

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán

Licenciatura en Tecnología



## “DISEÑO Y MANUFACTURA DE HERRAMENTAL PARA FABRICACIÓN DE PROBETAS EMPLEADAS EN INVESTIGACIÓN DE UNIONES ADHESIVAS”

Tesis que para obtener el grado de:  
Licenciatura en Tecnología

P R E S E N T A

Dulce Nayeli Marin Galicia

TUTOR PRINCIPAL

Dr. Saúl Daniel Santillán Gutiérrez.

COASESOR

Dr. Celso Eduardo Cruz González.

DEPENDENCIA DONDE SE REALIZÓ EL TRABAJO:

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI.

Cuautitlán Izcalli, Estado de México, Octubre del 2019.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Jurado Asignado

Presidente: Dr. Saúl Santillán Gutiérrez.

Secretario: M. en I. Miguel de Narareth Pineda Becerril.

Vocal: M. en I. Sergio Martín Durán Guerrero.

1er. Suplente: M. en C. Gabriela del Pilar Rangel Gabela.

2do. Suplente: Ing. Rosendo Ramírez Ortiz.

UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán..

Dr. Saúl Daniel Santillán Gutiérrez

**NOMBRE**

---

**FIRMA**

# Agradecimientos

Al personal de la gerencia de Manufactura y Procesos Especiales de CIDESI Estado de México por el apoyo recibido para la realización de este proyecto.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser mi alma máter.

Al Ing. Víctor García de ASI-HV Fuller por su apoyo en la donación de muestras de adhesivo.

Al Ing. Alan Zamora Azua de Soluciones y Calibraciones por su apoyo en pruebas de materiales.

A la Ing. Adriana Berenice García de vinculación externa del CIDESI, por apoyarme en el proceso administrativo para integrarme al centro.

Al Ing. Miguel Ángel Martínez Lara por su atención y seguimiento administrativo en la sede Estado de México.

Al M. en I. Diego Sánchez García por ser un excelente profesor, por compartir su conocimiento y siempre estar dispuesto a esclarecer mis dudas, por su paciencia y por las platicas en los pasillos de la facultad.

A mi coordinadora la L.T Adela Huitrón por apoyarme en todos los sentidos, por su paciencia y su buena disposición.

Al Dr. Saúl Santillan por siempre tener la mejor disposición y confiar en mi trabajo.

Al Dr. Celso por creer en mi y depositar su confianza, por ser mi mentor y enseñarme la importancia de la excelencia, la resiliencia, y el compromiso, por compartir su conocimiento, pero sobre todo por enseñarme a ser excelente persona, mostrarme fiel a mis ideales y disfrutar la vida con las pequeñas (pero no menos importantes) cosas que te hacen feliz.

A México, la nación humana y generosa que deseamos y luchamos construir.



# Dedicatoria

A mis padres, Martha Galicia Aguilar y Raymundo Marín Rojas, les agradezco cada momento en que me alentaron a terminar y levantarme cada día; a mi mamá por enseñarme todo lo que sé en la vida, por ser mi ejemplo y siempre alentarme a perseguir mis sueños, gracias por tanto cariño y amor, espero la vida me alcance a devolverte un poco de todo lo que me has dado, a mi papá por enseñarme a ser responsable, por aportar su esfuerzo y trabajo para que pudiera tener la oportunidad de asistir a la escuela, por su cariño y su buen humor, los amo.

A mis hermanos Citlalli y Alberto, por inspirarme a ser grande y superar todo, con quienes he compartido toda una vida de momentos increíbles siempre en mi corazón. Esto es gracias a ustedes.

A mi amiga Leilani que siempre creyó en mí y me dio siempre su cariño, amistad y fuerza para continuar.

A mis amigas Yaylen, Alondra, Marisol, Karla, Michel, América y Edgar por ser lxs mejores, por formar una parte muy importante en mi vida, que bueno que nos conocimos.

A las amistades que forme en el CIDESI, Marlet, Luigi, Pandix, Lalito, Judith, Mariu, Armando, Kathy, Charlie.

Y a C.A por su cariño y amor.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del Problema . . . . .	2
1.2. Justificación . . . . .	2
1.3. Objetivo General . . . . .	2
1.3.1. Objetivos Específicos . . . . .	2
1.4. Hipótesis . . . . .	3
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	4
2.2. Adhesivos . . . . .	5
2.3. Teorías de Adhesión . . . . .	5
2.4. Juntas Adhesivas . . . . .	6
2.4.1. Tipos de Juntas Adhesivas . . . . .	7
2.4.2. Mecanismo de falla de las Juntas Adhesivas . . . . .	7
2.5. Análisis Mécanico . . . . .	8
2.5.1. Modelo Físico Diferencial . . . . .	8
2.6. Diseño Asistido por Computadora CAD . . . . .	10
2.7. Manufactura Asistida por Computadora CAM . . . . .	10
2.8. Metrología para Ingeniería de Manufactura . . . . .	11
<b>3. Materiales y Métodos</b>	<b>12</b>
3.1. Materiales . . . . .	12
3.1.1. Materiales para fabricación de herramental . . . . .	12
3.1.2. Materiales para fabricación de probetas para evaluación dimensional . . . . .	12
3.2. Metodología utilizada para el diseño . . . . .	14
3.2.1. Desarrollo Conceptual . . . . .	14
3.2.2. Desarrollo de Prototipo. . . . .	16
3.2.3. Realización de Prototipo. . . . .	18
3.3. Control y validación de herramental por medio de pruebas físicas. . . . .	18
3.3.1. Inspección dimensional (espesor de la película de adhesivo y geometría) de probetas de cortante SLS's. . . . .	18
<b>4. Resultados</b>	<b>20</b>
4.1. Diseño Asistido por computadora . . . . .	20
4.1.1. Placa base acero SAE/AISI 4140. . . . .	20
4.1.2. Sujetador . . . . .	21
4.1.3. Placa de Sujeción . . . . .	22
4.1.4. Simulación del Ensamble del prototipo. . . . .	22

4.2. Manufactura Avanzada . . . . .	23
4.2.1. Placa base acero SAE/ASIS 4140. . . . .	23
4.2.2. Sujetador Superior. . . . .	24
4.2.3. Elemento opresor. . . . .	25
4.2.4. Componente total de sujeción. . . . .	26
4.3. Control y validación de herramental por medio de pruebas físicas. . . . .	26
4.3.1. Ensayos físicos sobre probetas de junta de traslape simple (SLJs). . . . .	26
4.3.2. Inspección dimensional del espesor de la película de adhesivo. . . . .	27
4.3.3. Ensayo de tracción ASTM D10002. . . . .	28
4.3.4. Inspección visual modos de falla. . . . .	30
4.3.5. Caracterización de la fractura por medio de observaciones en el SEM. . . . .	32
<b>5. Discusión de los resultados</b>	<b>35</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>38</b>
<b>Anexos</b>	<b>42</b>
<b>A. Planos de diseño a detalle del herramental.</b>	<b>43</b>
<b>B. Reporte dimensional realizado en el laboratorio de metrología de CIDESI.</b>	<b>51</b>
<b>C. Repetibilidad del espesor de la película del adhesivo MP 55420 a 0.3, 1.0, 1.5 mm.</b>	<b>52</b>

# Índice de figuras

2.1. Molde Preparación de juntas de solape con adherencias planas imagen obtenida de [6]	4
2.2. Molde Preparación de juntas de solape con adherencias planas imagen obtenida de [8]. . . . .	5
2.3. a) Ilustración Junta Adhesiva, b) Junta con dimensiones sugeridas por la norma ASTM D1002 [12]. . . . .	6
2.4. Tipos de configuración en juntas adhesivas. Obtenido de[13]. . . . .	7
2.5. Modos de falla de las uniones adhesivas. Obtenido de [14]. . . . .	8
2.6. Análisis Mecánico y fuerzas aplicadas en el elemento diferencial [14]. . . . .	10
2.7. Representación de cotas en un dibujo técnico. . . . .	11
3.1. Gráfica esfuerzo-micro-deformación adhesivo MP 55420 metil metacrilato. . . . .	13
3.2. Metodología. 1) Desarrollo Conceptual, 2) Desarrollo Prototipo, 3) Implementar Prototipo. . . . .	14
3.3. Croquis distribución distancias de traslape. . . . .	15
3.4. Distribución de barrenos de alineación a) barreno de referencia b) patrón de pines de alineación. . . . .	16
3.5. Posicionamiento de barrenos a) sujetador, b) tope móvil. . . . .	16
3.6. a) Cara Superior, b) Cara inferior, c) Cero Pieza ubicada en el centro. . . . .	17
4.1. Representación de probetas a) 6.25 b) 12.5 c) 25 d) 50 mm. . . . .	20
4.2. Patrón de pines de alineación final a) barrenos cara superior b)vaciado cara inferior. . . . .	21
4.3. Vista isométrica placa base acero SAE/AISI 4140[21]. . . . .	21
4.4. Sujetador a) elemento para posicionar, b) elemento opresor, c) unión de elementos, d) ensamble. . . . .	21
4.5. Sujetador vista isométricas cuerpo de alambre. . . . .	22
4.6. Placa de sujeción a) vista superior, b) vista isométrica. . . . .	22
4.7. Ensamble componente total de sujeción. . . . .	22
4.8. Simulación ensamble final de Herramental para fabricación de probetas estándar ASTM D1002 [1]. . . . .	23
4.9. Ruta de maquinado: a) planeado, b) tope superior, c) barrenos, d) vaciado. . . . .	23
4.10. Placa Base A4041. a) Cara inferior, b) cara superior c) vista isométrica, d) vista superior. . . . .	24
4.11. Ruta de maquinado en código G MasterCam. . . . .	24
4.12. Pieza Sujetador: a) Acabado superior, b) corrida de piezas terminada, c) perfil isométrico, d) vista frontal. . . . .	25
4.13. Pieza final elemento opresor: a) Vista isométrica, b) vista frontal. . . . .	25
4.14. Componente total de ensamble: a) Placa de sujeción, b) componente total vista superior c) vista lateral. . . . .	26

4.15. Posicionamiento de las probetas en herramental. a) Vista superior, b) alienación, c) ajuste de herramental. . . . .	26
4.16. Deposición de adhesivo en la superficie MP 55420 siguiendo las recomendaciones de [1]. . . . .	27
4.17. Medición de espesores de la película de adhesivo mediante sistema óptico para espesores de a) 0.30 mm, b) 1.0 mm y c) 1.5 mm. . . . .	27
4.18. Medición de espesores de la película de adhesivo mediante sistema óptico para espesores de a) 0.30 mm, b) 1.0 mm y c) 1.5 mm. . . . .	28
4.19. Gráfico de carga vs desplazamiento de probetas unidas con MP55420 con diferentes espesores de película de adhesivo. . . . .	29
4.20. Resultados de carga máxima y desplazamiento de las probetas unidas con MP55420 con diferentes espesores de película de adhesivo. . . . .	30
4.21. Vista superior y lateral para uniones con espesores de película de adhesivo de a) 0.30mm, b) 1.0mm y c) 1.5mm. . . . .	31
4.22. Superficie de fractura de las probetas a) 1.0mm y b) 1.5mm en donde se puede apreciar la presencia de porosidad. . . . .	31
4.23. SEM Micrografías de la superficie parte borde: a) espesor 0.3mm a 100x, b)espesor 1.0mm a 100X, c) espesor 1.5mm a 100X, d) espesor 3.0mm a 500X, e) espesor 1.0mm a 500X, f)espesor 1.5 a 500X, g)espesor 0.3mm a 3000X, h)espesor 1.0mm a 3000X, i) espesor 1.5mm a 3000X. . . . .	33
4.24. SEM Micrografías de la superficie parte interna centro: a) espesor 0.3mm a 100X, b)espesor 1.0mm a 100X, c) espesor 1.5mm a 100X, d) espesor 3.0mm a 500X, e) espesor 1.0mm a 500X, f)espesor 1.5 a 500X, g)espesor 0.3mm a 3000X, h)espesor 1.0mm a 3000X, i) espesor 1.5mm a 3000X. . . . .	34
5.1. Distribución del esfuerzo normal a lo largo del traslape de las probetas unidas con MP55420 con diferentes espesores de la película de adhesivo [29] . . . . .	36
5.2. Distribución del esfuerzo cortante a lo largo del traslape de las probetas unidas con MP55420 con diferentes espesores de la película de adhesivo [29]. . . . .	37

# Índice de tablas

3.1. Propiedades mecánicas de MP 55420 (25°C) . . . . .	13
4.1. Resultados de la inspección dimensional de las probetas ASTM D1002. . . . .	28

# Capítulo 1

## Introducción

El presente trabajo de tesis, trata sobre el diseño y manufactura de un herramental orientado en controlar parámetros geométricos de probetas utilizadas en la investigación de uniones adhesivas forma parte del estudio y desarrollo del comportamiento de esta estructura en el campo de la mecánica de materiales, esto con el fin de fabricar muestras estandarizadas que cumplan con la norma emitida por la ASTM, la ASTM D1002 [1].

En este sentido, verificar los datos geométricos obtenidos del proceso de adhesión empleando el herramental es uno de los objetivos que se persigue en la investigación ya que disminuir el porcentaje de error en la metodología del proceso representa la disminución de la variación de las posibles variables a controlar, así como controlar el espesor a diferentes medidas nos indica la relación entre el espesor y el esfuerzo de la junta adhesiva.

La reciente tendencia por generar procesos y productos amigables con el medio ambiente ha impulsado medidas más comprometidas con el medio ambiente, como políticas nacionales e internacionales que realizan importantes esfuerzos a nivel de investigación y normas para conseguir avances tecnológicos que ayuden a generar menos daño en el entorno, en específico la industria automotriz ha impulsado una ley que regula la emisión de  $CO_2$  en los vehículos la hace a través de un estándar “Corporate Average Fuel Economy” (CAFE) por sus siglas en inglés que promueve a mejorar la economía de los combustibles, y junto con el gobierno americano el consumo de estos, limitando las emisiones en un modelo hacia el año 2025 donde los fabricantes de automóviles estadounidenses estarán obligados por ley producir una eficiencia de combustible promedio [2].

Esta tendencia ha llevado a los investigadores a desarrollar materiales que cumplan con las actuales exigencias, que el proceso y el producto generé el menor daño o consecuencia al medio ambiente sin disminuir las propiedades mecánicas de los materiales, deben ser ligeros, resistentes, y deben soportar cargas mecánicas cíclicas durante un periodo largo y predecible [2] en la industria automotriz y aeronáutica es especial con el fin de producir vehículos más ligeros y por consecuencia ahorros de combustible y reducción en las emisiones de  $CO_2$ .

El uso de juntas adhesivas en la industria automotriz y aeronáutica ha aumentado significativamente en los últimos años debido a sus ventajas en comparación con los métodos de unión tradicionales tales como pernos, remaches o soldaduras y la oportunidad de unir materiales disimiles [3]. Algunas de las ventajas que ofrecen las juntas adhesivas son distribuir la carga en un área más amplia, reducir las concentraciones de tensión, aumentar la resistencia a la corrosión y a la fatiga, la capacidad de unir a diferentes materiales además de que proporciona un ahorro de peso a toda la estructura [2].

Como antes se mencionó uno de los parámetros a controlar es el espesor, se ha reportado como un parámetro que influye en el rendimiento de las uniones adhesivas, por lo tanto su efecto tiene para ser investigado experimentalmente y debe tenerse en consideración en el diseño de la junta [4, 5,

6] con lo anterior en este trabajo tiene el propósito de diseñar y manufacturar un herramental que garantice el grosor de la capa adhesiva, el traslape y la alineación correcta, ya que podría tener un comportamiento diferente en función de estos parámetros.

## 1.1. Planteamiento del Problema

El procedimiento, para obtener los especímenes o probetas de traslape simple (SL's) se obtiene de forma manual. Teniendo en cuenta lo anterior, esto genera variaciones significativas en el espesor de la película del adhesivo, longitud traslape, o en el paralelismo. Derivado de dicha variación, las propiedades mecánicas de las uniones se ven afectadas significativamente. Finalmente, dichas variaciones provocan imprecisiones en los resultados de pruebas de control de calidad, tecnológico y científico.

## 1.2. Justificación

Se han reportado, que las características geométricas de la junta adhesiva en específico el espesor de la película influye directamente en el rendimiento de las propiedades mecánicas de dicha estructura, dado que es una característica de calidad importante es necesario establecer métodos y mecanismos de control que permitan la repetibilidad. Existen moldes o también llamado herramientas que han demostrado ser útiles en el control de la geometría de las uniones. Sin embargo, estos herramientas son por lo general, son robustos y difíciles de transportar y manejar. En este sentido, se propone un diseño ligero que permita controlar las dimensiones y sea de fácil operación.

## 1.3. Objetivo General

1. Diseñar y manufacturar un herramental para controlar las características geométricas de una junta adhesivas como alineación, área de traslape, longitud de traslape y el espesor de la película de adhesivo siguiendo la norma emitida por la ASTM la D1002-10[1].

### 1.3.1. Objetivos Específicos

- Diseñar los componentes y ensamble del herramental para la fabricación de probetas, mediante la herramienta SolidWorks®.
- Obtener y representar una simulación del ensamble del dispositivo, a través de la herramienta de diseño asistido por computadora (CAD) SolidWoks® que permita visualizar en un entorno virtual el funcionamiento del herramental.
- Manufacturar el herramental en el centro de maquinado bajo la herramienta MasterCam® auxiliados de las máquinas de control numérico (CNC) del área de Manufactura Avanzada y Procesos especiales de CIDESI® Estado de México.



- Medir, determinar y analizar la geometría de la junta adhesiva, parámetros como ancho, longitud, espesor de la película del adhesivo y área de traslape.
- Realizar pruebas mecánicas sobre probetas fabricadas con el herramental para determinar su repetibilidad y su congruencia con resultados previamente reportados.
- Realizar inspección visual y microscopia en probetas fracturadas para determinar su congruencia con resultados previamente reportados.

## 1.4. Hipótesis

A partir del empleo de un herramental diseñado y manufacturado CAD/CAM, es posible controlar de manera repetible propiedades geométricas (espesor de la película del adhesivo, así como la alineación, ancho paralelismo y longitud de traslape) y físicas (carga de rotura y apariencia de fractura) de una junta adhesiva. Así, se pueden fabricar probetas para ensayos estándar bajo ASTM D1002. También, desarrollar probetas específicas que serán destinadas para desarrollo de investigación científica y artículos enfocados en tecnologías de unión.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Antecedentes

El uso de los adhesivos no es un material nuevo de la era del siglo XXI, existen registros de su explotación en antiguas civilizaciones como los egipcios en esculturas que datan del 3200 a. C encontradas en Tebas, una ciudad antigua de los egipcios, así como la descripción de que empleaban adhesivos de caseína, almidones y azúcares para unir las hojas de los papiros.

Los romanos, aplicaban láminas de oro sobre papel, empleando como adhesivo la clara de huevo; documentos chinos que datan del año 1000 a. de C., hablan del uso de sustancias obtenidas de la boca del esturión para su empleo, como colas aplicables en la construcción de embarcaciones[7].

Existen muchos ejemplos y registro sobre la manipulación y explotación de los adhesivos en diferentes áreas, como la construcción, esculturas y recientemente en la ingeniería en específico en industrias navales, automotriz y aeronáutica por mencionar las más relevantes.

