pegamento no es estadísticamente significativa puesto que el valor-p 0.9715 es mayor a 0.05. Ver la Tabla 34.

Tabla 34. ANOVA para esfuerzo último a tensión por tipo de pegamento.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Tipo de adhesivo	2.05013	1	2.05013	3.34	0.1048
B: Tipo de junta	5.9643	1	5.9643	9.73	0.0142
INTERACCIONES					
AB	0.000833333	1	0.000833333	0	0.9715
RESIDUOS	4.9032	8	0.6129		
TOTAL (CORREGIDO)	12.9185	11			

Autoría propia.

Mediante el análisis estadístico previo y los datos obtenidos en la Tabla 28, se tomó la decisión de usar el adhesivo Loctite 495 ® para las siguientes fases experimentales, debido a que presenta mejor respuesta. Teniendo en cuenta los límites superiores, este tiene una resistencia a la tensión un 28% mayor que el Loctite 420 ®.

Tabla 35. Medias por mínimos cuadrados para esfuerzo último a tensión con intervalos de confianza del 95.0%.

			Error	Límite (MPa)	Límite (Mpa)
Nivel	Casos	Media	Estándar	Inferior	Superior
MEDIA GLOBAL	12	3.49			
Tipo de adhesivo					
Loctite 420	6	3.08	0.32	2.34	3.82
Loctite 495	6	3.91	0.32	3.17	4.64
Tipo de junta					
Cilíndrica	6	2.79	0.32	2.05	3.53
Trapezoidal	6	4.20	0.32	3.46	4.94
Tipo de adhesivo por tipo de junta					
Loctite 420, cilíndrica	3	2.38	0.45	1.34	3.43
Loctite 420, trapezoidal	3	3.78	0.45	2.73	4.82
Loctite 495, cilíndrica	3	3.19	0.45	2.15	4.24
Loctite 495, trapezoidal	3	4.62	0.45	3.58	5.66

Autoría propia.

7.1.3 Resumen resultados fase selección adhesivo

Estadísticamente, no se encontró diferencia entre el uso del adhesivo Loctite 420 ® y el Loctite 495 ®; sin embargo, estadísticamente, la inclinación en estas probetas es representativa a causa de los esfuerzos por flexión que se presentan en los ensayos de tensión. Al eliminar este factor de inclinación, hubo un aumento considerable en los esfuerzos últimos de tensión obtenidos. Estos se relacionan en la Tabla 26.

Tabla 36. Aumento porcentual de los esfuerzos últimos a tensión.

Adhesivo	Factor	Aumento porcentual
Loctite 420	media	58.91
	valor máximo	55.05
	valor mínimo	44.05
Loctite 495	media	229.95
	valor máximo	124.07
	valor mínimo	418.29
Total	media	121.74
	valor máximo	55.05
	valor mínimo	195.12

Autoría propia.

Para concluir, la elección del adhesivo se realizó teniendo en cuenta los datos de las probetas sin inclinación. Debido a la presencia de una menor desviación estándar con estos criterios, para la siguiente se elige como adhesivo fase el Loctite 495 ®.

7.2 Diseño de experimento: selección geometría de junta

7.2.1 Hipótesis

Las medias de los esfuerzos últimos obtenidos mediante el uso de las juntas con geometría trapezoidal y cilíndrica son diferentes entre sí.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Donde μ_1 representa la media de la junta con geometría trapezoidal y μ_2 la media de la junta con geometría cilíndrica.

7.2.2 Análisis estadístico

Con el apoyo del software estadístico StartGraphics Centurion®, se realizó un análisis estadístico del efecto de las geometrías trapezoidal y cilíndrica sobre la resistencia a la tensión de las juntas. Los datos para este análisis se relacionan en la Tabla 37 y la Tabla 38.

Tabla 37. Esfuerzos últimos a tensión (junta trapezoidal).