Actualmente en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial no cuenta con un molde o herramienta para el proceso de adhesión de juntas adhesivas, para producir muestras estándar.

#### Patentes

Da Silva, F.M Lucas (2012) hizo un molde para la “Preparación de juntas de solape con adherencias planas“, que se rige por la norma ASTM D1002 [1] que mantienen a los sustratos en su lugar y garantiza la alineación superposición longitud y el espesor del adhesivo, pero solo puede ser usado a temperatura ambiente.

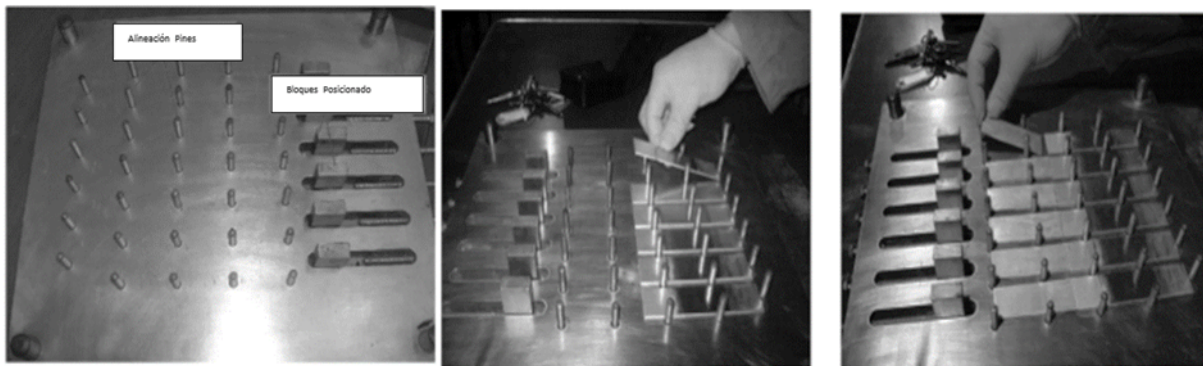


Figura 2.1: Molde Preparación de juntas de solape con adherencias planas imagen obtenida de [6]

Blakley, II. y George [8] publican un dispositivo para fijar y pegar pares de especímenes a lo largo de sus caras de unión la plantilla incluye una plataforma con una superficie de ajuste. La plataforma posiciona los pares de muestras para la disposición de la junta de regazo.

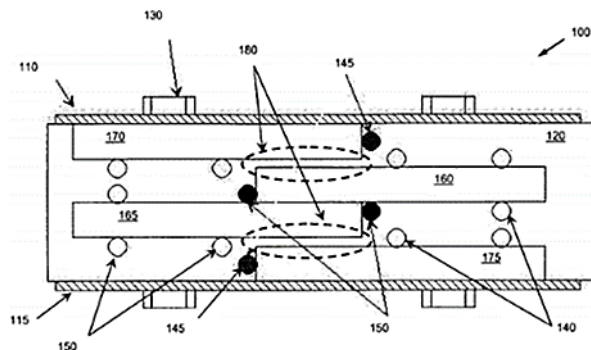


Figura 2.2: Molde Preparación de juntas de solape con adherencias planas imagen obtenida de [8].

## 2.2. Adhesivos

La unión mediante adhesivos suele ser la más adecuada cuando se trata de unir materiales físicamente diferentes o metalúrgicamente incompatibles, polímeros termoestables, cerámicos, elastómeros, materiales muy delgados o sustratos de tamaño muy pequeño. La unión adhesiva, generalmente, también es adecuada cuando se trata de unir áreas grandes o cuando el empleo de adhesivos supone grandes mejoras en cuanto a la productividad. Una definición aceptada en términos generales de un adhesivo es un material que se aplica a las superficies de unión para unirlos permanentemente mediante un proceso de unión [9].

El fenómeno de adhesión es un campo multidisciplinario los expertos se enfocan en dos campos de estudio, la primera se ocupa de las superficies e interfaces, que permiten predecir las fuerzas atractivas y las energías necesarias para la formación de enlaces [9] y la otra se ocupa de la fractura de los enlaces adhesivos, de la mecánica del material y su respuesta ante cargas y factores como la humedad y temperatura.

## 2.3. Teorías de Adhesión

El fenómeno que ocurre cuando se aplica el adhesivo en los adherendos es conocido como adhesión el concepto más general y aceptado es el que cita [9], la adhesión se refiere al estado en el que dos cuerpos diferentes se mantienen unidos por contacto íntimo interfacial, de modo que la fuerza mecánica o el trabajo pueden transferirse a través de la interfaz. Las fuerzas inter-faciales que mantienen juntas las dos fases pueden surgir de las fuerzas de van der Waals, la unión química o la atracción electrostática. La resistencia mecánica del sistema está determinada no solo por las fuerzas inter-faciales, sino también por las propiedades mecánicas de la zona inter-facial y las dos fases en masa.

En el siguiente apartado se citan de manera breve dichas teorías que se han postulado como el enclavamiento mecánico, electrostático, de difusión y de reacción / reacción de superficie para describir los mecanismos de adhesión. A menudo es difícil atribuir completamente la unión adhesiva a un mecanismo individual. Una combinación de diferentes mecanismos es probablemente la res-

ponsable de la unión dentro de un sistema adhesivo dado [3].

Teoría Mecánica

- Unión mecánica o enclavamiento

Teoría Electrostática de atracción

- Migración de carga
- Diferencia en potencial de contacto
- Aclopamiento electrostático

Teoría de Difusión

- Adhesión entre los mismo polímeros
- Teoría de entrelazamiento polimérico

Enlace de Reacción Química

- Teoría de ácido-base

Teoría de Absorción

- Termodinámica de humectación o humectabilidad
- Interacción de la interfaz, adhesión termodinámica.

## 2.4. Juntas Adhesivas

La unión adhesiva, es un proceso de unión de material en el cual un adhesivo, colocado entre las superficies adheridas, se solidifica para producir una unión adhesiva [10].

Atendiendo las solicitudes de las uniones estructurales que son usadas en diversas industrias las juntas adhesivas han surgido como una alternativa para responder a dichas solicitudes. Se ha reportado en los datos experimentales de las investigaciones que el comportamiento de falla de las uniones de solapado unidas está influenciado por los parámetros de material y geométricos, así como por las técnicas de preparación de la superficie y el espesor de la línea adhesiva [11].

Es por esta razón que hay que poner atención al material que se selecciona como sustratos y al control del espesor, ya que como la literatura lo expone son parámetros que influyen directamente en los resultados que se obtienen al analizar la junta adhesiva.

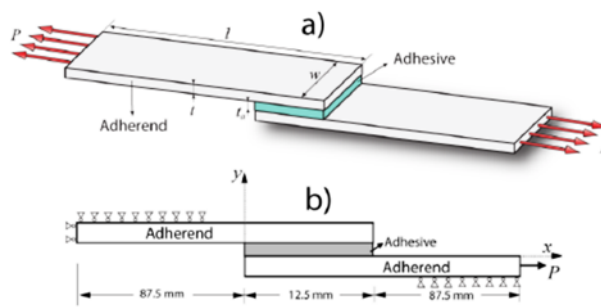


Figura 2.3: a) Ilustración Junta Adhesiva, b) Junta con dimensiones sugeridas por la norma ASTM D1002 [12].

### 2.4.1. Tipos de Juntas Adhesivas

Comúnmente, las configuraciones de las juntas que tienen analizados en la literatura son articulaciones de una sola vuelta, juntas de doble vuelta, juntas de bufanda y juntas de vuelta escalonada. Entre estos la junta adhesiva de una sola vuelta es ampliamente utilizada debido a su sencillez. El adherente puede ser metálico o compuesto reforzado con fibra. La articulación de una sola vuelta es la más común y diversas investigaciones se llevan a cabo para analizar su fuerza y propiedades [13].

La deformación del adherente se estudia tomando los datos obtenidos de los diferentes materiales para adherir como el aluminio y plástico reforzado con fibra con la variación del adhesivo y su relación de espesor. Los datos obtenidos de la tensión de estrés y la curva se comparan con la solución experimental y los resultados numéricos se comparan con el resultado analítico.

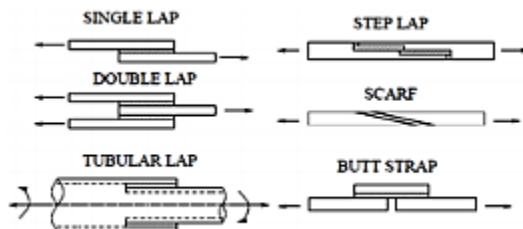


Figura 2.4: Tipos de configuración en juntas adhesivas. Obtenido de[13].

### 2.4.2. Mecanismo de falla de las Juntas Adhesivas

Los modos de falla que presentan las juntas adhesivas dependen de la calidad de enlace en cada interfaz y de la fuerza de unión entre el sustrato y el adhesivo, la geometría de la muestra, la carga y las fuerzas internas del adhesivo (cohesión).

Al ensayar y evaluar, la unión adhesiva una vez producida la fractura devela los fallos de la unión producidos por diversos factores que se muestran en la evaluación, como un tratamiento inadecuado de las superficies, un mal curado, falta de cohesión en el adhesivo.

Según la norma ASTM D5573, existen siete modos característicos típicos de falla, se mencionan a continuación fallo adhesivo, fallo cohesivo, capa fina, falla cohesiva, falla de rotura de fibra, falla de rotura de fibra ligera, falla de stock, o falla mixta [11].

1. Fallo de adhesivo: El fallo ocurre en la interface entre el sustrato y el adhesivo. Este tipo de falla es el más desfavorable y menos deseable.
2. Fallo cohesivo: La falla ocurre en el interior del adhesivo. Este tipo de fractura es el más deseable.
3. Fallo del sustrato: El sustrato falla antes que el adhesivo y se deduce que el adhesivo ha sido sobredimensionado. Este tipo de falla puede provocar un colapso en la estructura.

Cada unión debe ser diseñada para solicitudes específicas, lo que para una solicitud puede ser causa de fallo en otras puede ser aceptable sin afectar las resistencias de la unión, sin olvidar que el objetivo principal de la junta estructural es transmitir la carga externa a los demás miembros.

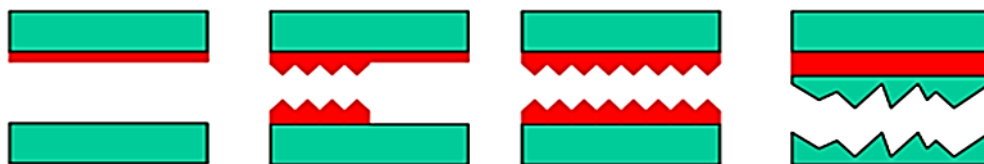


Figura 2.5: Modos de falla de las uniones adhesivas. Obtenido de [14].

## 2.5. Análisis Mécanico

El comportamiento de la junta adhesiva se estudia bajo un modelo físico desarrollado y mejorado con el avance de los procesos computacionales y matemáticos a continuación se presentan las teorías principales que lo describen.

### Volkersen.

El primer método analítico conocido en la literatura para el análisis de esfuerzo de las juntas unidas fue desarrollado por Volkersen, 1938. El método Volkersen, también conocido como el modelo shear-lag, introdujo el concepto de cortante diferencial.

**Goland Reissner.** Fueron los primeros en considerar los efectos debidos a la rotación de los adherentes Dividieron el problema en dos partes: (a) determinación de las cargas en los bordes de las juntas, utilizando lo finito teoría de flexión de placas dobladas cilíndricamente y (b) determinación de las tensiones de las juntas debido a las cargas aplicadas.

**Hart-Smith.** En contraste con (Volkersen, 1938) o (Goland y Reissner, 1944), (Hart-Smith, 1973) consideraron la plasticidad adhesiva. En el informe presentado para la NASA, analizaron ambas, la junta solapada (SLJ) y la doble junta solapada (DLJ). Para ambos análisis combinaron el estrés elástico de la cáscara con tensiones de cizalla plásticas [15].

### 2.5.1. Modelo Físico Diferencial

A partir del modelo físico (probeta) se transporta a un elemento diferencial y se somete al análisis clásico de cuerpo libre para observar el comportamiento de las fuerzas aplicadas y la respuesta del material en presencia de estas.

El elemento diferencial es una rebanada a través de la región unida, a través de este elemento se puede hacer un cálculo más simple, donde se hacen las siguientes suposiciones para el análisis, se supone que la tensión es constante a través del espesor, el análisis se reduce a una deformación plana unidimensional, se supone que el adhesivo y los materiales adhesivos son elásticos y se comportan lineal-mente. Las deformaciones por cizallamiento en los adherendos y la influencia del adhesivo en la rigidez a la flexión de la junta se suponen insignificantes, y se supone que los adherendos se deforman como una placa en flexión[16].

A continuación, se muestran las ecuaciones que rigen el comportamiento de una junta bajo la influencia de una fuerza aplicada.

$$T_u \tag{2.1}$$

$$T_u + \left( \frac{dT_u}{dx} \right) dx \tag{2.2}$$

$$V_u \tag{2.3}$$

$$V_u + \left( \frac{dV_u}{dx} \right) dx \tag{2.4}$$

$$M_u \tag{2.5}$$

$$M_u + \left( \frac{dM_u}{dx} \right) dx \tag{2.6}$$

$$\left( \frac{dT_U}{dx} \right) + \tau = 0 \tag{2.7}$$

$$\left( \frac{dT_L}{dx} \right) + \tau = 0 \tag{2.8}$$

$$\left( \frac{dM_U}{dx} \right) - V_U + \tau \left( \frac{\eta + t}{2} \right) = 0 \tag{2.9}$$

$$\left( \frac{dM_L}{dx} \right) - V_L + \tau \left( \frac{\eta + t}{2} \right) = 0 \tag{2.10}$$

$$\left( \frac{dV_U}{dx} \right) + \sigma = 0 \tag{2.11}$$

$$\left( \frac{dV_L}{dx} \right) + \sigma = 0 \tag{2.12}$$

Donde  $T_u$  es la carga resultante ó la fuerza por unidad de área,  $V_u$  la fuerza de corte transversal resultante,  $M_u$  es el momentum resultante,  $t$  el espesor del sustrato,  $\eta$  es espesor del adhesivo,  $u$  es desplazamiento del adhesivo en dirección normal al plano del adhesivo,  $\tau$  es esfuerzo cortante o cizallamiento del adhesivo,  $\sigma$  es el esfuerzo de pelado del adhesivo [16].

En la Figura (2.6), se muestra un corte de la región unida y se toma esa sección como el elemento diferencial, se analiza en dos partes donde los subíndices  $U$  y  $L$  indican Upper (parte superior) y Lower (parte inferior) del corte.

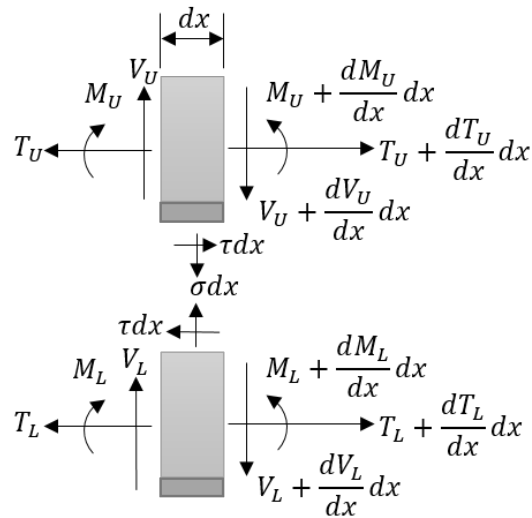


Figura 2.6: Análisis Mecánico y fuerzas aplicadas en el elemento diferencial [14].

## 2.6. Diseño Asistido por Computadora CAD

El desarrollo que ha tenido el diseño asistido por computadora ha sido prolifero y constante, debido al poder y potencia que ha tenido el computo en cuanto a su capacidad de gráficos memoria entre otras características de los avances tecnológicos del siglo, el área de CAD se ha desarrollado en diversas áreas como la industria automotriz aeronáutica, arquitectura, ingeniería y construcción por mencionar las principales, esto ha resultado un sistema capaz de trabajar de manera ágil, eficiente y con mecanismo complejos en la modelación 2D y en 3D, gracias a sus funciones como acercamiento alejamiento, desplazamiento del espacio rotaciones, funciones que resultan en movimientos bajo los seis grados de libertad de geometría euclidiana en  $R^3$  [17].

## 2.7. Manufactura Asistida por Computadora CAM

Uno de los núcleos en la tecnología de fabricación moderna ha sido el uso de computadoras y softwares que auxilian a las etapas de manufactura, principalmente para visualizar y simular en un entorno virtual el desarrollo de la pieza a fabricar, el autor [18] menciona que el uso de esta tecnología mejora el diseño, la fabricación y la gestión de las empresas se considera la tecnología CAM clave para mejorar la productividad de la fabricación y la composición del producto.

Formalmente la definición del CAM es Computer Assisied Manufacturing por sus siglas en inglés hace referencia al software que se utiliza para diseñar y fabricar productos y programar los procesos de manufactura, especialmente el mecanizado por CNC. El software CAM usa los modelos y ensamblajes creados en el software CAD para generar trayectorias de herramientas que dirijan las máquinas encargadas de convertir los diseños en piezas físicas. [19].

Las ventajas que existen en combinar dichos sistemas CAD/CAM son de trascendencia para una empresa y la manufactura moderna, ya que este conjunto permite comunicar y transferir la información de diseño sin necesidad de pasar manualmente los datos y especificaciones geométricas, en pocas palabras se almacena las instrucciones del CAD para operar en la máquina.



## 2.8. Metrología para Ingeniería de Manufactura

El departamento de metrología en el área de manufactura es clave para validar la forma, las dimensiones y las características de superficie que aseguren el óptimo rendimiento de una pieza, dentro de estas características existe una incertidumbre debido a factores humanos, ambientales y de máquina es por esto que en la ISO/TR14638 reporta que cualquier elemento que se considere ideal requiere, para ajustarse adecuadamente al conjunto, un dimensionamiento preciso, cualquier pieza resultante de la fabricación mecánica nunca es perfecta. Por lo tanto, es necesario definir el conjunto de geometrías reales aceptables para garantizar que la pieza sea funcional [20]. Para poder definir adecuadamente las geometrías existente dos medidas, el dimensionamiento nominal y el funcional, éstas dos son la base para la metrología en manufactura.

El dimensionamiento nominal se define como dimensionamiento + estados de superficie y el dimensionamiento funcional dimensionamiento + tolerancia. En dibujos técnicos, el dimensionamiento es obligatorio, el requisito geométrico o dimensional debe ser especificado en el dibujo algunos parámetros (ángulos o distancias) se citan implícitamente en el dibujo para explicar el hecho de la geometría restricción.

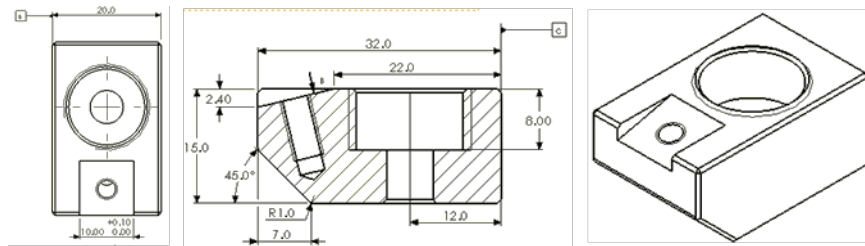


Figura 2.7: Representación de cotas en un dibujo técnico.

Para indicar esta funcionalidad existen definiciones formales en el vocabulario de la metrología, estas están indicadas como tolerancias, las tolerancias indican la dispersión y las desviaciones geométricas permitidas, en otras palabras, es una variación permitida (tolerada, permisible) de la dimensión real de la pieza [20].

# Capítulo 3

## Materiales y Métodos

### 3.1. Materiales

#### 3.1.1. Materiales para fabricación de herramental

##### Placa de acero SAE/AISI A4140

Para este trabajo, se empleó una placa de SAE/AISI 4140 comercial, con dimensiones longitud de 300mm ancho 200mm y altura de 12mm. Las propiedades típicas son bastantes conocidas y pueden consultarse en la siguiente referencia [21]. Se maquinó en el centro de maquinado Haas ® modelo VF9 del área de manufactura avanzada y procesos especiales CIDESI, Estado de México.

##### Placa de acero ASTM A36

Se utilizó una placa de acero ASTM A36 comercial, con dimensiones 15.24mm (6 pulgadas) de altura, 150mm de longitud y 100mm de ancho para maquinar la pieza “Sujetador“, “Opresor”, . Por ser uno de los aceros más comercializados en la industria sus propiedades ya son bastante conocidas se puede consultar en la siguiente referencia [22] realizó el corte y manufactura en un centro de maquinado vertical Haas® modelo VF2 y el corte de las placas en la cortadora por chorro de agua modelo Mitsubishi Electric Suprema TM Dx510.

#### 3.1.2. Materiales para fabricación de probetas para evaluación dimensional

##### Placa de acero estructural ASTM A5140

Para la fabricación de las probetas con las dimensiones sugeridas en la norma ASTM D1002 [23], se empleó una placa de acero estructural de alta resistencia a la fluencia, tenacidad y corrosión se puede consultar las propiedades más detalladas en la siguiente referencia [24, 25].

##### Placa de acero inoxidable ASTM 4009L

Se empleó también una placa de acero inoxidable ASTM 409L, para la fabricación de las mismas probetas con las dimensiones sugeridas por ASTM D1002 [1], para conocer las hojas de especificaciones consultarse en [25].

### Adhesivo MP55420 metil-metacrilato.

El adhesivo empleado en el presente trabajo es el epoxi MP 55420 ya que se reporta en [23, 26] el MP55420 metil metacrilato como un adhesivo de alto rendimiento diseñado para unir una amplia gama de plásticos, metales y ensamblajes compuestos, propiedades de impacto y resistencia a la intemperie, su capacidad para soportar la fluctuación extrema de la temperatura y los ciclos térmicos, y la resistencia a una amplia gama de productos químicos y condiciones ambientales.

El metacrilato se exhibe en dos partes, en un recipiente se encuentra el catalizador (activador) que acelera la reacción exotérmica, se mezcla en proceso de aplicar el adhesivo.

Se reporta en el trabajo de [27] la caracterización de las propiedades mecánicas en la gráfica se observa el comportamiento clásico de los ensayos esfuerzo-deformación del adhesivo MP 55420.

Tabla 3.1: Propiedades mecánicas de MP 55420 (25°C)

<b>Propiedades mecánicas MP 55420 metil metacrilato T 25°C</b>			
<b>Carga Máxima</b> (kN)	<b>Esfuerzo máximo</b> (MPa)	<b>Coefficiente Poisson</b>	<b>Módulo de Young</b> (GPa)
1.2029	12.0428	0.30	0.50

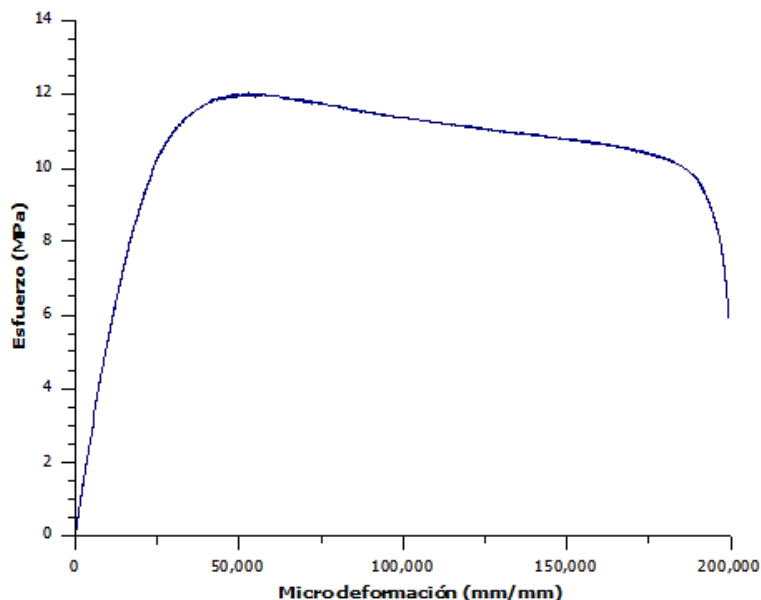


Figura 3.1: Gráfica esfuerzo-micro-deformación adhesivo MP 55420 metil metacrilato.

## 3.2. Metodología utilizada para el diseño

En el siguiente apartado se desglosa el procedimiento de cada etapa dentro del proyecto, así como una breve descripción de los recursos que se emplearon para la elaboración del mismo. En la figura(3.3) 10 se muestra la metodología para cada etapa empleada en el desarrollo del herramental.



Figura 3.2: Metodología. 1) Desarrollo Conceptual, 2) Desarrollo Prototipo, 3) Implementar Prototipo.

### 3.2.1. Desarrollo Conceptual

#### Identificación del problema

El diseño y manufactura de un herramental nace de investigaciones y trabajos sobre tecnología de uniones adhesivas, previos desarrollados en el centro (CIDESI, Estado de México) se pueden consultar los trabajos en las siguientes referencias [27, 28, 29] con la iniciativa de mejorar el proceso de fabricación de juntas adhesivas y estandarizar dicho proceso con ayuda de un molde para controlar los parámetros geométricos y debido a que no existía un herramental que proporcionara las características que se estaban persiguiendo en la investigación bajo de la norma ASTM D1002 [1] dentro del centro, se inició el proceso de desarrollo del proyecto.

Posteriormente siguiendo una metodología de investigación se hizo una búsqueda de antecedentes sobre los instrumentales, moldes y plantillas que ya estaban en uso de diferentes investigaciones, dichos se mencionan en el capítulo 1 y se pueden consultar en las siguientes referencias [WilliamE.BlakleyII2012 , 5, 6] con base a los antecedentes y las requisiciones, herramienta y materiales que se tenían a disposición se planteó el instrumental a desarrollar.

### Diseño de instrumental en CAD/SolidWorks.

La norma ASTM D1002 [1], recomienda el mecanizado de las probetas para preparar juntas adhesivas. Sin embargo, dicho documento tiene un alcance definido; que es la prueba de la calidad de la superficie (debido a la preparación) y la resistencia del adhesivo. En este caso, el alcance pretendido es probar con base ASTM D1002 [1] (así evaluar sistemas de adhesión) y experimentos científicos variando características geométricas de la junta (ej. Ancho, longitud de traslape, espesor de película adhesiva, etc.)

Los diferentes dispositivos para mecanizar dicha prueba recomiendan utilizar teflón, debido a que no requiere ningún agente para desmoldar las probetas, sin embargo, cuando los adhesivos requieren temperaturas altas para su curado es mejor usar moldes del mismo material del substrato, en instrumental que se ideó está diseñado para mantener las probetas dentro de un horno, garantizar la alineación el área de traslape y los diferentes espesores de la película del adhesivo.

El diseño que se planeó es una placa de acero SAE/AISI A4140 [21], con un patrón de pines en proporción que corresponden a los diferentes anchos de las probetas (6.25, 12.5, 25 y 50 mm), largos de las probetas que dependen de la longitud del traslape (6.25, 12.5, 25, 50 mm) y dimensiones sugeridas por la norma ASTM D1002 [1][1] que recomiendan una longitud entre el traslape y el “grip” de  $63.5 \text{ mm} \pm 0.254 \text{ mm}$  y un “grip” de  $25.4 \text{ mm} \pm 0.254 \text{ mm}$ .

El croquis de distribución de distancias de traslape que corresponde al patrón de pines indica la longitud de la probeta y sus diferentes traslapes, la distancia inicial es 25 mm de la arista lateral izquierda (vista superior) es la distancia del escalón que funciona como tope para posicionar las probetas, la de 10 mm es el ancho de del tope, 90 mm corresponde a la longitud que la probeta, medidas sugeridas por la norma ASTM D1002 [1][1]; en la imagen se puede apreciar con más detalle cada traslape y la línea que corresponde a los 90 mm del lado derecho en vista superior de la distribución.

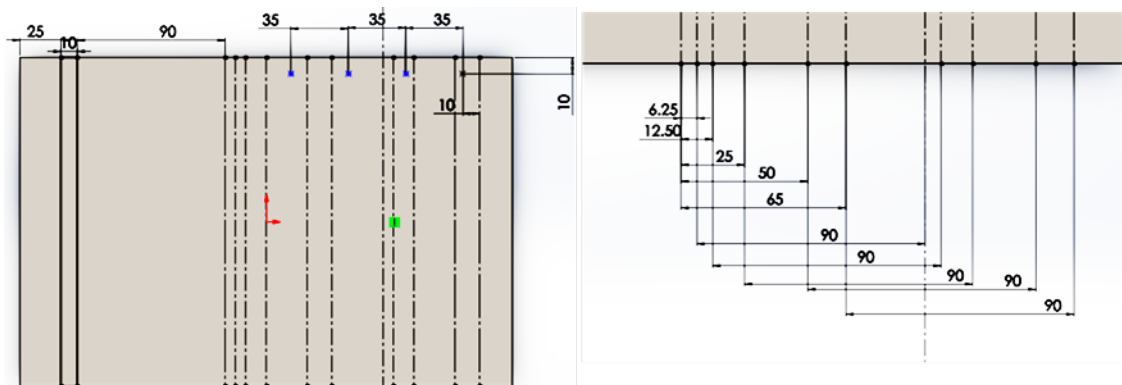


Figura 3.3: Croquis distribución distancias de traslape.

El patrón de pines de alineación se distribuye en dos secciones la parte izquierda y derecha dejando libre la zona de traslape de la junta adhesiva, partiendo con un barreno de referencia colocado en cada sección (izquierda y derecha), posteriormente con ayuda de la herramienta “Pattern” de SolidWorks se indica la distribución de los barrenos en la placa.

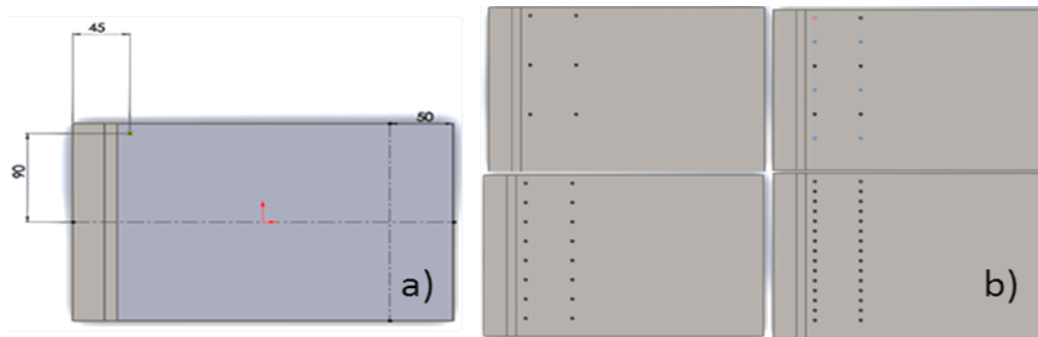


Figura 3.4: Distribución de barrenos de alineación a) barreno de referencia b) patrón de pines de alineación.

Las siguientes operaciones fueron realizar los barreros M6x1 colocados a lo largo de la arista izquierda donde posteriormente se colocarán los elementos de sujeción y patrón de barrenos M4x0.7 para el tope móvil de lado derecho vista superior.

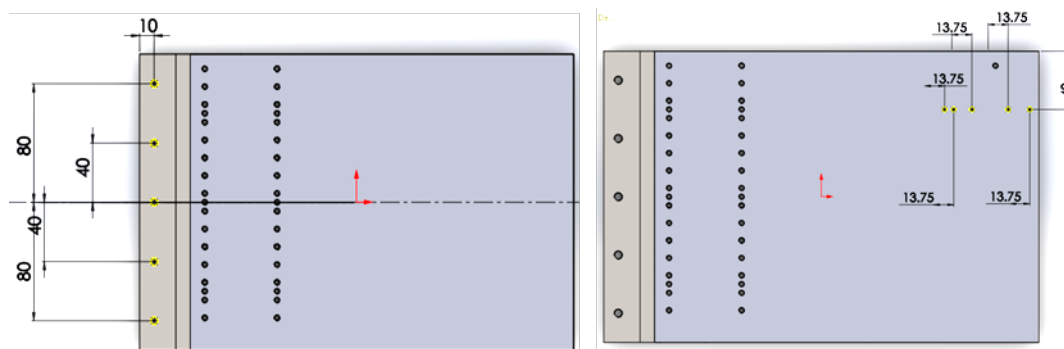


Figura 3.5: Posicionamiento de barrenos a) sujetador, b) tope móvil.

### 3.2.2. Desarrollo de Prototipo.

**Manufactura en el centro de maquinado del área de manufactura avanzada y proceso especiales CIDESI Estado de México.**

La metodología dentro del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial sede Estado de México, para manufacturar piezas mecánicas sigue un plan de calidad, que lleva por título “Plan de calidad para la ejecución de manufactura” y consta de 5 etapas.

1. Inicio
2. Planeación
3. Ejecución
4. Monitoreo y Control
5. Cierre

Incluyen al departamento de gerencia, coordinación de manufactura, ingeniero administrador de proyectos, técnico de proyectos, técnico de control de calidad que realizan las diferentes actividades, después de entregar los planos de fabricación, revisan las especificaciones de la pieza, asignan las actividades al equipo de trabajo y dan seguimiento y ejecutan el proceso de fabricación de la pieza, verifican las especificaciones del plano.

### Especificaciones de manufactura para fabricación del herramental.

El proceso de manufactura se realiza a través de máquinas CNC que son programadas con la herramienta MasterCam, el programa especializado en manufactura en máquinas de control numérico, el cual abarca programación de fresadoras, centros de maquinado, tornos entre los más relevantes.

### Placa Base ASTM A36.

Determinar el “Cero Pieza” para que se alinee con el “Cero maquina” y se ubique en el espacio de la máquina de control numérico, esto con el propósito de generar un origen para orientar el maquinado, en este caso el cero pieza se encuentra en el centro, programar las medidas indicadas en plano y se realiza la opresión de planeado para el acabado superficial deseado.

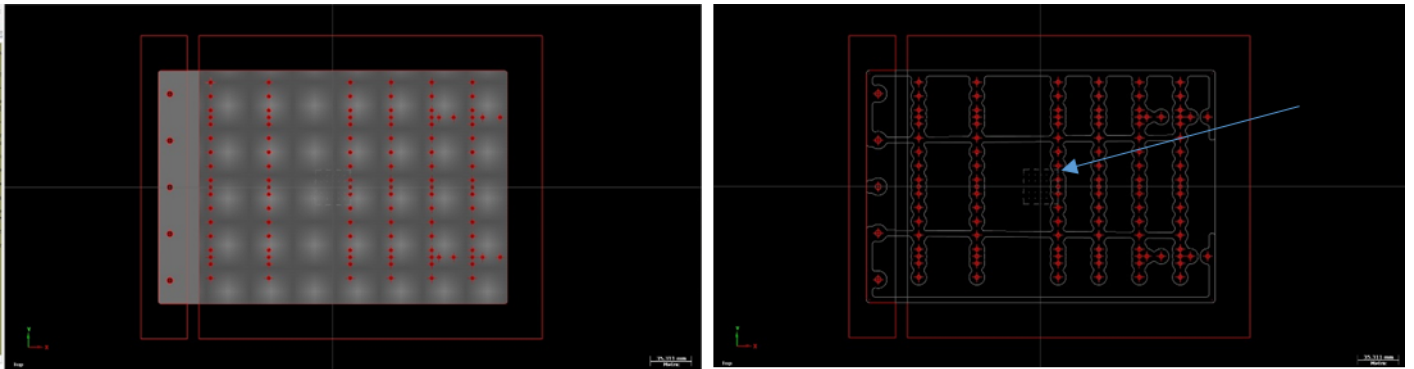


Figura 3.6: a) Cara Superior, b) Cara inferior, c) Cero Pieza ubicada en el centro.

Para los barrenos M6 x 1.0 y M4 x 0.7 se consideran las siguientes indicaciones, para realizar el barrenado se marcan los centros con una broca de centros del No. 3 y para determinar la broca de perforación se hace una simple resta que involucra el tamaño del machuelo menos el paso.

Ejemplo:

*Si el machuelo es M4 x 0.7 se hace la resta  $4 - 0.7 = 3.3$  La broca que se utiliza es de 3.3*

### Metrología

El laboratorio de metrología de CIDESI Estado de México está dentro del plan de calidad para la ejecución de manufactura, valida las piezas después de ejecutarse el proceso de maquinado, se asegura de contar con los instrumentos de medición con calibración vigente, inspecciona las especificaciones conforme al plano de fabricación y documenta los resultados en un reporte adimensional (ver (B)).

### 3.2.3. Realización de Prototipo.

#### Preparación de las probetas.

Todas las pruebas fueron manufacturadas de acuerdo con la norma ASTM 1002D [1], las probetas de acero estructural ASTM A5140 (2.65mm de espesor) placa de acero inoxidable ASTM 409L (2.93mm) se cortaron en una máquina de corte por chorro de agua Waterjet modelo Mitsubishi Electric Suprema TM Dx510. Las dimensiones finales fueron 12.5x102.5x2.55mm para las pruebas acero estructural ASTM A5140 y 12.5x102.5x2.93mm para las muestras de acero inoxidable ASTM409L.

#### Acabado superficial de las probetas.

La preparación del acabado superficial inició con “Sand Blast” conocido como arenado que consiste un sistema de lanzamiento de material abrasivo con aire a presión en las superficies de las placas después de este tratamiento se colocaron en una tina de baño ultrasónico Tierratech® modelo MOT-50 se sumergieron por 90 min posteriormente se limpiaron con acetona para eliminar cualquier agente con el fin de eliminar las superficies débiles y promover una mejor adherencia, esto para activar la superficie del sustrato a través de acabados superficiales como “Sand Blast” y la limpieza o procedimiento químico.

#### Posicionamiento de las probetas en el herramental fabricado.

El empleo del herramental para la fabricación de probetas estandarizadas bajo la norma ASTM D1002 [1], sigue el siguiente procedimiento. Colocar la placa de acero A4140 perforada con el patrón de pines, con el sello CIDESI hacia arriba en una superficie lisa, acoplar los opresores, sujetadores con los tornillos cabeza hueca cilíndricos M6x16 en los barrenos externos a lo largo del ancho de la placa. Posteriormente colocar los pernos de alineación M4x10 en los barrenos del patrón de la placa en las distancias correspondientes para el ancho de cada probeta, de lado derecho colocar sobresalientes los pernos debido a la diferencia de espesores y alturas de las diferentes muestras. Colocar la probeta en la superficie de la placa de acero A4140, alineando la cara lateral con los pernos de alineación y el tope superior, que controla la longitud del traslape, perpendicularmente en el tope móvil colocar el control de espesor, en este caso laines de diferentes espesores (0.1, 0.3, 0.2, 0.5mm). Después depositar el adhesivo MP 55420 con la pistola que le corresponde al contenedor, por último, alinear la probeta superior con el barreno y el tope de lado derecho y ejercer la presión necesaria para la adhesión con la placa de sujeción, ajustando con tornillos M4x6.