Probeta	Geometría	Esfuerzo de diseño (MPa)	Esfuerzo último (Mpa)
		Falla inicial	Falla final
1	Trapezoidal	1.21	2.51
2	Trapezoidal	1.86	3.50
3	Trapezoidal	1.05	1.87
4	Trapezoidal	1.26	3.51
5	Trapezoidal	0.67	1.60
6	Trapezoidal	1.43	2.84
7	Trapezoidal	0.72	1.96
8	Trapezoidal	1.42	2.42
9	Trapezoidal	0.85	1.49
10	Trapezoidal	1	3.90
11	Trapezoidal	2.52	3.07
12	Trapezoidal	1.6	3.24
13	Trapezoidal	0.9	2.62
14	Trapezoidal	2.37	2.79
15	Trapezoidal	1.4	3.71
16	Trapezoidal	1.5	3.18
17	Trapezoidal	1.05	3.31
18	Trapezoidal	1.72	3.48
19	Trapezoidal	0.9	2.60
20	Trapezoidal	1.96	3.63
21	Trapezoidal	1.8	3.90

Autoría propia.

Tabla 38. Esfuerzos últimos a tensión (junta cilíndrica).

Probeta	Geometría	Esfuerzo de diseño (MPa)	Esfuerzo último (Mpa)
		Falla inicial	Falla final
1	Cilíndrica	3.62	4.70
2	Cilíndrica	1.95	4.28
3	Cilíndrica	1.63	3.21
4	Cilíndrica	1.69	3.30
5	Cilíndrica	2.69	4.25
6	Cilíndrica	0.92	2.06
7	Cilíndrica	2.35	3.79
8	Cilíndrica	2.79	4.03
9	Cilíndrica	2.63	4.16

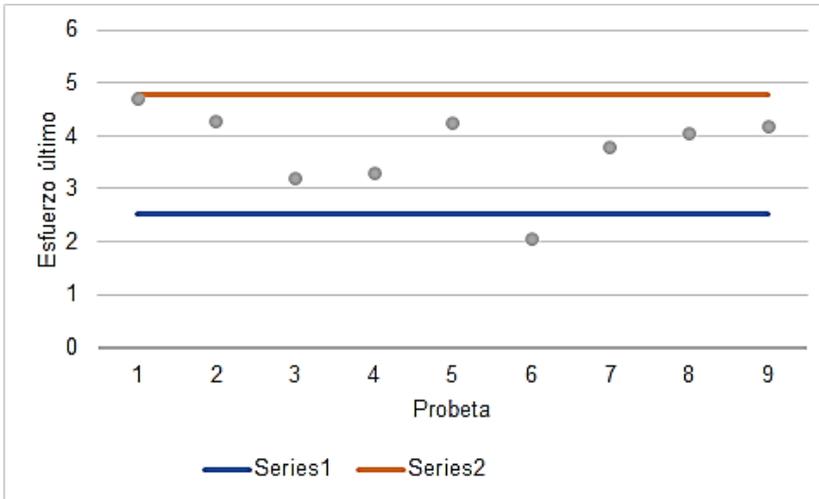
Autoría propia.

A partir de los datos obtenidos, y con base en los puntos centrales para cada geometría de las juntas representados en la Tabla 39, se realizó, con apoyo del software estadístico StartGraphics Centurion®, un análisis para verificar la probable existencia de valores atípicos. Para los datos de la geometría cilíndrica, se encontró, en la probeta 6, un valor atípico de 2.06 (Figura 20). Puesto que el valor-p 0.0147748 para la prueba de Grubb es menor que 0.05, este valor atípico de 2.06 es significativo con un nivel de significancia del 5.0%.

Tabla 39. Resumen estadístico valor atípico (geometría cilíndrica).

Recuento	5
Promedio	3.66
Desviación estándar	0.91
Mínimo	2.06
Máximo	4.25
Límite inferior	2.53
Límite superior	4.79

Autoría propia.

Figura 20. Datos atípicos con límites sigma de la geometría cilíndrica.