## 3.3. Control y validación de herramental por medio de pruebas físicas.

### 3.3.1. Inspección dimensional (espesor de la película de adhesivo y geometría) de probetas de cortante SLS's.

Se fabricaron dos probetas para cada grupo de espesor (0.3, 1.0 y 1.5mm), mediante el empleo del herramental de prueba. Una vez fabricadas, se procedieron a medir mediante el uso de una máquina de medición por coordenadas Carl Zeiss Countura 2 (resolución 0.001  $\mu\text{m}$ ). La medición del espesor, se realizó mediante el empleo de software Image J® utilizando regla de referencia y



efectuando el ajuste de pixeles a mm (razón de 1.5). En ambos casos, la temperatura de prueba fue de  $20 \pm 1.0$ .

### **Ensayo de tracción bajo la norma ASTM D1002**

Una vez que las probetas fueron validadas dimensionalmente (ver 3.3.1), se procedió a realizar la prueba de cortante bajo ASTM D1002. Las probetas, se montaron en una máquina universal PTS® Physcal Test Solution de 100kN (resolución 0.001kN) con mordazas planas moleteadas. Una vez montadas las probetas, se aplicó carga a una velocidad de  $10mm.min^{-1}$ . La temperatura de prueba, fue de 25C y una humedad relativa de 54%.

### **Observaciones de la superficie de fractura (bajos aumentos).**

La superficie de fractura generada después del ensayo de tracción, se observó a mediante ocular de 5x. Lo anterior, con la finalidad de detectar diferencias entre los tres espesores de probeta. El procesamiento de imágenes, se realizó mediante el software Image J® con la finalidad de dejar la evidencia fotográfica y trazable. Adicionalmente, se realizaron mediciones de espesor sobre la superficie de las probetas y restando el espesor de las láminas al espesor de traslape. Lo anterior, se realizó mediante un micrómetro de puntas planas Mitutoyo® 443-122 (resolución  $0.001mm$ ).

### **Observaciones por Microscopia Electrónica de Barrido.**

Con la finalidad de verificar la morfología de la fractura, se realizaron observaciones mediante microscopio electrónico de barrido (SEM) marca JEOL JSM 6610-LV. Las muestras, se prepararon para hacerlas conductivas mediante la técnica de deposición vía pulverización (o sputter). En ese sentido, se procedió a recubrir la superficie de la fractura del adhesivo con grafito utilizando un equipo de vacío Vac-03 marca Intercovamex. El tiempo de depósito fue de 30 min, para posteriormente colocar las piezas sobre la platina del SEM. Finalmente, se realizaron observaciones en la zona del labio o arista del traslape, así como en el centro del traslape. Lo anterior siguiendo los procedimientos mencionados por Cruz et al [28].

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Diseño Asistido por computadora

#### 4.1.1. Placa base acero SAE/AISI 4140.

A partir de la intención de diseño y los objetivos del presente trabajo los resultados de diseño asistido por computadora se muestran a continuación; diseñar un herramental para estandarizar probetas con los diferentes anchos y traslapes propuestos (6.25, 12.5, 25,50 mm) en la imagen se representa las probetas propuestas bajo la norma ASTM D1002 [1].

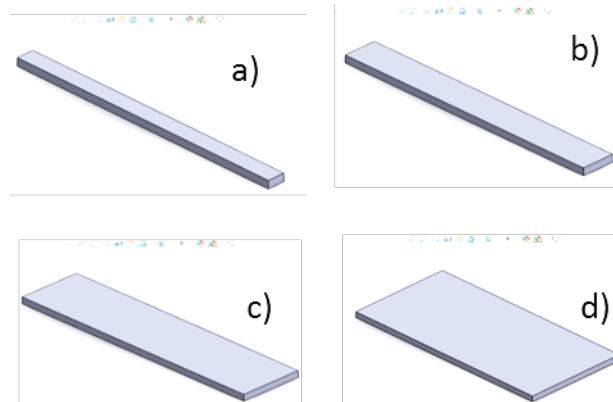


Figura 4.1: Representación de probetas a) 6.25 b) 12.5 c) 25 d) 50 mm.

El patrón final para los pines de alineación ubicados en la cara superior de la placa, se puede observar en la Figura (4.2). En dicha Figura, se puede observar que ninguno de los barrenos se superpone con otro. Lo anterior, debido al cálculo de distribución de distancias fue óptimo, el perfil de vaciado de la cara inferior proporciona a la pieza que sea ligera y de fácil operación.

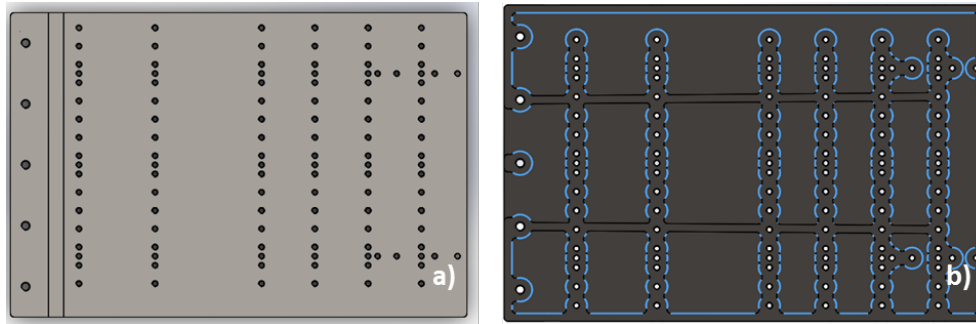


Figura 4.2: Patrón de pines de alineación final a) barrenos cara superior b) vaciado cara inferior.

En la Figura (4.3), se muestra una vista isométrica de la pieza final con el patrón de barrenos correspondiente a las diferentes medidas del ancho de las probetas, optimizando el proceso no solo para una sola medida.

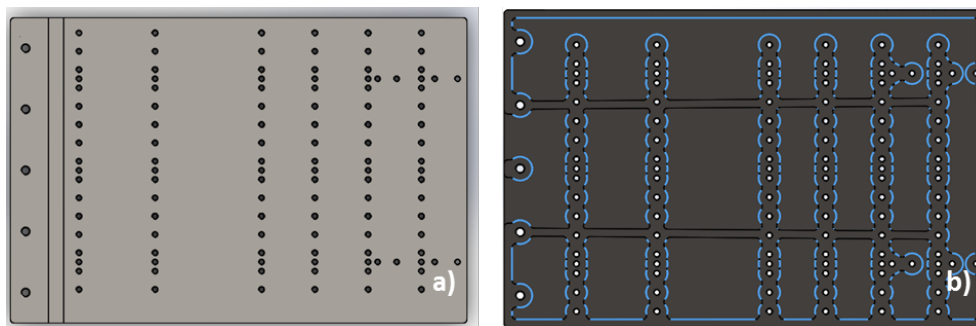


Figura 4.3: Vista isométrica placa base acero SAE/AISI 4140[21].

#### 4.1.2. Sujetador

La pieza nombrada “Sujetador”, está compuesta por dos elementos, debido a los requerimientos del diseño, que involucran el ajuste de altura para la placa de sujeción y por consecuencia la cantidad de fuerza aplicada a la unión adhesiva en la zona de traslape. La función que desempeña, es anclar y sujetar la pieza, en este caso placa en forma de espátula, que ejerce una presión constante en las probetas.

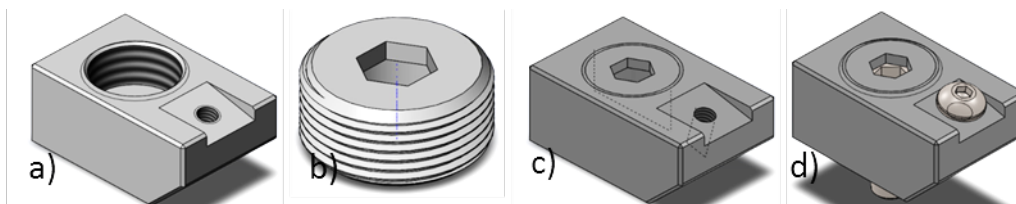


Figura 4.4: Sujetador a) elemento para posicionar, b) elemento opresor, c) unión de elementos, d) ensamble.

El opresor, está diseñado para que encajone un tornillo de cabeza hueca cilíndrica M6x1 y a su vez pueda deslizarse en la dirección arriba y abajo, manteniendo la cabeza del tornillo dentro de la caja.

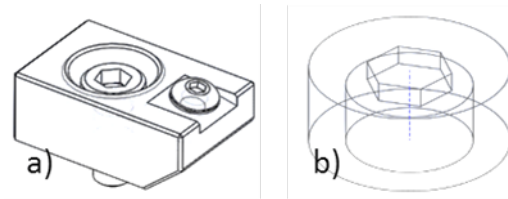


Figura 4.5: Sujetador vista isométricas cuerpo de alambre.

### 4.1.3. Placa de Sujeción

La siguiente pieza, fue diseñada con la intención de generar presión constante, así como elemento de agarre y alineación de las probetas, el resultado de la pieza es una placa de sujeción tipo espátula con barrenos a lo largo del mango para controlar la distancia de agarre.

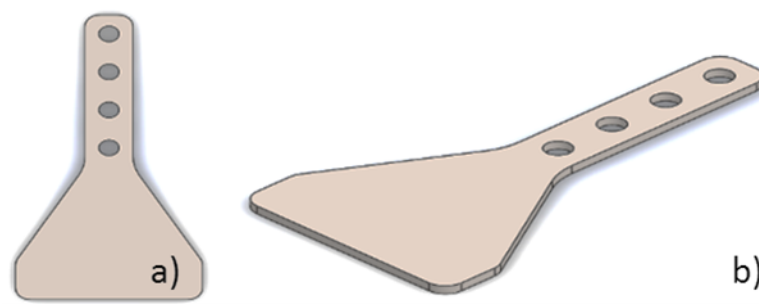


Figura 4.6: Placa de sujeción a) vista superior, b) vista isométrica.

La pieza “Placa de Sujeción”, se une al sujetador formando un componente total de sujeción de la probeta, de esta forma se garantiza la alineación y paralelismo de las uniones adhesivas montadas en la placa base de acero SAE/ASIS 4140 [21].

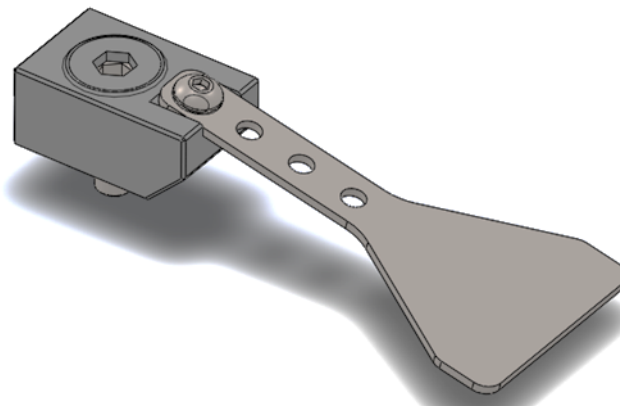


Figura 4.7: Ensamble componente total de sujeción.

### 4.1.4. Simulación del Ensamble del prototipo.

Como parte final de la etapa “Diseño asistido por computadora CAD/SolidWorks” y como objetivo específico, se realizó la simulación de ensamble en el entorno virtual que ofrece SolidWorks. Cada elemento, se montó en la plantilla con referencia de posicionamiento, la simulación muestra la

disposición de espacio en la placa de acero SAE/ASIS 4140 [21]. Su acomodo, es uniforme y exacto (respecto a las medidas planeadas de todos los componentes).

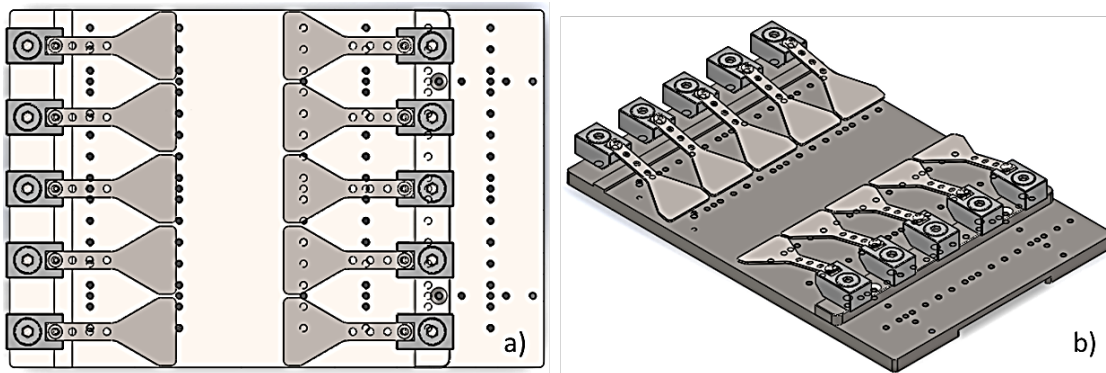


Figura 4.8: Simulación ensamble final de Herramental para fabricación de probetas estándar ASTM D1002 [1].

## 4.2. Manufactura Avanzada

En el siguiente apartado, se describe los resultados del proceso de maquinado de cada elemento o pieza del prototipo que se realizó en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial en el departamento de Manufactura Avanzada y Procesos Especiales, sede Estado de México.

### 4.2.1. Placa base acero SAE/ASIS 4140.

Se observa la ruta de maquinado que se programó mediante MasterCam, estas, corresponden al corte dimensional de la placa, acabado superficial (de las caras), el barrenado (para el patrón de pines) y el vaciado de la cara inferior.

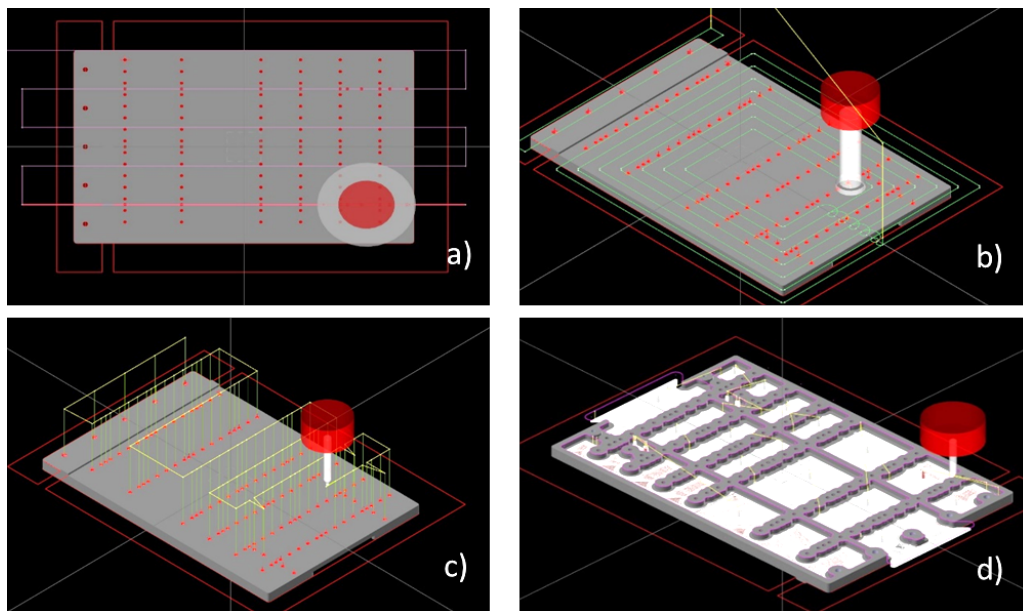


Figura 4.9: Ruta de maquinado: a) planeado, b) tope superior, c) barrenos, d) vaciado.



En la siguiente imagen, se muestra el resultado final de la fabricación de la pieza antes descrita, se observa el lado superior y la cara inferior con el vaciado que se planeó en el CAD para reducir peso en la pieza, la placa fue elaborada con Acero SAE/ASIS 4041[21].

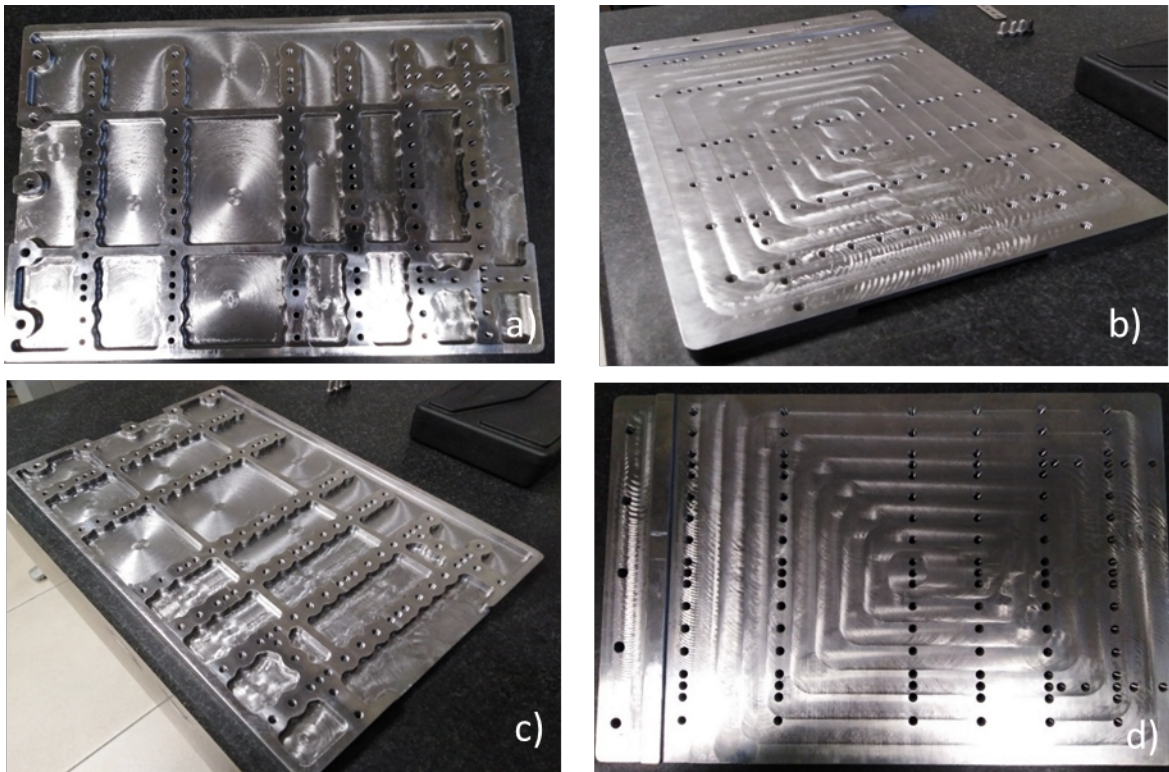


Figura 4.10: Placa Base A4041. a) Cara inferior, b) cara superior c) vista isométrica, d) vista superior.