Autoría propia.

Se llevó a cabo un análisis estadístico para la comparación de los esfuerzos últimos y de diseño a tensión entre las geometrías trapezoidal y cilíndrica de juntas, como se aprecia en la Tabla 37 y la Tabla 38. Puesto que los valores-p 0.0010 y 0.0014 son menores que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos geometrías, con un nivel del 95.0% de confianza. El resumen del anterior análisis se relaciona en la Tabla 40 y la Tabla 41.

Tabla 40. ANOVA comparación de geometrías de juntas (esfuerzo último).

Fuente	Suma de Cuadrados	G1	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	6.44	1.00	6.44	13.75	0.0010
Intra grupos	12.64	27.00	0.47		
Total (Corr.)	19.08	28.00			

Autoría propia.

Tabla 41. ANOVA comparación de geometrías de juntas (esfuerzo de diseño).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	4.68	1.00	4.68	12.65	0.0014
Intra grupos	10.36	28.00	0.37		
Total (Corr.)	15.04	29.00			

Se estableció una comparación entre las medias de los esfuerzos últimos y de diseño a tensión para cada geometría. En los resultados se observa que la media de las juntas con geometría cilíndrica ofrece mayor resistencia última a la tensión, tal como aparece en la Figura 38. Por otro lado, el resumen del análisis está relacionado en la Tabla 42.

Tabla 42. Resumen estadístico comparación de medias.

Esfuerzo último				
Geometría	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
Trapezoidal	2.91	0.15	2.69	3.13
Cilíndrica	3.97	0.24	3.61	4.32
Total	3.2			
Esfuerzo de diseño				
Trapezoidal	1.39	0.13	1.20	1.58
Cilíndrica	2.25	0.2	1.96	2.55
Total	1.64			

Autoría propia.

Para la geometría trapezoidal se concluyó, estadísticamente, que las variables con mayor influencia son la inclinación y la longitud. Mediante el modelo de regresión realizado, para un aumento de la inclinación se predice un aumento del esfuerzo último a tensión. Teóricamente, para esta zona el mejor resultado estaría dado para un ángulo de inclinación de 82° y una longitud de 10 mm, con un esfuerzo último 8.14 MPa.

$$\sigma_{ut} = 0.95133 l - 0.0453322 l^2 + 0.000470313 \beta^2 \quad (4)$$

Estadísticamente, para la geometría cilíndrica se extrajo que las variables con mayor influencia son el radio y la altura (ver Figura 11). A través del modelo de regresión realizado, con el aumento de la altura se predice un incremento del esfuerzo último a tensión. Teóricamente, para esta zona el mejor resultado estaría dado para un radio de 5 mm y una altura de 1 mm, con un esfuerzo último de 11.32 MPa; sin embargo, para este mismo radio y una altura de 4mm, se predice un esfuerzo último de 10.71 MPa.

$$\sigma_{ut} = 10.8839 r - 16.3129 h - 1.20028 r^2 + 3.22174 h^2 \quad (5)$$

7.2.3 Resumen de resultados de caracterización

Existe una diferencia entre los dos tipos de geometrías de juntas respecto al esfuerzo último de tensión. Las juntas con geometría cilíndrica ofrecen mayor resistencia a la tensión en comparación con las juntas con geometría trapezoidal, tomando como criterio los resultados obtenidos en el análisis estadístico de comparación de medias. Adicionalmente, se obtuvo como resultado que la media de las juntas con geometría cilíndrica es 7.1% más eficiente en comparación con la media de las juntas con geometría trapezoidal. Teniendo en cuenta estos resultados y las proyecciones de los modelos de regresión, se determina continuar a la fase de optimización utilizando las juntas con geometría cilíndrica.

7.3 Diseño de experimento: optimización

Para el ascenso pronunciado, y a partir del modelo de regresión para la geometría cilíndrica (2), se obtuvieron los valores para las variables experimentales relacionados en la Tabla 43. Para el ascenso pronunciado de la primera dirección se utilizaron los puntos centrales del anterior experimento como puntos de partida, con radio de 4.5 mm y altura de 2.5 mm; para la segunda dirección, por otro lado, se utilizaron los puntos de la probeta 1, con radio de 7 mm y altura de 1mm, y se usaron las ecuaciones (6) y (7).

$$r_2 = r + k (10.8839 - 2.40056 r) \quad (6)$$

$$h_2 = h + k (6.44348 h - 16.3129) \quad (7)$$

Tabla 43. Puntos para ascenso pronunciado.

R	h	k	r2	h2
2.50	4.50	0.06	4.81	3.30
2.50	4.50	0.13	5.15	4.20
2.50	4.50	0.20	5.45	5.00
7.00	1.00	0.04	6.80	0.65
7.00	1.00	0.07	6.60	0.30
7.00	1.00	-	0.00	0.00

Autoría propia.

Para la caracterización de la zona más alta del ascenso pronunciado se decidió utilizar un diseño equiradial hexagonal con tres puntos centrales; esto se relaciona en la Tabla 10. Como punto de partida y punto central, se usó la geometría cilíndrica de radio 5.15 mm y altura 4.20 mm.

7.3.1 Análisis estadístico

7.3.1.1 Ascenso pronunciado

Con el apoyo del software estadístico StartGraphics Centurion®, se ejecutó un análisis estadístico. Los datos para este análisis están reflejados en la Tabla 44.

Tabla 44. Esfuerzo último y de diseño (ascenso pronunciado).

Secuencia de prueba	Número de corrida	Factor		Esfuerzo último (MPa)	Esfuerzo de diseño (MPa)
		Radio (mm)	Altura (mm)		
Ascenso pronunciado A					
1	6	4.80	3.30	5.19	3.51
2	4	5.15	4.20	5.36	3.46
3	5	5.45	5.00	4.60	3.76
Ascenso pronunciado dirección B					
4	2	6.80	0.65	5.10	3.49
5	3	6.60	0.30	5.33	4.62
6	1	0.00	0.00	5.53	3.02

Autoría propia.

Se hizo, también, la comparación entre los resultados de esfuerzo último y de diseño del ascenso pronunciado. Ya que los valores-p 0.3604 y 0.7965 son mayores que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos variables con un nivel del 95.0% de confianza. Se puede reafirmar esto al observar el gráfico de comparación de las medias. El resumen del anterior análisis está relacionado en la Tabla 45 y la Tabla 46.

Tabla 45. ANOVA ascenso pronunciado (esfuerzo último).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.11	1.00	0.11	1.06	0.3604
Intra grupos	0.41	4.00	0.10		
Total (Corr.)	0.52	5.00			

Autoría propia.

Tabla 46. ANOVA ascenso pronunciado (esfuerzo de diseño).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.03	1.00	0.03	0.08	0.7965
Intra grupos	1.40	4.00	0.35		
Total (Corr.)	1.43	5.00			

Autoría propia.

Se compararon las medias de los esfuerzos últimos y de diseño a tensión, entre el ascenso pronunciado, para dirección de altura ascendente y descendente. Lo anterior está relacionado en la Tabla 57.

Tabla 47. Resumen estadístico comparación de medias.

Esfuerzo último				
Geometría	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
Trapezoidal	2.91	0.15	2.69	3.13
Cilíndrica	3.97	0.24	3.61	4.32
Total	3.2			
Esfuerzo de diseño				
Trapezoidal	1.39	0.13	1.20	1.58
Cilíndrica	2.25	0.2	1.96	2.55
Total	1.64			

Autoría propia.

7.3.1.2 Caracterización de la cima del ascenso pronunciado

Con el uso del software estadístico StartGraphics Centurion ®, se adelanta un análisis estadístico. Los datos para este análisis se relacionan en la Tabla 48.

Tabla 48. Esfuerzo último y de diseño (caracterización de la cima del ascenso pronunciado).