#### 4.2.2. Sujetador Superior.

Se maquinaron 12 piezas (sujetador superior) en un solo programa, para aumentar la productividad y eficiencia del área de manufactura avanzada. En la Figura (4.11), se muestra el resumen de las trayectorias realizadas con Mastercam así como una parte del código G (del sujetador).

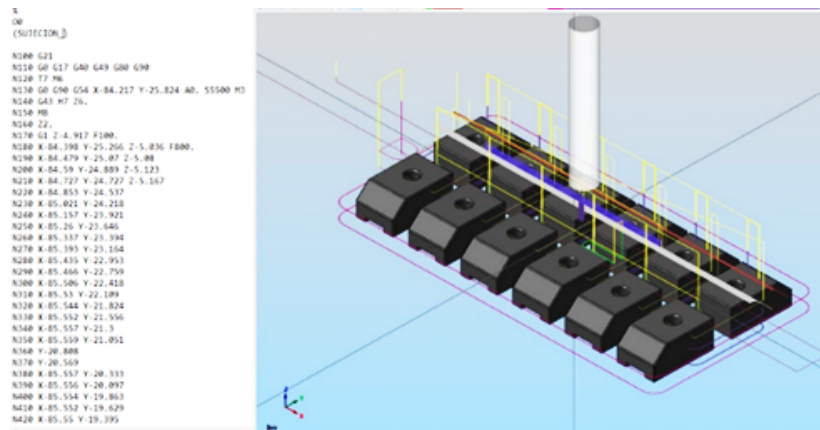


Figura 4.11: Ruta de maquinado en código G MasterCam.

El tiempo estimado en horas de ingeniería en manufactura para esta pieza fue de 8 horas en promedio, el maquinado en máquinas de control numérico resulta el más efectivo en cuanto a calidad de perfiles y precisión. Se puede apreciar la pieza más compleja dentro de todos los elementos del herramental y resulta de acuerdo al plano técnico con las especificaciones requeridas

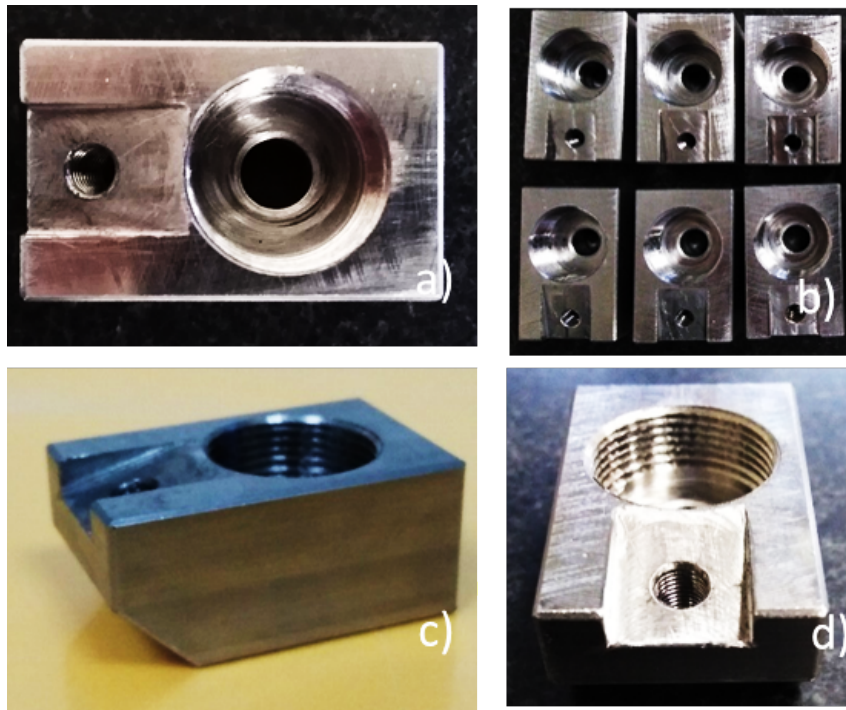


Figura 4.12: Pieza Sujetador: a) Acabado superior, b) corrida de piezas terminada, c) perfil isométrico, d) vista frontal.

### 4.2.3. Elemento opresor.

El opresor, fue fabricado en torno convencional, debido a su forma cilíndrica y las tolerancias bajas que maneja. El resultado, fue una pieza de acuerdo con el plano técnico y las especificaciones. Sin embargo, en el ensamble físico la parte inferior de la pieza no ensamblaba por completo. Por lo tanto, se realizaron las modificaciones necesarias (se redujo la cuerda en la parte inferior), consiguiendo un acoplamiento efectivo.

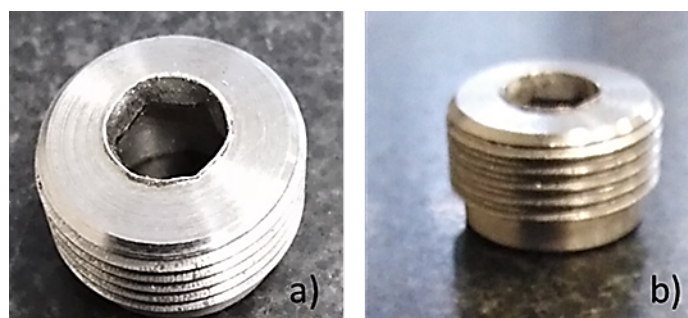


Figura 4.13: Pieza final elemento opresor: a) Vista isométrica, b) vista frontal.

#### 4.2.4. Componente total de sujeción.

El ensamble final del sujetador es el elemento que ejercerá una presión constante en las probetas, así como mantenerlas en posición.



Figura 4.14: Componente total de ensamble: a) Placa de sujeción, b) componente total vista superior c) vista lateral.

### 4.3. Control y validación de herramental por medio de pruebas físicas.

#### 4.3.1. Ensayos físicos sobre probetas de junta de traslape simple (SLJs).

La implementación del herramental para la fabricación de probetas se muestra en la Figura (4.15) y (4.16), existe una linealidad de 90°grados de los sustratos con los pines, derivado de la posición y encajonamiento con el patrón de pines, la longitud de traslape se garantiza con el tope móvil que controla las distancias así como la marca que se ve a un costado con los valores de traslape, calibrados a las distancias indicadas en ASTM D1002 [1], los resultados se pueden consultar en el Anexo (??).

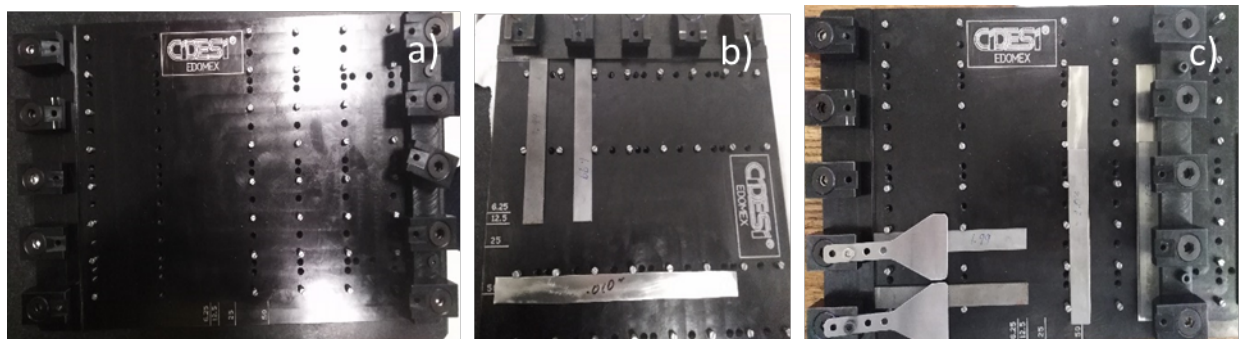


Figura 4.15: Posicionamiento de las probetas en herramental. a) Vista superior, b) alienación, c) ajuste de herramental.



El depósito del adhesivo en la superficie del sustrato se facilita ya que el sustrato esta fijo a la placa base, el estado viscoso del adhesivo hace que la unión se difícil de manipular, sin embargo el herramental mantiene a los sustrato es la posición deseada y con la presión uniforme como se muestra en la imagen.

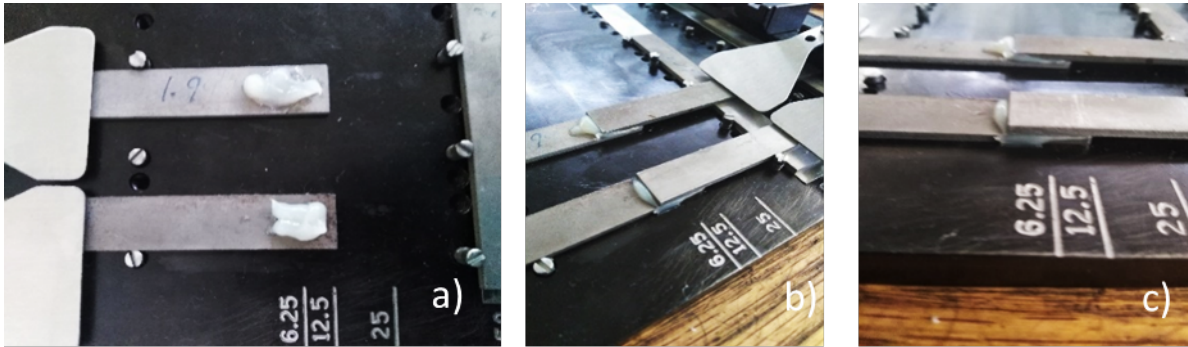


Figura 4.16: Deposición de adhesivo en la superficie MP 55420 siguiendo las recomendaciones de [1].

#### 4.3.2. Inspección dimensional del espesor de la película de adhesivo.

Los resultados de inspección dimensional (del espesor del adhesivo), se muestran en la Figura (4.17). Estos resultados, revelan que existe una muy buena aproximación entre los valores de referencia (de la regla) respecto a la diferencia de medición óptica (Image J®) y mediante diferencia de espesores de placa. La Figura (4.18) se observa la uniformidad del espesor que se pretendía, hay una mínima variación dentro del espesor consecuencia de las condiciones de repetibilidad, evidencia del control del espesor de la capa del adhesivo mediante la implementación del herramental.

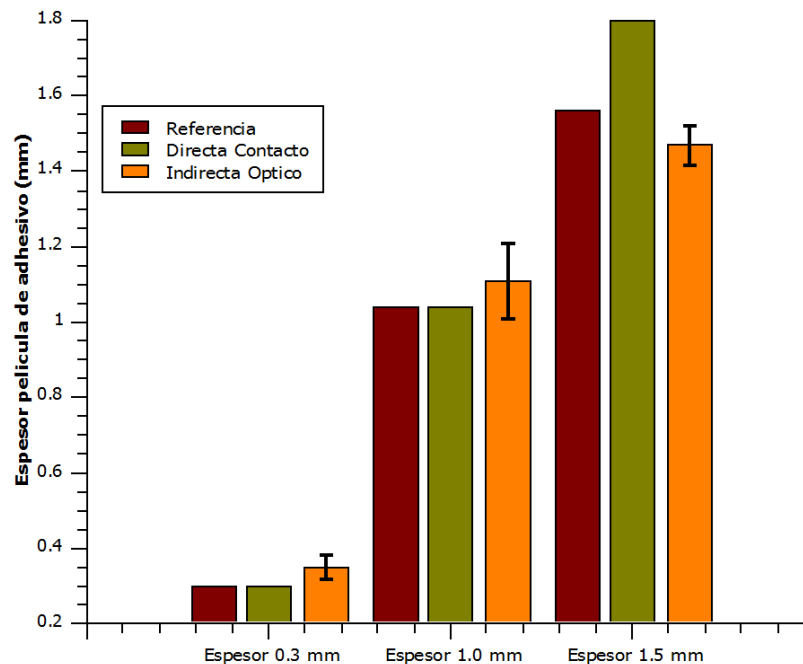


Figura 4.17: Medición de espesores de la película de adhesivo mediante sistema óptico para espesores de a) 0.30 mm, b) 1.0 mm y c) 1.5 mm.

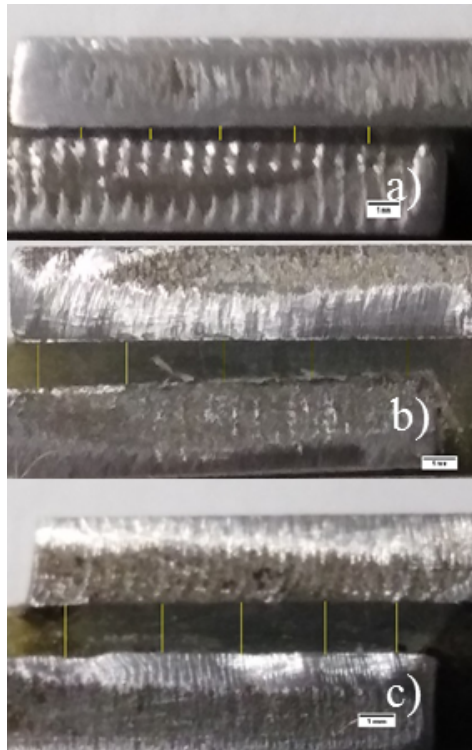


Figura 4.18: Medición de espesores de la película de adhesivo mediante sistema óptico para espesores de a) 0.30 mm, b) 1.0 mm y c) 1.5 mm.

Tabla 4.1: Resultados de la inspección dimensional de las probetas ASTM D1002.

No. Probeta	Ancho junta (mm)	Tolerancia (mm) ASTM D1002	Long. Traslape (mm)	Tolerancia (mm) ASTM D1002	Paralelismo (°)	Tolerancia (°) ASTM D1002
0.3-1	12.53		12.58		90.5	
0.3-2	12.51		12.61		90.1	
1.0-1	12.61	12.25-12.75	12.59	12.25-12.75	90.2	89-91
1.0-2	12.58		12.65		90.6	
1.5-1	12.65		12.48		90.0	
1.5-2	12.66		12.55		89.8	

### 4.3.3. Ensayo de tracción ASTM D10002.

Las muestras estándar de traslape simple se sometieron a un ensayo de tensión para evaluar las características de soporte de carga, la típica gráfica carga máxima (kN) vs desplazamiento se puede observar en la Figura (4.19). La carga máxima del espesor de 0.3 mm es de 3.73 kN la de 1.0 mm es de 2.43 kN y la de 1.5 mm es de 2.36 kN, la evidencia del gráfico revela la influencia directa del espesor de la película del adhesivo en las propiedades mecánicas de la junta adhesiva de traslape simple, la tendencia se ve en el aumento de carga y menor desplazamiento para el espesor más delgado de 0.3 mm y conforme aumenta el espesor la carga disminuye pero el desplazamiento se incrementa.

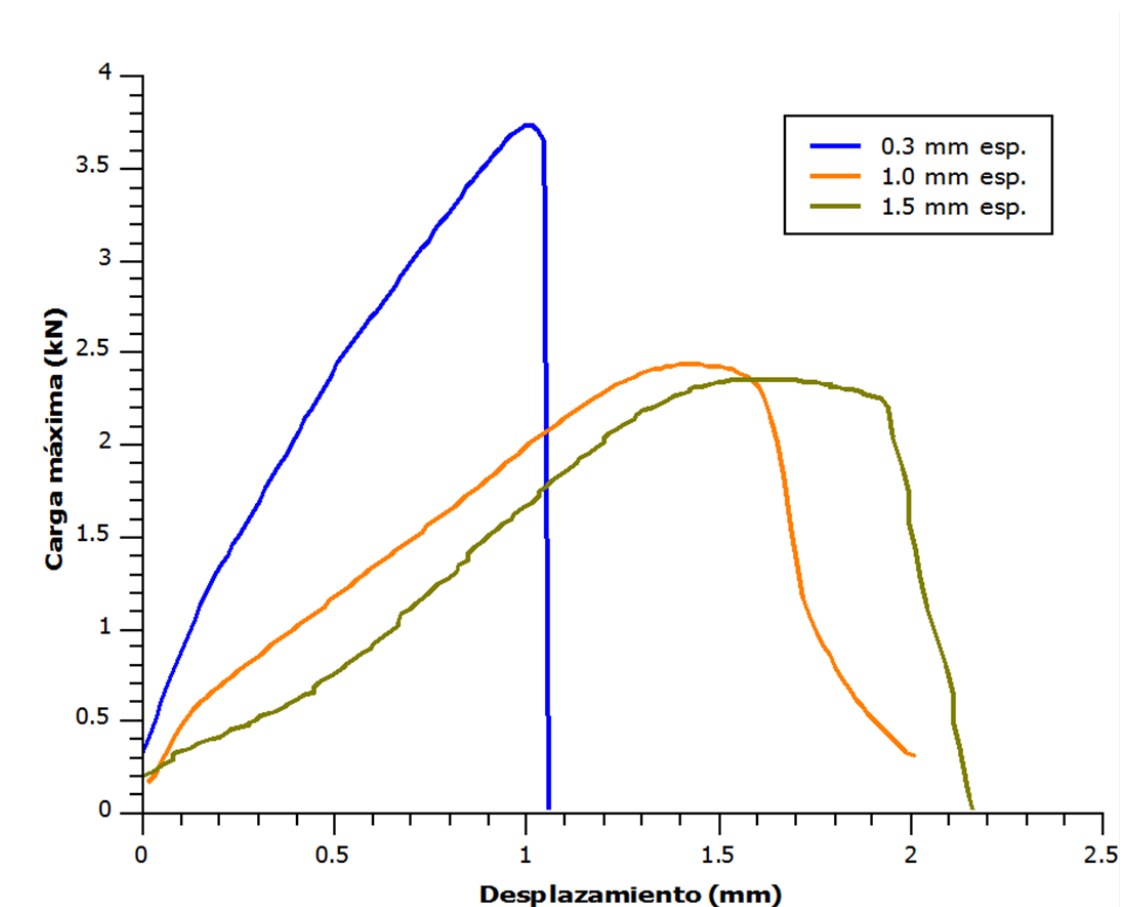


Figura 4.19: Gráfico de carga vs desplazamiento de probetas unidas con MP55420 con diferentes espesores de película de adhesivo.

Diversas fuentes [Karachalios2013a , 3, 4, 5] reportan que la resistencia de la unión aumenta a medida que disminuye el espesor de la película del adhesivo empleado, debido al momento torsión o torque, con lo anterior se fabricaron probetas con un espesor de 0.3, 1.0, 1.5 mm para identificar el comportamiento y verificar los parámetros de unión.

El resultado sobre el comportamiento de la resistencia de la unión se muestra en el gráfico Figura (4.20), el cual revela que un comportamiento inversamente proporcional entre carga máxima y espesor del adhesivo como mencionan la literatura, esto debido a que los expertos atribuyen que las uniones más gruesas contiene más defectos como huecos y micro grietas [4].