Probeta	Geometría	Esfuerzo de diseño (MPa)	Esfuerzo último (MPa)
		Falla inicial	Falla final
1	Cilíndrica	4.34	3.03
2	Cilíndrica	4.13	2.34
3	Cilíndrica	5.02	3.42
4	Cilíndrica	4.36	3.88
5	Cilíndrica	4.28	2.25
6	Cilíndrica	4.35	3.86
7	Cilíndrica	4.38	3.82
8	Cilíndrica	4.06	3.07
9	Cilíndrica	5.36	3.46

Autoría propia.

A partir de los anteriores datos, se obtiene un modelo de regresión que explica la variabilidad del esfuerzo último con un 99.88% de exactitud (8). En vista de que el valor-p para las variables de radio y altura (0.0001 y 0.0079, respectivamente, como se aprecia en la Tabla 49) son mayores a 0.05, estas son estadísticamente significativas con un nivel de confianza de 95.0%.

$$\sigma_{ut} = 0.0582382 r^2 + 1.34572 h \quad (8)$$

Tabla 49. ANOVA caracterización de la cima del ascenso pronunciado.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Radio	621.82	1	621.82	4820.75	0.0001
Altura	1.97	1	1.97	15.27	0.0079
Total (Corr.)	623.79	2			

Autoría propia.

El aumento del radio y altura para esta zona caracterizada implica un aumento del esfuerzo último. Para una probeta de radio 5.45 mm y altura 4.6 mm se predice un esfuerzo de 6.98 MPa, que sería el mayor dentro de esta zona. Lo anterior implica, a su vez, que estas sean las dimensiones de la probeta óptima, la cual será analizada a continuación.

7.3.1.3 Probeta óptima

Se analizaron, estadísticamente, dos posibles probetas óptimas: la primera probeta, con geometría cilíndrica de radio 5.45 y altura 4.6; la segunda, sin geometría entrelazada. Se realizaron seis ensayos de tensión: tres para P_{ogc} y tres para P_{osg}. Los resultados se observan en la Tabla 50.

Tabla 50. Esfuerzo último y de diseño, probetas óptimas.

Probeta	Geometría	Esfuerzo último (MPa)	Esfuerzo de diseño (MPa)
1	Cilíndrica	5.78	4.43
2	Cilíndrica	6.54	6.16
3	Cilíndrica	5.78	4.45
4	-	5.47	2.95
5	-	5.38	2.52
6	-	5.53	3.02

Autoría propia.

Con el apoyo del software estadístico StartGraphics Centurion[®], se ejecutó un estadístico para la comparación de los esfuerzos últimos y de diseño a tensión, entre las probetas óptimas. Puesto que el valor-p 0.0896 es mayor que 0.05, no existe una diferencia estadísticamente significativa con un nivel del 95% de confianza, para los esfuerzos últimos. Sin embargo, debido a que el Valor-P 0.0213 es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa con un nivel del 95% de confianza, para los esfuerzos de diseño. El resumen del anterior análisis se relaciona en la Tabla 52 y Tabla 51.

Tabla 51. ANOVA esfuerzo último (probetas óptimas).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.49	1.00	0.49	4.97	0.0896
Intra grupos	0.40	4.00	0.10		
Total (Corr.)	0.89	5.00			

Autoría propia.

Tabla 52. ANOVA esfuerzo de diseño (probetas óptimas).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	7.15	1.00	7.15	13.50	0.0213
Intra grupos	2.12	4.00	0.53		
Total (Corr.)	9.27	5.00			

Autoría propia.

Se realizó una comparación de las medias de los esfuerzos últimos y de diseño a tensión, para las probetas óptimas con geometría y sin geometría, en los resultados se observa que la media de las juntas con geometría cilíndrica ofrece mayor resistencia al esfuerzo de diseño a tensión, sin embargo, no hay diferencias entre las medias al esfuerzo último a tensión. El resumen del análisis está relacionado en la Tabla 53.

Tabla 53. Resumen estadístico comparación de medias (probetas óptimas).

Esfuerzo último				
Geometría	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
-	5.46	0.18	5.10	5.82
Cilíndrica	6.03	0.18	5.68	6.39
Total	5.75			
Esfuerzo de diseño				
-	2.83	0.42	2.00	3.65
Cilíndrica	5.01	0.42	4.19	5.84
Total	3.92			

Autoría propia.

7.3.2 Resumen de resultados probeta óptima

Se observa, en la Figura 43, que para el esfuerzo último ambas probetas pueden ser consideradas óptimas; sin embargo, debido a que estadísticamente el esfuerzo de diseño es mayor, y su media y límites son mayores, se tomó la decisión de escoger como probeta óptima la que tiene junta geométrica.

7.4 Verificación dimensional

Las dimensiones de las probetas cumplen con la tolerancia de ± 0.5 mm especificada en la norma ASTM D638-03, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic" (ASTM, 2014). Para las dimensiones probeta base, ver la Tabla 54. Para la fase 1, selección de adhesivos, ver Tabla 55 y la Tabla 56. Para la fase 2, selección de geometría, ir a la Tabla 57 y la Tabla 58. Por último, para la fase 3 (ascenso pronunciado, caracterización y optimización), ver la Tabla 59, la Tabla 60 y la Tabla 61, respectivamente.

Tabla 54. Dimensiones probetas base.

Probetas base	Dimensiones (mm)				
	W	L	WO	LO	T
1	19.0	57.0	29.0	245.8	9.9
2	19.0	56.9	29.0	246.0	10.1
3	18.8	56.7	29.0	246.0	10.0

Autoría propia.

Tabla 55. Dimensiones de probetas con junta trapezoidal (experimento de selección de adhesivo).

Probeta	Dimensiones (mm)								
	W	L	WO	LO	T	l	a	H	β (°)
1	18.8	57.0	29.0	245.9	10.1	8.6	15.3	2.3	85.2
2	18.7	56.9	28.8	246.0	9.9	8.7	15.3	2.4	84.7
3	19.0	56.9	28.9	245.8	98.0	8.6	15.4	2.3	84.9
4	18.8	56.9	28.7	246.0	10.0	8.7	15.2	2.4	85.1
5	18.8	56.9	29.0	246.0	9.7	8.7	15.3	2.4	84.7
6	18.8	56.8	28.8	245.8	10.2	8.6	15.4	2.3	84.9
7	18.7	56.9	28.7	246.0	10.0	8.7	15.2	2.4	85.1
8	18.8	56.9	28.9	245.7	9.8	8.7	15.3	2.4	84.7
9	18.7	56.8	29.0	245.9	9.9	8.6	15.3	2.3	85.2
10	19.0	56.9	28.8	245.8	9.8	8.7	15.3	2.4	84.7
11	18.7	56.9	28.9	245.9	10.0	8.7	15.3	2.4	84.7
12	19.0	56.8	29.0	245.7	9.8	8.6	15.3	2.3	85.2

Autoría propia.

Tabla 56. Dimensiones de probetas con juntas cilíndricas (experimento de selección de adhesivo).

Probeta	Dimensiones (mm)						
	W	L	WO	LO	T	r	h
1	19.0	56.9	28.8	246.0	9.7	4.4	2.5
2	18.9	57.1	28.8	245.5	10.0	4.5	2.5
3	18.9	56.8	28.8	246.0	9.9	4.4	2.4
4	18.9	56.9	29.0	245.7	9.8	4.5	2.4
5	19.1	57.0	28.7	245.5	9.8	4.5	2.6
6	19.2	56.8	29.0	245.8	10.1	4.5	2.6

Autoría propia.

Tabla 57. Dimensiones de probetas con junta trapezoidal para el experimento de selección de geometría de la junta.