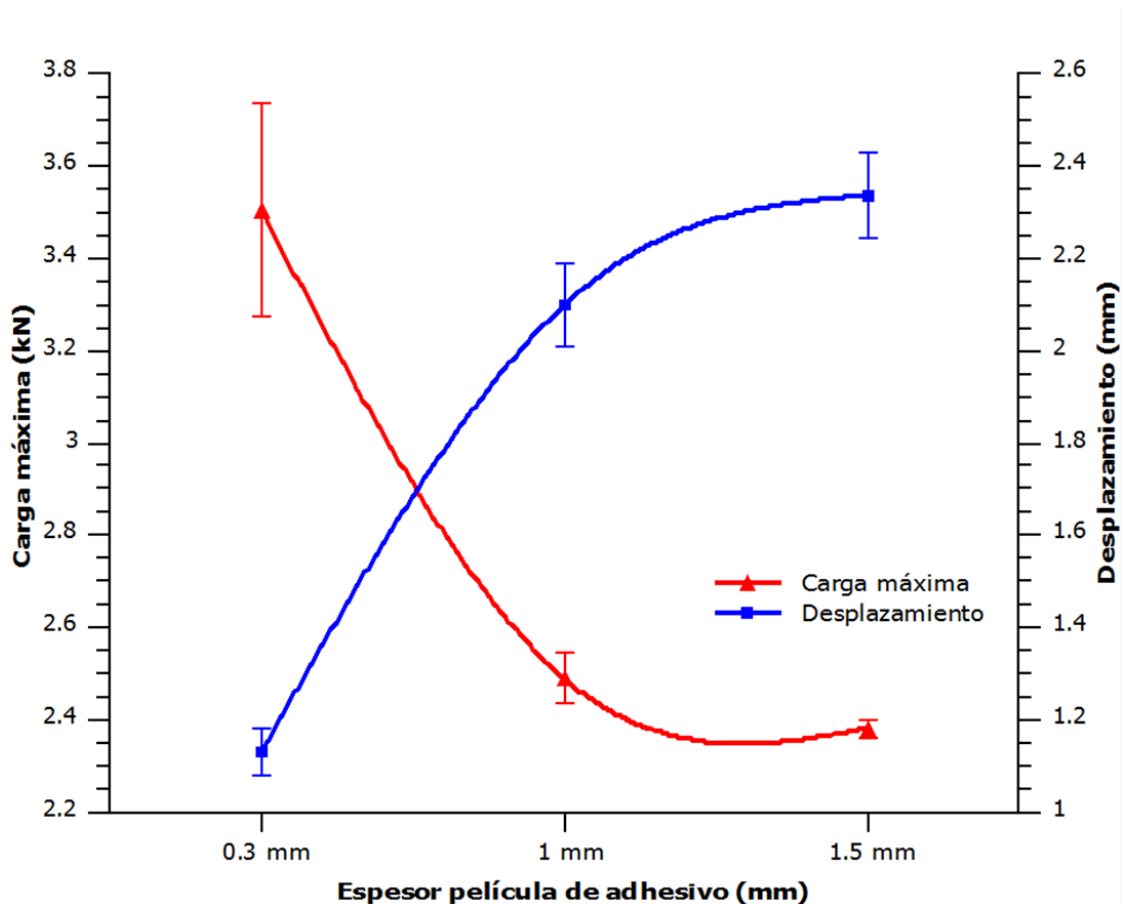


Figura 4.20: Resultados de carga máxima y desplazamiento de las probetas unidas con MP55420 con diferentes espesores de película de adhesivo.

#### 4.3.4. Inspección visual modos de falla.

Después de los ensayos mecánicos, los modos de falla se evaluaron visualmente, la observación óptica muestra el daño interior de la unión, para las juntas con el espesor de 0.3 mm la falla fue cohesiva, conforme se aumenta la capa adhesiva, se observa un mayor número de defectos como poros, microgrietas. Los modos de falla en función del espesor del adhesivo se muestran en la Figura (4.21), cada grosor de la capa adhesiva muestra diferentes particularidades en la fractura, debido a las complejas interacciones que hay en conjunto del sistema adhesivo.

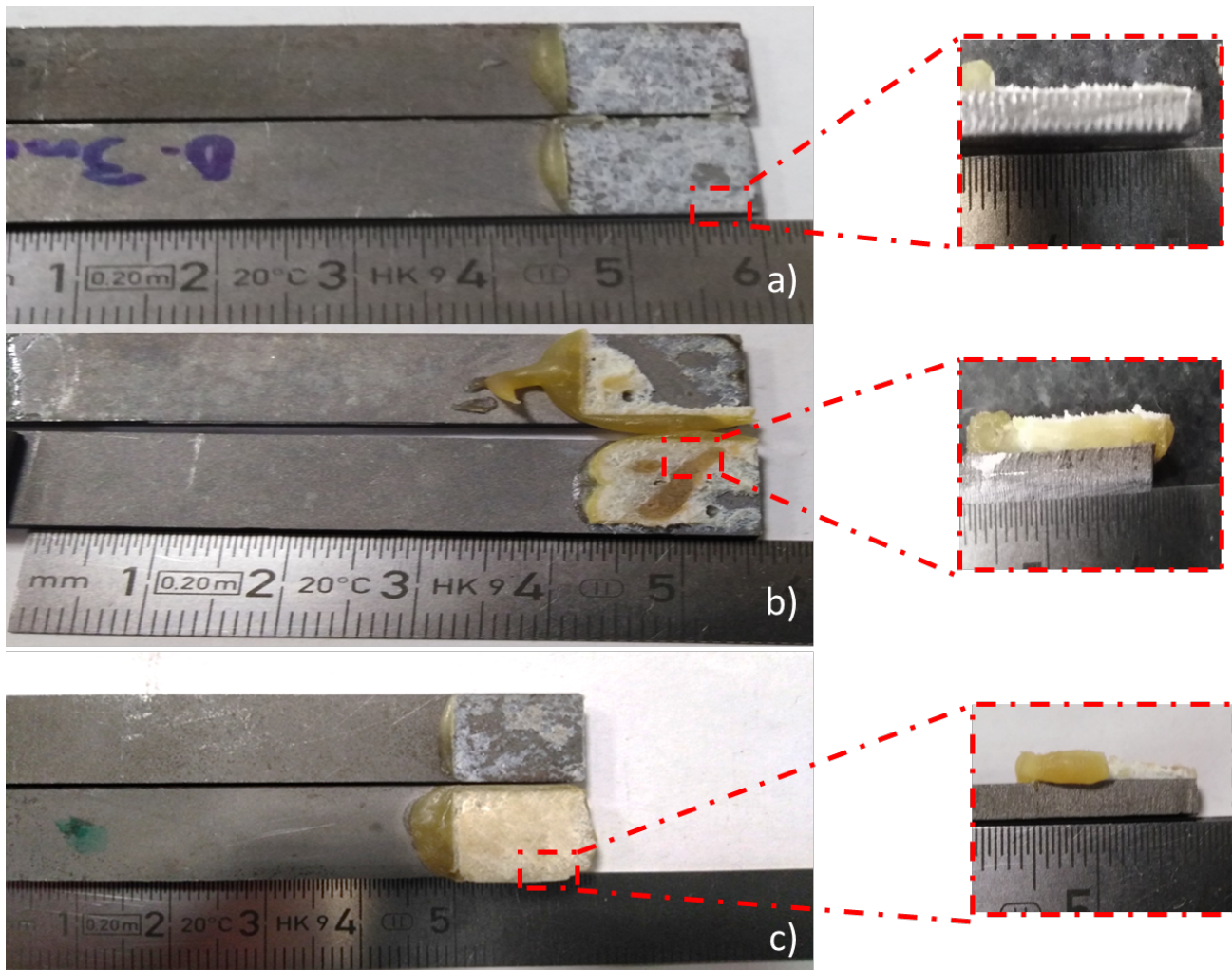


Figura 4.21: Vista superior y lateral para uniones con espesores de película de adhesivo de a)  $0.30\text{mm}$ , b)  $1.0\text{mm}$  y c)  $1.5\text{mm}$ .

En la Figura (4.21) a), el modo de falla es cohesivo, es el más deseado ya que significa una buena preparación de superficie y enclavamiento del adhesivo en las crestas del sustrato, la b) muestra de forma similar una falla cohesiva, pero de menor calidad, en la interfaz se ve el desprendimiento del adhesivo, la vista lateral se observa el comportamiento plástico del adhesivo, el blanqueamiento que presenta es debido a la deformación excesiva del adhesivo. Para espesores de capa adhesiva más altos, la falla ocurre cerca del interfaz adhesivo-adherente. Esto de acuerdo a que las teorías sugieren que las fuerzas de Van der Waals son más débiles en zona.

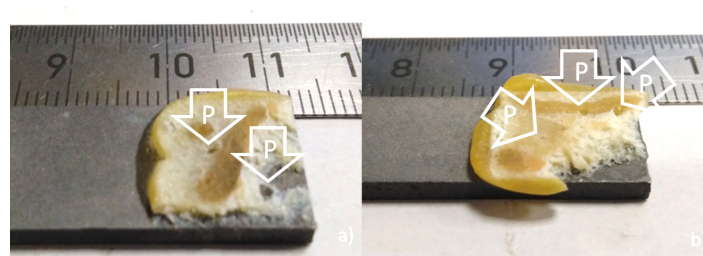


Figura 4.22: Superficie de fractura de las probetas a)  $1.0\text{mm}$  y b)  $1.5\text{mm}$  en donde se puede apreciar la presencia de porosidad.

#### 4.3.5. Caracterización de la fractura por medio de observaciones en el SEM.

La morfología de la superficie de falla se muestra en las Figuras (4.23) y (4.24). La Figura (4.23), muestra la superficie de falla de la zona de labio o arista de las probetas con espesor de la película de adhesivo de 0.3, 1.0 y 1.5mm. Como puede notarse, la primera línea de imágenes (ver Figura (4.23) a-c) muestra la superficie de fractura de la película de adhesivo con espesor de 0.3, 1.0 y 1.5mm. De dicha Figura, puede notarse que la superficie de fractura tipo desgarre con algunos hoyuelos [31, 32, 33, 34] donde la cantidad de deformación incrementa al incrementar el espesor de película. Lo anterior, se mantiene a pesar de que la muestra con espesor de 1.5mm la falla fue en la interface entre el sustrato y el adhesivo. La misma tendencia se muestra en el resto de las imágenes, pero a mayor aumento. Cabe mencionar, que en la fractura ubicada en el centro del traslape se observó la misma tendencia, pero con una apariencia de fractura más gruesa. Lo anterior, probablemente a que la velocidad de fractura es mayor a niveles de esfuerzo-deformación más bajos (en comparación con la arista).



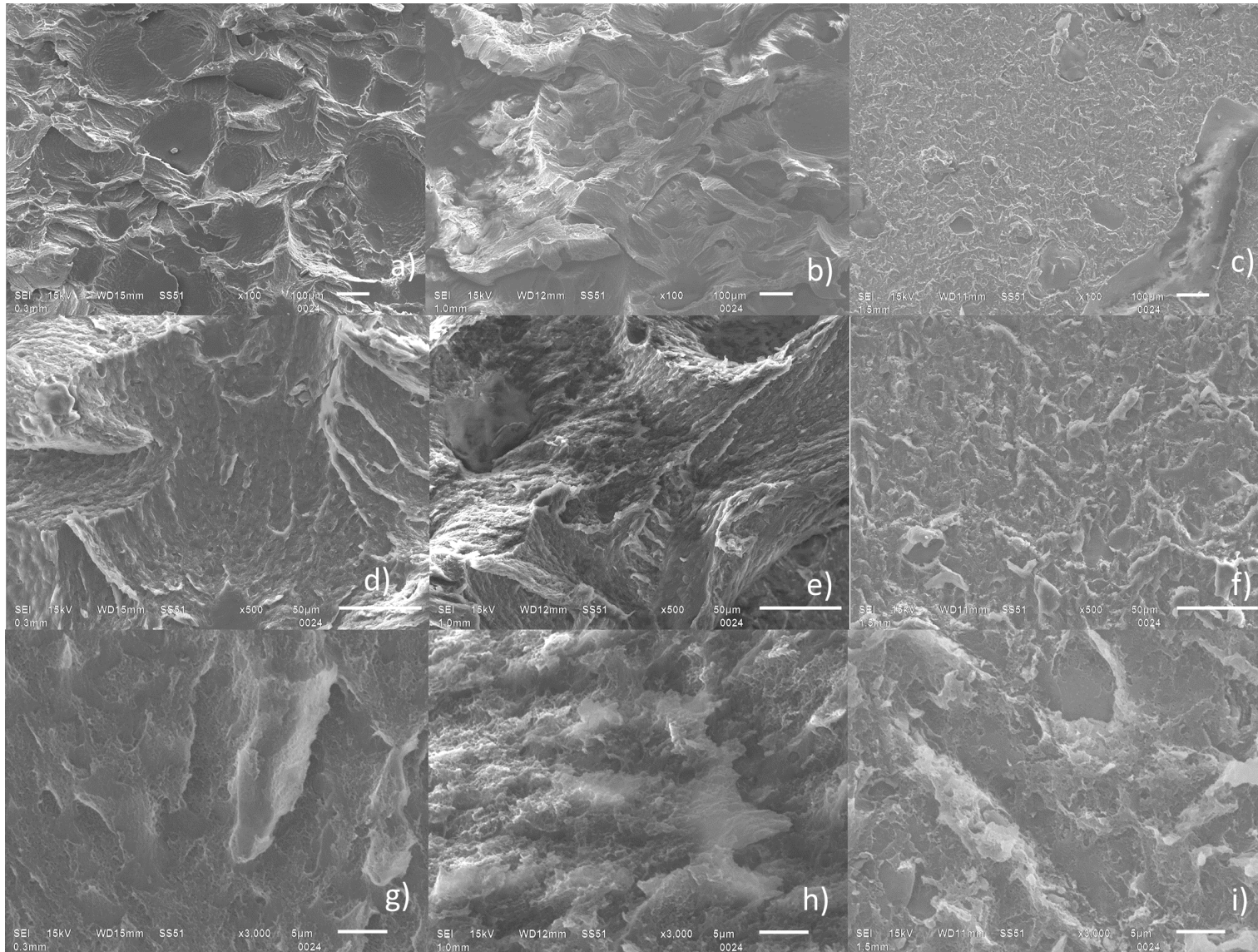


Figura 4.23: SEM Micrografías de la superficie parte borde: a) espesor  $0.3\text{mm}$  a  $100\times$ , b) espesor  $1.0\text{mm}$  a  $100\times$ , c) espesor  $1.5\text{mm}$  a  $100\times$ , d) espesor  $3.0\text{mm}$  a  $500\times$ , e) espesor  $1.0\text{mm}$  a  $500\times$ , f) espesor  $1.5$  a  $500\times$ , g) espesor  $0.3\text{mm}$  a  $3000\times$ , h) espesor  $1.0\text{mm}$  a  $3000\times$ , i) espesor  $1.5\text{mm}$  a  $3000\times$ .

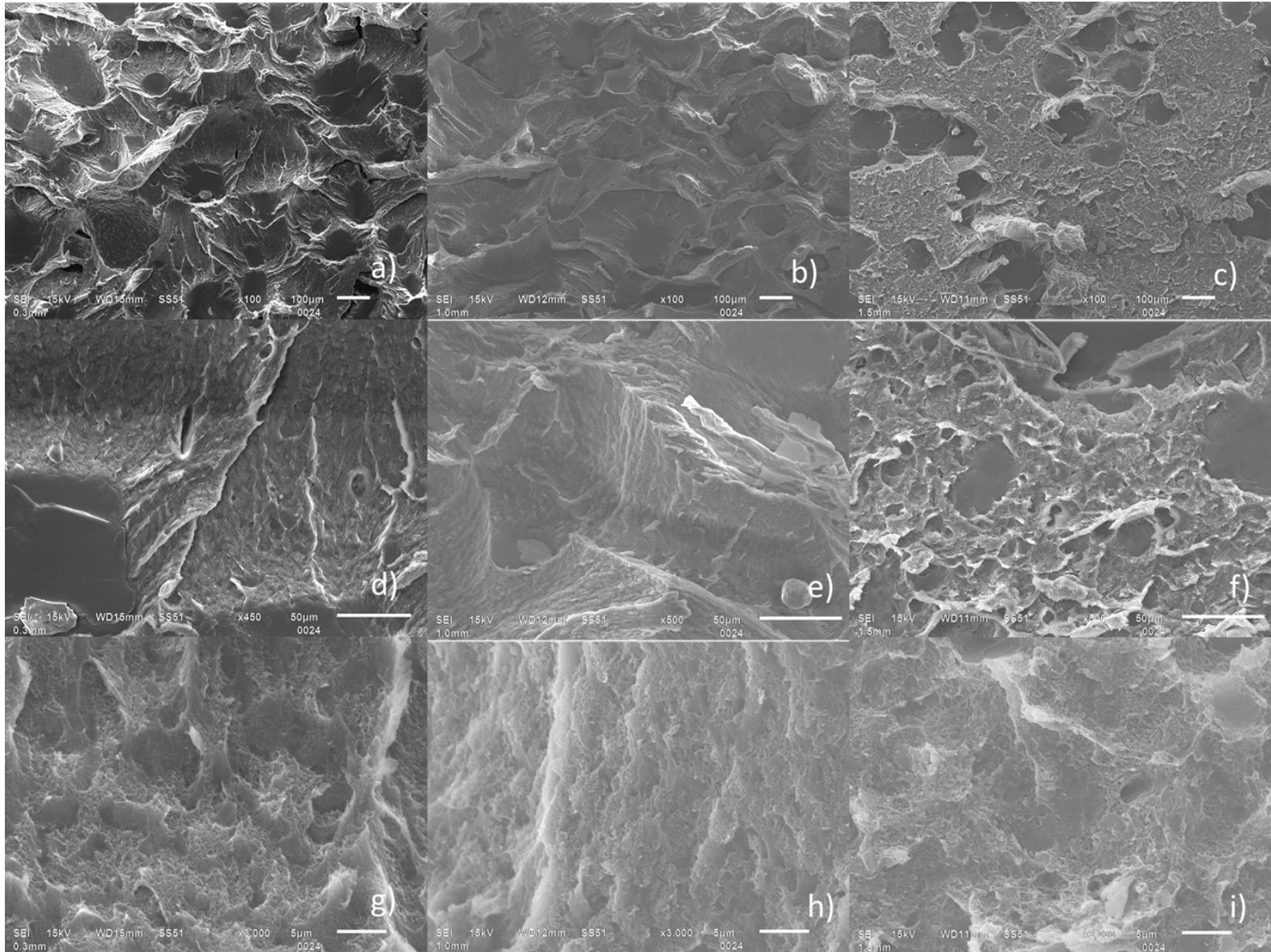


Figura 4.24: SEM Micrografías de la superficie parte interna centro: a) espesor 0.3mm a 100X, b) espesor 1.0mm a 100X, c) espesor 1.5mm a 100X, d) espesor 3.0mm a 500X, e) espesor 1.0mm a 500X, f) espesor 1.5 a 500X, g) espesor 0.3mm a 3000X, h) espesor 1.0mm a 3000X, i) espesor 1.5mm a 3000X.



# Capítulo 5

## Discusión de los resultados

A través de los resultados del diseño por computadora fue posible la reproducción en manufactura de un herramental para la fabricación de probetas ASTM D1002 [1]. Los materiales, utilizados en la fabricación del herramental son de tipo comercial y de fácil adquisición. Por lo tanto, es fácil de manufacturar y validar por diversos usuarios. En el Anexo (A), se encuentran los planos a detalle para la manufactura del herramental. Por otro lado, en el Anexo (B) se muestra la inspección dimensional de cada componente. Cabe mencionar, que, aunque algunas tolerancias están fuera de especificaciones, estas no tienen impacto directo en la geometría de las probetas como se presentará en los siguientes párrafos.

Para este herramental, es necesario realizar una validación física de la aptitud de este para verificar su desempeño. En este sentido, se procedió a fabricar probetas bajo ASTM D1002 [1]. En el Anexo (C), se muestran los resultados de la inspección geométrica de las probetas y los resultados sugieren que las dimensiones están dentro de especificaciones.

La validación de repetibilidad de las muestras, se realizó siguiendo los lineamientos de ASTM E691 [35] y los criterios de aceptación estipulados en ASTM D1002 [1]. Los resultados, mostrados en la sección y el Anexo (C) de la norma sugieren que se cumple con el criterio de repetibilidad normativo (al ser menor al 10%).

También, se procedió a validar las propiedades mecánicas y de superficie de la fractura para verificarla con la concordancia de la teoría con los resultados. En este sentido, se encontró que la carga de falla disminuía al aumentar el espesor. Por el contrario, el desplazamiento incrementa al incrementar el espesor como reportan [3, 4, 5]. El incremento del desplazamiento sugiere un incremento en la deformación plástica longitudinal tal como lo demostró la investigación de A. Akhavan-Safar [5].

Dado lo anterior podría resultar la respuesta de la junta adhesiva y coincide con el trabajo de Jamilloux et al [29], quien reportó que cuando se incrementa el espesor de la película el esfuerzo normal o de pelado disminuye, mientras que el cortante se mantiene con variación mínima (ver Figura (5.1) y 39). Cabe mencionar, que el responsable de la falla de las uniones adhesivas es el esfuerzo normal (o de pelado) tal como lo reportó Karachalios et al [36].

Las deformaciones plásticas se incrementan al incrementar el espesor debido principalmente a disminución de fuerza de Van Der Waals o fuerza debido al enclave mecánico [37].

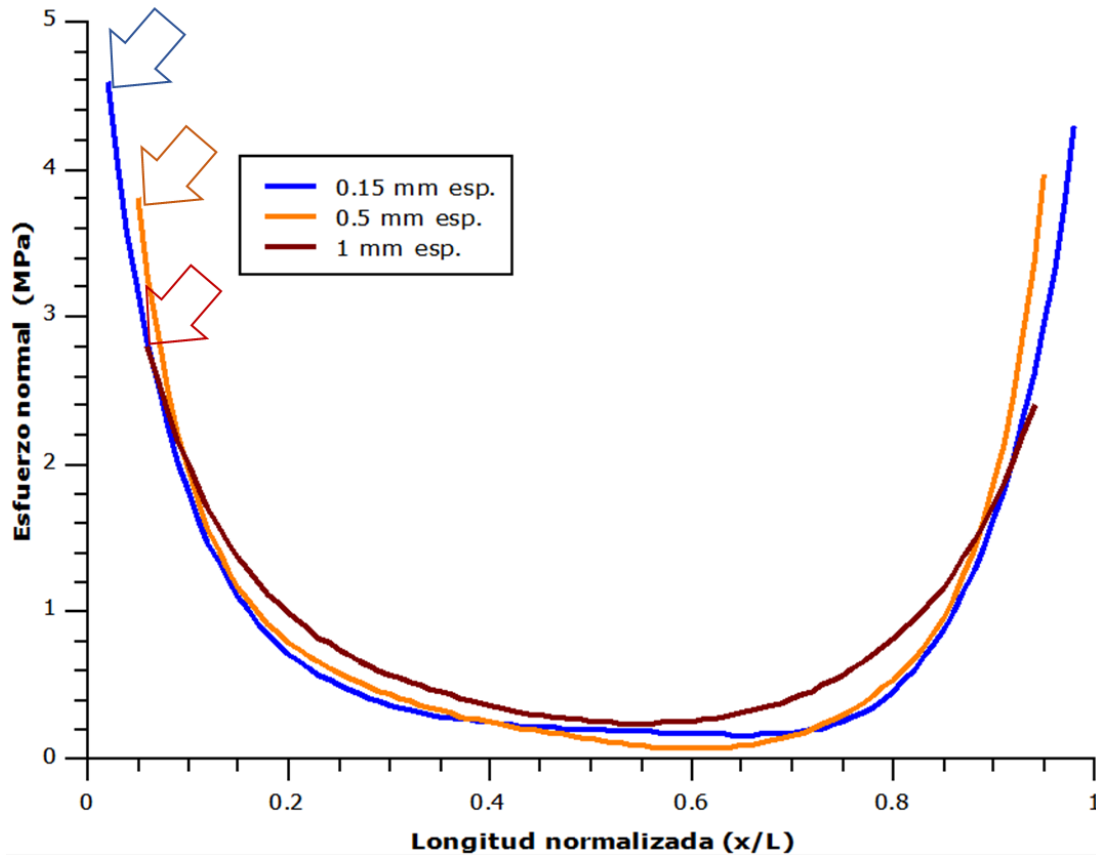


Figura 5.1: Distribución del esfuerzo normal a lo largo del traslape de las probetas unidas con MP55420 con diferentes espesores de la película de adhesivo [29]

Se observa una distribución más uniforme en los esfuerzos cortantes en la película del adhesivo (MP 55420) los resultados de las prueba se presentan en la Figura (A), se percibe una pequeña diferencia en los tres casos el más bajo para el espesor de 1.0mm.

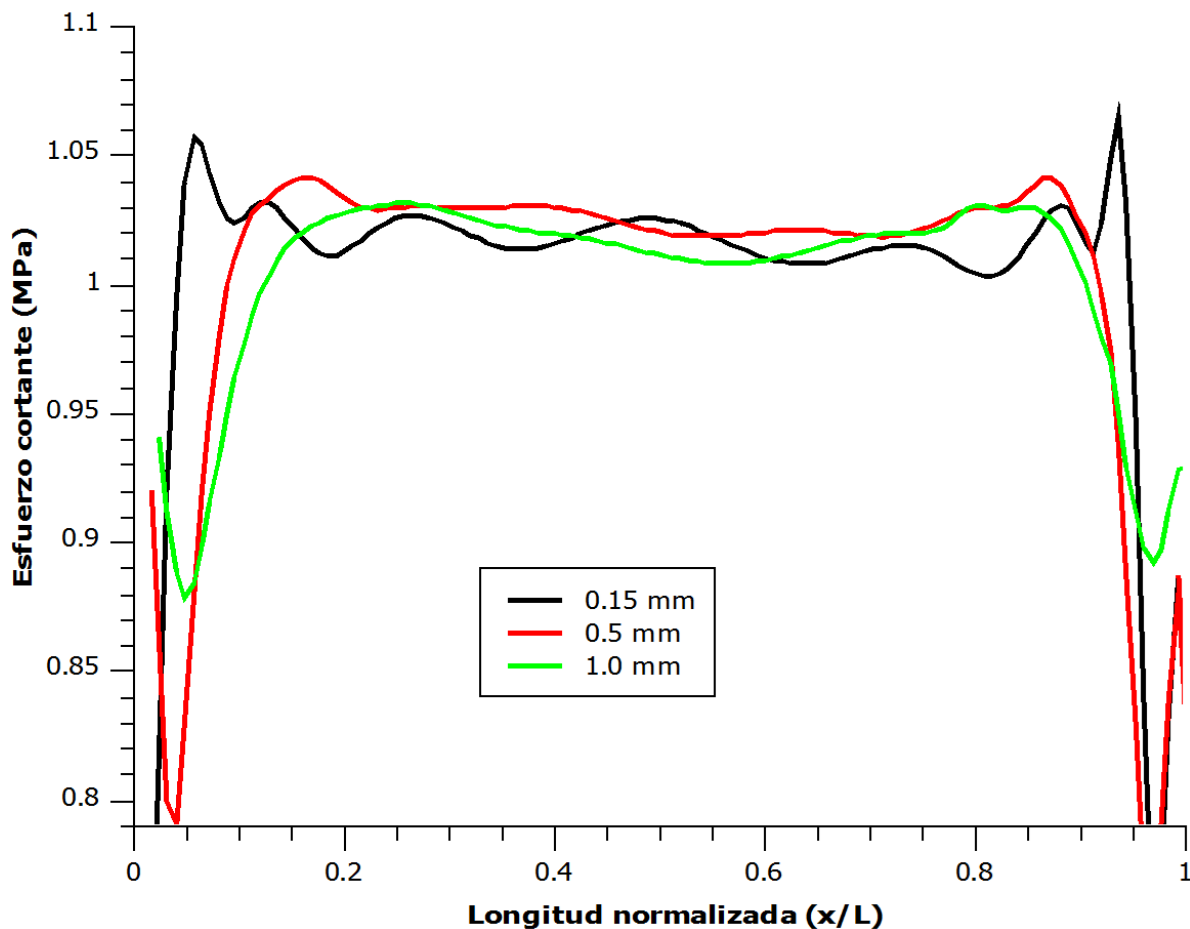


Figura 5.2: Distribución del esfuerzo cortante a lo largo del traslape de las probetas unidas con MP55420 con diferentes espesores de la película de adhesivo [29].

Al incrementar el espesor de la película adhesiva se incrementa la cantidad de defectos producidos. En este caso, pudo notarse en las probetas con espesores de 1.0 y de 1.5mm la presencia de porosidad. Lo anterior, debido a que el exceso de adhesivo no permite el escape de aire o volátiles durante el proceso de curado ( $T \approx 70^{\circ}\text{C}$ ). Además, la presión generada promueve el escape de burbujas del propio adhesivo o generadas durante el proceso de curado.

Las observaciones de la superficie de fractura mediante el SEM, revelan una falla tipo desgarre con algunos hoyuelos. Al incrementarse el espesor de la película, al desagarrarse la probeta debido a los esfuerzos normales (o de pelado) es notorio que se incrementa la deformación plástica normal al esfuerzo aplicado. Lo anterior, también pudo ser notado en la probeta con espesor de 1.5mm a pesar de que en esta muestra la falla ocurrió en la interface adhesivo-sustrato.

Finalmente, el análisis de los resultados de las diversas pruebas (geométricas y físicas) reveló, que el diseño y fabricación del instrumental es capaz de producir probetas normalizadas cuyos resultados arrojarán valores en concordancia con las investigaciones internacionales, así como la teoría de adhesión aceptada. Por lo tanto, puede ser utilizado para la realización de probetas para ensayos dentro del alcance de ASTM D1002 [1] o la realización de investigaciones científicas variando la geometría (longitud de traslape, espesor de la película de adhesivo, etc.).

# Capítulo 6

## Conclusiones

El objetivo de este trabajo fue realizar el diseño y manufactura de un herramental para la fabricación de probetas ASTM D1002 cumpliendo con la geometría y propiedades mecánicas (reportadas en la literatura). El diseño, se realizó mediante Solid Works® el maquinado mediante el empleo de MasterCam® y máquinas de control numérico CNC. Se procedió a realizar pruebas de laboratorio para validar geometría y propiedades físicas. Los resultados sugieren, que el herramental puede producir probetas dentro de las tolerancias geométricas de ASTM D1002 [1]. También, sugieren que la repetibilidad está por debajo del máximo establecido en ASTM D1002 (para los tres espesores) cumpliendo satisfactoriamente este requerimiento. Finalmente, el comportamiento mecánico y de fractura es consistente con la información publicada internacionalmente. Por lo tanto, la hipótesis inicial y objetivos se cumplen.

# Bibliografía

- [1] *Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*. ASTM International. United States, 2015.
- [2] Celso Cruz y col. “Scanning electron microscopy , atomic force microscopy and optical profilometry applied to adhesive bonding technologies Scanning electron microscopy , atomic force microscopy and optical profilometry applied to adhesive bonding technologies”. En: February (2017).
- [3] Mohd Afendi. “Study on Effect of Bond Thickness upon Adhesive Strength and Fracture Characteristics of Brittle Epoxy Adhesively Bonded Dissimilar Joint”. Tesis doct. 2011, pág. 53.
- [4] M. D. Banea, L. F.M. Da Silva y R. D.S.G. Campilho. “The effect of adhesive thickness on the mechanical behavior of a structural polyurethane adhesive”. En: *Journal of Adhesion* 91.5 (2014), págs. 331-346. ISSN: 15455823. DOI: 10.1080/00218464.2014.903802.
- [5] A. Akhavan-Safar, M. R. Ayatollahi y L. F.M. da Silva. “Strength prediction of adhesively bonded single lap joints with different bondline thicknesses: A critical longitudinal strain approach”. En: *International Journal of Solids and Structures* 109 (2017), págs. 189-198. ISSN: 00207683. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.01.022.
- [6] Lucas F M da Silva y col. *Testing Adhesive Joints, Best Practices*. 2012. ISBN: 9783527329045. DOI: 10.1002/9783527647026.
- [7] Fernando Sanchez Matran e Isidoro J. Martinez Mateo. *Uniones adhesivas y sus aplicaciones navales*. Inf. téc.
- [8] King George. William E. Blakley, II. *Glue jig to position adhesive applied specimiens*. 2012.
- [9] B Y Hirotugu Akaike. “1. Introduction and”. En: i.617 (1961), págs. 127-143. DOI: 10.1016/B978-0-8155-1533-3.50004-9.
- [10] M. D. Banea y L. F.M. Da Silva. “Adhesively bonded joints in composite materials: An overview”. En: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 223.1 (2009), págs. 1-18. ISSN: 14644207. DOI: 10.1243/14644207JMDA219.
- [11] M. Bordes y col. “Prediction of long term strength of adhesively bonded steel/epoxy joints in sea water”. En: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 29.6 (2009), págs. 595-608. ISSN: 01437496. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2009.02.013.
- [12] A. Çaik. “Effect of adherend shape on stress concentration reduction of adhesively bonded single lap joint”. En: *Engineering Review* 36.1 (2016), págs. 29-34. ISSN: 13309587.

- 
- [13] Sameer Shaikh y col. "Single Lap Adhesive Joint (SLAJ): A Study". En: *International Journal of Current Engineering and Technology IJCET INPRESSO Special Issue* July (2017), págs. 2277-4106. URL: <http://inpressco.com/category/ijcet>.
- [14] Loctite. "Tecnología De La Adhesión". En: *Madrid* (2015), pág. 59. URL: [https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso%7B%5C\\_%7Dde%7B%5C\\_%7Dadhesivos.pdf](https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/7071/7071377/curso%7B%5C_%7Dde%7B%5C_%7Dadhesivos.pdf).
- [15] René Quispe Rodríguez, Paulo Sollero y Marcelo Bertoni Rodrigues. "Stress analysis and failure criteria of adhesive bonded single lap joints". En: *21st International Congress of Mechanical Engineering* October (2011), págs. 1-9.
- [16] Paul A. Cooper y James Wayne Sawyer. "Critical Examination of Stresses in an Elastic Single Lap Joint." En: *NASA Technical Paper* 1507 (1979). ISSN: 01488341.
- [17] Rafael Forsbach. "Diseño asistido por computadora en 3D con realidad aumentada." Tesis doct. Universidad Nacional Autónoma de México., 2007. URL: <http://132.248.9.195/pd2007/0619961/Index.html>.
- [18] Xin Li. "Curriculum reform and practice of mechanical CAD/CAM technologies". En: *International Journal of Emerging Technologies in Learning* 13.8 (2018), págs. 78-89. ISSN: 18630383. DOI: 10.3991/ijet.v13i08.9040.
- [19] Autodesk.mx. *CAD/CAM | Diseño y manufactura asistidos por computadora | Autodesk*. 2019. URL: <https://www.autodesk.mx/solutions/cad-cam> (visitado 03-09-2019).
- [20] Ammar Grous. *Applied Metrology for Manufacturing Engineering*. 2013. ISBN: 9781848211889. DOI: 10.1002/9781118622551.
- [21] *Acero SISA 4140T Tratado y Revenido*. URL: <http://sisa1.com.mx/wp-content/uploads/Acero-SISA-4140T-Tratado-y-Revenido.pdf> (visitado 01-10-2019).
- [22] *MatWeb - The Online Materials Information Resource*. 2019. URL: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=afc003f4fb40465fa3df05129f0e88e6%7B%5C%7Dckck=1> (visitado 01-10-2019).
- [23] Amber Shell. *Technical Data Sheet Methacrylate Adhesive Description: MP55420 is a high performance two part methacrylate adhesive engineered*. 2013.
- [24] *ASTM A514 Steel, grade P, plate thickness 19 mm*. 2019. URL: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=399f2dcfb1774f15a27c55978e2714f8>.
- [25] "Normas y características a las que se sujetan los aceros". En: (), págs. 1-31. URL: [http://www.ahmsa.com/wp-content/uploads/2017/10/Capitulo%7B%5C\\_%7D1.pdf](http://www.ahmsa.com/wp-content/uploads/2017/10/Capitulo%7B%5C_%7D1.pdf).
- [26] V. H. Martínez-Landeros y col. "Studies on the influence of surface treatment type, in the effectiveness of structural adhesive bonding, for carbon fiber reinforced composites". En: *Journal of Manufacturing Processes* 39.January (2019), págs. 160-166. ISSN: 15266125. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.02.014.
- [27] Jamilloux Alexandre. *Simulación con elementos finidos de tres juntas en diferentes adhesivos en el caso de una pegadura acero-aluminio*. Inf. téc. CIDESI, 2017.
- [28] Celso E. Cruz-González y col. "Influence of the roughening method, joint configuration and adhesive thickness on the shear strength of ferritic stainless steel surfaces joined by methyl methacrylate". En: *Revista de Metalurgia* 54.2 (2018). ISSN: 19884222. DOI: 10.3989/revmetalm.120.
-

- 
- [29] Celso E Cruz González y col. “EVALUACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS DE UNIONES CON ADHESIVOS DE MATERIALES DISÍMILES ( ACERO – ALUMINIO ) FINITE ELEMENT EVALUATION FOR ADHESIVE JOINTS DISSIMILAR MATERIAL ( STEEL – ALUMINUM )”. En: (), págs. 1-14.
- [30] E. F. Karachalios, R. D. Adams y Lucas F.M. da Silva. “Single lap joints loaded in tension with high strength steel adherends”. En: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 43 (2013), págs. 81-95. ISSN: 01437496. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2013.01.016.
- [31] Russell A Lund. “627 - Fatigue Fracture Appearances”. En: *ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention* 11 (2002), págs. 627-640. DOI: 10.1361/asmhba0003539.
- [32] W T Becker y R J Shipley. “650 - Fracture of Plastics”. En: *ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention* 11 (2002), págs. 650-661. DOI: 10.1361/asmhba0003541.
- [33] Y. C. Lin y Xu Chen. “Investigation of the effect of hygrothermal conditions on epoxy system by fractography and computer simulation”. En: *Materials Letters* 59.29-30 (2005), págs. 3831-3836. ISSN: 0167577X. DOI: 10.1016/j.matlet.2005.06.061.
- [34] Cavitation Chevron y col. “Table 3 Deformation and Fracture Structures in Polymers”. En: (), págs. 590-591.
- [35] *Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method*. ASTM E691-19. United States.
- [36] E. F. Karachalios, R. D. Adams y Lucas F.M. da Silva. “Single lap joints loaded in tension with ductile steel adherends”. En: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 43 (2013), págs. 96-108. ISSN: 01437496. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2013.01.017.
- [37] Sina Ebnesajjad y Arthur H. Landrock. “Testing of Adhesive Bonds”. En: *Adhesives Technology Handbook* 01 (2015), págs. 339-352. DOI: 10.1016/b978-0-323-35595-7.00012-7.