Junta trapezoidal	Dimensiones (mm)								
	W	L	WO	LO	T	l	A	h	β (°)
1	18.7	56.8	29.0	245.8	9.9	5.0	5.0	1.0	52.3
2	18.9	57.0	28.8	246.0	10.0	13.9	4.8	1.0	51.9
3	19.0	56.9	28.9	245.9	9.8	5.0	13.9	1.1	52.1
4	18.9	56.9	29.0	246.0	9.9	14.0	14.1	1.0	51.8
5	18.9	57.0	28.7	245.8	9.7	5.0	5.0	3.0	52.2
6	19.0	56.9	29.0	246.0	9.8	13.9	5.0	2.9	52.0
7	18.9	57.0	28.9	245.9	9.9	4.9	14.0	3.0	52.1
8	19.0	57.0	29.0	246.0	10.0	14.0	13.8	3.0	51.9
9	18.9	56.9	28.9	246.0	10.1	5.0	4.9	1.1	88.2
10	19.0	56.8	28.9	245.8	10.2	14.0	5.0	1.0	87.9
11	18.7	57.0	28.8	245.9	9.9	5.0	14.0	0.9	88.1
12	19.0	56.9	28.7	245.9	9.8	14.0	13.9	1.1	88.1
13	18.8	56.7	29.0	246.0	9.7	5.0	5.0	3.0	88.1
14	19.0	57.0	29.0	245.8	9.8	13.8	5.0	2.9	87.9
15	18.8	57.0	29.0	246.0	10.1	5.0	14.0	2.9	88.2

16	19.0	57.0	28.7	246.0	10.0	14.0	14.0	2.8	87.9
17	18.9	56.9	29.0	245.8	9.8	9.5	9.5	1.9	70.1
18	19.0	56.9	29.0	245.9	9.7	9.6	9.5	2.0	70.3
19	18.9	56.8	28.9	246.0	10.2	9.5	9.3	2.1	70.0
20	18.9	57.0	29.0	246.0	9.8	9.6	9.6	1.9	70.2
21	19.0	57.0	28.7	246.0	9.9	9.5	9.4	2.2	64.9

Autoría propia.

Tabla 58. Dimensiones de probetas con juntas cilíndricas para el experimento de selección de geometría de la junta.

Junta cilíndrica	Dimensiones (mm)						
	W	L	WO	LO	T	r	h
1	19.0	57.0	28.8	246.0	10.0	7.0	1.0
2	19.0	57.0	28.8	245.5	9.8	2.1	4.0
3	19.0	56.9	28.8	246.0	9.7	7.0	4.0
4	18.9	56.9	29.0	246.0	9.9	2.0	1.0
5	18.9	57.0	28.7	245.7	9.9	4.5	2.5
6	19.0	56.8	28.8	246.0	10.0	4.5	2.5
7	18.9	57.0	29.0	246.0	10.0	4.5	2.5
8	18.9	57.0	28.7	245.9	10.2	4.5	2.5
9	19.0	56.8	29.0	245.8	10.1	4.5	2.5

Autoría propia.

Tabla 59. Dimensiones de probetas con juntas cilíndricas (ascenso pronunciado).

Junta cilíndrica	Dimensiones (mm)						
	W	L	WO	LO	T	r	h
1	19	57	28.8	246	9.9	4.80	3.30
2	19.2	56.9	28.8	245.5	10	5.15	4.20
3	18.8	57	28.8	246	9.7	5.45	5.00
4	18.9	56.9	29	246	9.9	6.80	0.65
5	18.9	57.1	28.7	245.7	9.9	6.60	0.30
6	19.4	56.8	28.8	246	10.4	0.00	0.00

Autoría propia.

Tabla 60. Dimensiones de probetas con junta cilíndrica (caracterización de la cima del ascenso pronunciado).