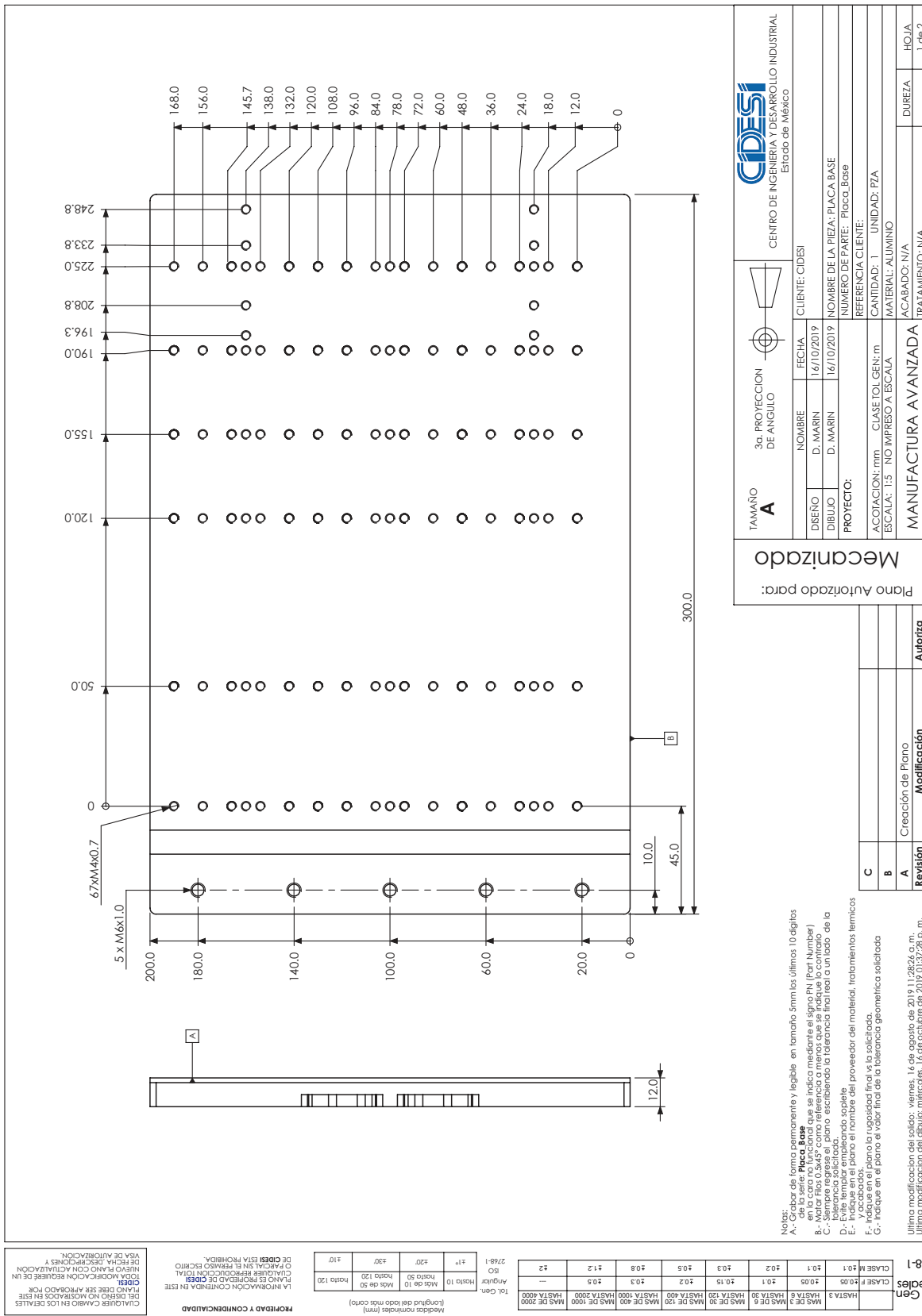
# Anexos



# Anexo A

Planos de diseño a detalle del  
herramental.





TAMAÑO A		3ra PROYECCION DE ANGIULO		CLIENTE: CIDESI	
DISEÑO D. MARIN		FECHA 16/10/2019		NOMBRE DE LA PIEZA: PLACA BASE	
DIBUJO D. MARIN		16/10/2019		NUMERO DE PARTE: Placa Base	
PROYECTO:		REFERENCIA CLIENTE:		CANTIDAD: 1 UNIDAD: PZA	
ACOTACION: mm		CLASE TOL. GEN: m		MATERIAL: ALUMINIO	
ESCALA: 1:3		IND IMPRESO A ESCALA:		ACABADO: N/A	
MANUFACTURA AVANZADA		TRATAMIENTO: N/A		DIUREZA	
HOJA 1 de 2					

Plano Autorizado para: Mecanizado	
C	
B	
A	
Modificación	
Creación de Plano	
Autoriza	

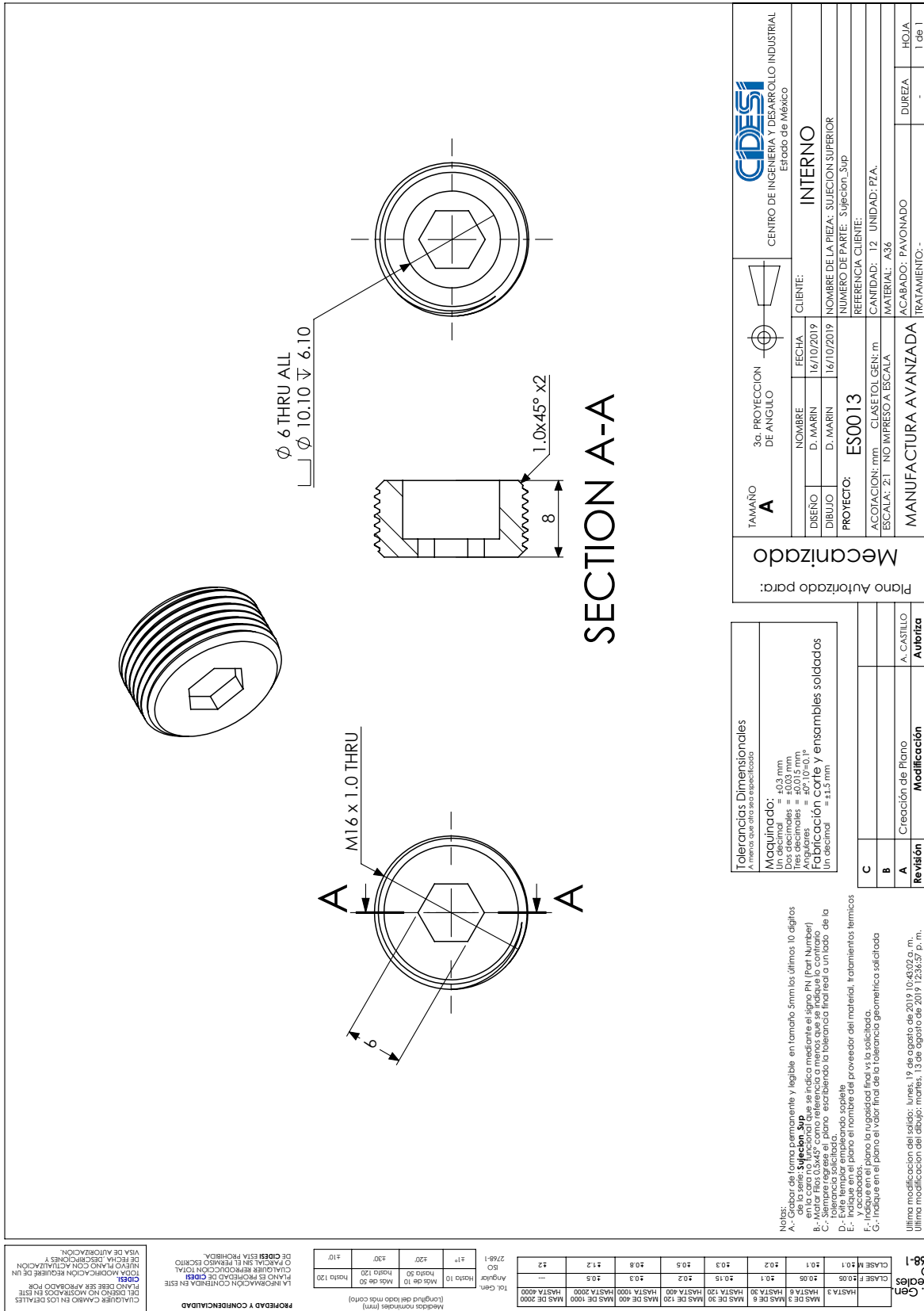
TAMAÑO A		CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL Estado de México	
DISEÑO D. MARIN		FECHA 16/10/2019	
DIBUJO D. MARIN		16/10/2019	
PROYECTO:		REFERENCIA CLIENTE:	
ACOTACION: mm		CLASE TOL. GEN: m	
ESCALA: 1:3		IND IMPRESO A ESCALA:	
MANUFACTURA AVANZADA		TRATAMIENTO: N/A	
HOJA 1 de 2			











SECTION A-A

TAMAÑO <b>A</b>		3er PROYECCION DE ANGILO	CLIENTE:	CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL Estado de México
PROYECTO: <b>ES0013</b>		NOMBRE D. MARIN	FECHA 16/10/2019	
ACOTACION: mm		NOMBRE DE LA PIEZA: SUJECION SUPERIOR		INTERNO
ESCALA: 2:1		REFERENCIA CLIENTE:		
MANUFACTURA AVANZADA		CANTIDAD: 12 UNIDAD: PZA.		HOJA 1 de 1
MATERIA: A36		ACABADO: PAVONADO		
TRATAMIENTO: -		MATERIA: A36		DUREZA

Tolerancias Dimensionales A menos que otro sea especificado	
Maquinado:	±0.3 mm
Dos decimales	±0.03 mm
Angulos	±0.1°
Fabricación Corte y ensamblajes soldados	
Un decimal	±1.5 mm

Plano Autorizado para:		Mecanizado	
C		A. CASTILLO	
B		A. CASTILLO	
A		A. CASTILLO	
Revisión		Modificación	
Creación de Plano		A. CASTILLO	

Notas:  
 A.- Grabar de forma permanente y legible en tamaño 5mm los últimos 10 dígitos de la serie. **Subjcion\_Sup** se indica mediante el signo PN (Part Number)  
 B.- Matar filos 0.5x45° como referencia a menos que se indique lo contrario.  
 C.- Siempre regrese al plano escribiendo la tolerancia final real a un lado de la línea.  
 D.- Evite temple empleando soportes.  
 E.- Indique en el plano el nombre del proveedor del material. Tratamientos térmicos.  
 F.- Indique en el plano la rugosidad final vs la solicitada.  
 G.- Indique en el plano el valor final de la tolerancia geométrica solicitada.

Ultima modificación del dibujo: Lunes, 19 de agosto de 2019 10:48:02 a. m.  
 Ultima modificación del dibujo: martes, 13 de agosto de 2019 12:36:57 p. m.

PROPIEDAD Y CONFIDENCIALIDAD  
 CUALQUIER CAMBIO EN LOS DETALLES DEL DISEÑO DEBE SER ANUNCIADO EN ESTE PLANO DEBE SER ANUNCIADO EN ESTE PLANO. MODIFICACIONES REQUIERE DE UN NUEVO PLANO CON ACTUALIZACION DE FECHA, DESCRIPCIONES Y VISA DE AUTORIZACION.

27/69-1	11	220	230	210
SO	11	220	230	210
Angulo	11	220	230	210
Holto 10	11	220	230	210
Holto 50	11	220	230	210
Holto 120	11	220	230	210

Máscara nominal (mm)	11	220	230	210
Longitud de cada máscara (mm)	11	220	230	210


CLASE M	±0.1	±0.5	±0.8	±1.2
CLASE P	±0.05	±0.2	±0.5	±0.8
HASTA 3	HASTA 30	HASTA 100	HASTA 200	HASTA 4000
HASTA 6	HASTA 30	HASTA 100	HASTA 200	HASTA 4000
HASTA 9	HASTA 30	HASTA 100	HASTA 200	HASTA 4000
HASTA 120	HASTA 400	HASTA 1000	HASTA 2000	HASTA 4000
HASTA 30	HASTA 100	HASTA 200	HASTA 4000	
HASTA 6	HASTA 30	HASTA 100	HASTA 200	HASTA 4000
HASTA 9	HASTA 30	HASTA 100	HASTA 200	HASTA 4000
HASTA 120	HASTA 400	HASTA 1000	HASTA 2000	HASTA 4000

Tol. Gen  
 2/69-1



# Anexo B

## Reporte dimensional realizado en el laboratorio de metrología de CIDESI.

									
<b>REPORTE DIMENSIONAL</b>									
F-MAN-004 REV.0									
Cliente: <b>Intemo</b>		No. De pieza: <b>13</b>			Humedad: <b>40.0 %</b>				
Fecha de inicio: <b>10-sep-19</b>		Nombre de la pieza: <b>Varios</b>			Temperatura: <b>20.0 °C</b>				
Fecha de término: <b>18-sep-19</b>									
No. de pieza	Nombre	Inspecciona	Codigo del Patron	Valores Dimensionales			Resultado	Desviación	Estado
				NOMINAL	MIN	MAX			
1	Sujetador	Dulce Marin	Distancia entre planos	1 0 .0 0	0.00	0.10	10.0021	0.0021	Dentro
			Profundidad de caja	8 .0 0	-0.03	0.03	7.9965	0.0035	Dentro
			Altura	1 5 .0 0	-0.3	0.3	15.0421	0.0421	Dentro
2	Sujetador	Dulce Marin	Distancia entre planos	1 0 .0 0	0.00	0.10	9.9000	0.1000	Dentro
			Profundidad de caja	8 .0 0	-0.03	0.03	8.0900	0.0900	Fuera
			Altura	1 5 .0 0	-0.3	0.3	15.0200	0.0200	Dentro
3	Sujetador	Dulce Marin	Distancia entre planos	1 0 .0 0	0.00	0.10	9.9200	0.0800	Dentro
			Profundidad de caja	8 .0 0	-0.03	0.03	8.0001	0.0001	Dentro
			Altura	1 5 .0 0	-0.3	0.3	15.0600	0.0600	Dentro
4	Placa	Dulce Marin	Largo	3 0 0 .0	-0.3	0.3	300.26	0.2600	Dentro
			Ancho	2 0 0 .0	-0.3	0.3	200.41	0.4100	Fuera
			Altura	1 0 .0 0	-0.3	0.3	9.98	0.0200	Dentro
5	Placa Sujeción	Dulce Marin	Distancia entre arista centro barreno	4 .9 0	0.00	0.10	4.88	0.0200	Dentro
			Distancia entre planos	1 9 .0 0	-0.03	0.03	19.49	0.4900	Fuera
			espesor	1 .6 0	-0.3	0.3	1.49	0.1100	Dentro
6	Placa Sujeción	Dulce Marin	Distancia entre arista centro barreno	4 .9 0	0.00	0.10	4.81	0.0900	Dentro
			Distancia entre planos	1 9 .0 0	-0.03	0.03	19.04	0.0400	Fuera
			espesor	1 .6 0	-0.3	0.3	1.50	0.1000	Dentro
7	Placa Sujeción	Dulce Marin	Distancia entre arista centro barreno	4 .9 0	0.00	0.10	4.84	0.0600	Dentro
			Distancia entre planos	1 9 .0 0	-0.03	0.03	19.08	0.0800	Fuera
			espesor	1 .6 0	-0.3	0.3	1.48	0.1200	Dentro
8	Opresor	Dulce Marin	Altura	8 .0 0	-0.3	0.3	8.15	0.1500	Dentro
			Diaméto	6 .0 0	-0.3	0.3	5.87	0.1300	Dentro
			Altura	8 .0 0	-0.3	0.3	8.18	0.1800	Dentro
9	Opresor	Dulce Marin	Diaméto	6 .0 0	-0.3	0.3	5.94	0.0600	Dentro
			Altura	8 .0 0	-0.3	0.3	8.36	0.3600	Dentro
			Diaméto	6 .0 0	-0.3	0.3	5.96	0.0400	Dentro
10	Opresor	Dulce Marin	Altura	1 3 .0 0	-0.3	0.3	11.78	1.2200	Fuera
			Diaméto	4 .0 0	-0.3	0.3	3.85	0.1500	Dentro
			Altura	1 3 .0 0	-0.3	0.3	11.98	1.0200	Fuera
11	Barreno	Dulce Marin	Diaméto	4 .0 0	-0.3	0.3	3.75	0.2500	Dentro
			Altura	1 3 .0 0	-0.3	0.3	12.99	0.0100	Dentro
			Diaméto	4 .0 0	-0.3	0.3	3.82	0.1800	Dentro
12	Barreno	Dulce Marin	Altura	1 3 .0 0	-0.3	0.3	12.99	0.0100	Dentro
			Diaméto	4 .0 0	-0.3	0.3	3.82	0.1800	Dentro
			Altura	1 3 .0 0	-0.3	0.3	12.99	0.0100	Dentro
13	Barreno	Dulce Marin	Altura	1 3 .0 0	-0.3	0.3	12.99	0.0100	Dentro
			Diaméto	4 .0 0	-0.3	0.3	3.82	0.1800	Dentro
			Altura	1 3 .0 0	-0.3	0.3	12.99	0.0100	Dentro

# Anexo C

## Repetibilidad del espesor de la película del adhesivo MP 55420 a 0.3, 1.0, 1.5 mm.

Espesor de película de adhesivo de 0.3 mm									
No. Probeta	Carga máxima (N)	Carga máxima (Kg)	Ancho junta (mm)	Ancho junta (cm)	Long. Traslape(mm)	Long. Traslape(cm)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	Repetibilidad (%) <sup>b</sup>	Repetibilidad (%) <sup>c</sup>
1	3274	333.86	12.5	1.25	12.5	1.25	213.67	6.18 %	11.61 %
2	3736	380.97	12.5	1.25	12.5	1.25	243.82		
							Promedio	228.75	
							Desv. Est.	15.08	

Espesor de película de adhesivo de 1.0 mm									
No. Probeta	Carga máxima (N)	Carga máxima (Kg)	Ancho junta (mm)	Ancho junta (cm)	Long. Traslape(mm)	Long. Traslape(cm)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	Repetibilidad (%) <sup>b</sup>	Repetibilidad (%) <sup>c</sup>
1	2437	248.574	12.5	1.25	12.5	1.25	159.09	2.10 %	11.61 %
2	2544	259.488	12.5	1.25	12.5	1.25	166.07		
							Promedio	162.58	
							Desv. Est.	3.49	

Espesor de película de adhesivo de 1.5 mm									
No. Probeta	Carga máxima (N)	Carga máxima (Kg)	Ancho junta (mm)	Ancho junta (cm)	Long. Traslape(mm)	Long. Traslape(cm)	Resistencia (Kg/cm <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	Repetibilidad (%) <sup>b</sup>	Repetibilidad (%) <sup>c</sup>
1	2362	240.924	12.5	1.25	12.5	1.25	154.19	0.79 %	11.61 %
2	2400	244.8	12.5	1.25	12.5	1.25	156.67		
							Promedio	155.43	
							Desv. Est.	1.24	

<sup>a</sup>. Se calculó considerandola

<sup>b</sup>. Se utilizó el porcentaje para normalizar los resultados

<sup>c</sup>. Debido a que la Tabla 1 de ASTM D1002-10 no contiene valores similares a las del adhesivo empleado en el experimento, se emplearon los valores máximos propuestos en dicha Tabla.