Junta cilíndrica	Dimensiones (mm)						
	W	L	WO	LO	T	r	h
1	18.7	57.1	29	246	9.7	5.15	4.6
2	19.2	56.8	28.9	245.5	10	5.15	3.8
3	18.8	57	28.8	246	9.7	5.45	4.4
4	18.7	56.9	29	246	9.6	5.45	4
5	19.1	57.1	28.9	245.8	9.9	4.85	4
6	18.9	57	29.1	245.9	9.8	4.85	4.4
7	18.6	57	29.2	246	9.6	5.15	4.2
8	18.9	57.1	28.7	245.7	9.9	5.15	4.2
9	19.2	56.9	28.8	246	10	5.15	4.2

Autoría propia.

Tabla 61. Dimensiones de probetas óptimas.

Junta cilíndrica	Dimensiones (mm)						
	W	L	WO	LO	T	r	h
1	18.6	57.1	29	246	9.7	5.45	4.6
2	18.6	56.8	28.9	245.5	9.5	5.45	4.6
3	18.6	57	28.8	246	9.7	5.45	4.6
4	19	56.9	29	246	10	0	0
5	18.9	57.1	28.7	245.7	9.5	0	0
6	19.4	56.9	28.8	246	10.4	0	0

Autoría propia.

Los autores

Sergio Quintana González y Erwin Molino Álvarez son ingenieros mecánicos de la Universidad del Atlántico, egresados en 2019 y 2020, respectivamente. Su proyecto de grado se tituló “Estudio experimental y optimización de juntas pegadas de piezas impresas en 3D con interfaz de superficie entrelazada”. Productos de ese proyecto son el presente libro y un programa llamado CALCULADORA 3D J V2.0, que calcula el esfuerzo último a tensión presente en las juntas mecánico-adhesivas para piezas impresas en 3D fabricadas con acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) mediante el modelado por deposición fundida (FDM), para dos tipos de juntas, trapezoidal y cilíndrica, y dos tipos de adhesivos: loctite 420 y 495 ®. CALCULADORA 3D J V2.0 fue registrado ante la Dirección Nacional de Derechos de Autor en Colombia en noviembre de 2019.

Luis Lisandro López Taborda es, desde 2015, profesor asistente en el área de Diseño Mecánico del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Atlántico, misma *alma máter* donde había obtenido el grado de ingeniero mecánico en 2006. En 2012 se graduó de magíster en Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte. Allí mismo comienza sus estudios de doctorado en Ingeniería Mecánica, que actualmente está cursando. Su tesis doctoral está relacionada con el diseño y fabricación con impresión 3D. Cuenta con trece años de experiencia profesional repartidos en las áreas académica e industrial; pertenece a diferentes grupos de investigación de diseño, materiales y procesos de la

Universidad del Atlántico, la Universidad Autónoma del Caribe y la empresa 3D Ingeniería BQ SAS. En la actualidad trabaja en temas de investigación asociados con el diseño, caracterización mecánica y de proceso del modelado por deposición fundida (FDM), cooperando con otros investigadores de grupos de investigación de la Universidad del Norte, la Universidad Autónoma del Caribe y la empresa 3D Ingeniería BQ SAS.

Enrique Esteban Niebles Núñez es profesor del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma del Caribe y líder del grupo de investigación IMTEF, avalado por la Universidad Autónoma del Caribe y la Universidad del Atlántico. Doctor en Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte en 2014, magíster en Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte en 2006, ingeniero industrial de la Universidad Autónoma del Caribe en 2002, licenciado en Matemáticas y Física de la Universidad del Atlántico en 1995 y técnico profesional en Soldadura del SENA Centro Colombo-Alemán en 2002, suma veinticinco años de experiencia repartidos en las áreas técnica profesional, académica e industrial. Su proyecto de grado de Maestría estuvo enmarcado en el área de metodología de diseño aplicada a productos fabricados con soldadura. Su tesis doctoral se relaciona con la caracterización mecánica de procesos de soldadura. En la actualidad, trabaja principalmente en temas de investigación afines a la fabricación por soldadura en metales y plásticos (FDM).