

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES
JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR
FDM

RICARDO VARGAS MURILLO
DYLAN STIVEN GARCIA TORO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISION DE INGENIERIAS
BOGOTÁ
2024

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES
JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR
FDM

RICARDO VARGAS MURILLO

2228645

DYLAN STIVEN GARCIA TORO

222249

TRABAJO DE GRADO

JORGE ANDRES GARCIA BARBOSA

OSCAR RODRIGO LOPEZ VACA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERIAS

BOGOTÁ

2024

CONTENIDO

1	RESUMEN.....	7
2	INTRODUCCIÓN	8
3	OBJETIVOS	9
3.1	Objetivo general.....	9
3.2	Objetivos específicos	9
4	MODELADO EN SOFTWARE CAD DE UNIONES JAPONESAS ORIENTADOS A LA IMPRESIÓN 3D POR FDM.....	10
4.1	Revisión bibliográfica de tipos de empalme	10
4.2	Criterios de ingeniería para selección de empalmes	11
4.3	Selección de tres tipos de empalmes japoneses	12
4.4	Modelo 3D de los empalmes seleccionados.....	14
4.4.1	Características geometrías empalme Dovetail	15
4.4.2	Características geometrías empalme Notched	15
4.4.3	Características geometrías empalme Scarf.....	16
5	SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS EMPALMES SELECCIONADOS.....	18
5.1	Norma técnica ISO-178 para ensayos de flexión.....	18
5.2	Modelo base-viga continua de referencia	19
5.2.1	Configuración de condiciones de frontera para la simulación	20
5.2.2	Convergencia del modelo base	25
5.2.3	Análisis de resultados de la viga de referencia	27
5.3	Análisis de resultados de viga Dovetail	28
5.3.1	Condiciones de contacto	28
5.3.2	Convergencia de malla.....	29
5.3.3	Estado de esfuerzos y desplazamientos viga Dovetail.....	30
5.4	Análisis de resultados viga Notched	33
5.4.1	Condiciones de carga	33
5.4.2	Convergencia del modelo Notched	33
5.4.3	Estado de esfuerzos y desplazamientos viga Notched	34

5.5	Análisis de resultados viga Scarf	35
5.5.1	Condiciones de carga	35
5.5.2	Convergencia de malla.....	35
5.5.3	Estado de esfuerzos y desplazamientos viga Scarf	36
5.6	Resumen de resultados	38
6	Nueva propuesta de diseño de empalme combinado	39
6.1.1	Características geométricas viga de empalme combinado.....	39
6.1.2	Condiciones de carga	40
6.1.3	Convergencia del modelo.....	40
6.1.4	Estado de esfuerzos y desplazamientos viga de empalme combinado	41
7	CONCLUSIONES	43
9	RECOMENDACIONES	44
10	BIBLIOGRAFÍA	45

Lista de Tablas

Tabla 1. Diseños preliminares de empalmes en impresión 3D	12
Tabla 2. Matriz de decisión para los empalmes	14
Tabla 3. Resultados convergencia simulación de referencia	26
Tabla 4. Resultados de simulación de viga de referencia	27
Tabla 5. Resultados y selección de tamaño de malla para los modelos de empalme Dovetail	30
Tabla 6. Resultados simulación Dovetail.....	32
Tabla 7. Resultados y selección de tamaño de malla para los modelos de empalme Notched	33
Tabla 8. Resultados simulación Notched.....	34
Tabla 9. Resultados y selección de tamaño de malla para los modelos de empalme Scarf.	36
Tabla 10. Resultados simulación Scarf.....	37
Tabla 11. Resumen de las simulaciones realizadas.....	38
Tabla 12. Resultados y selección de tamaño de malla para los modelos de empalme Combinado.....	41
Tabla 13. Resultados simulación empalme combinado	42

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. (a) Junta de escuadra oblicua y (b) Boca de pájaro o empalme V [8]	10
Ilustración 2. Empalme Notched impreso en 3D.	15
Ilustración 3. Planimetría de empalme Dovetail	15
Ilustración 4. Planimetría de empalme Notched	16
Ilustración 5. Planimetría de empalme Scarf	17
Ilustración 6. Posición de la muestra de prueba [11]	18
Ilustración 7. Viga simplemente apoyada [12]	19
Ilustración 8. Esquema viga de referencia y distancia entre apoyos.....	19
Ilustración 9. Menú de las condiciones de frontera en ANSYS.....	20
Ilustración 10. División en volúmenes de interés y detalle de punto de presión de la fuerza	21
Ilustración 11. Curvas esfuerzo-deformación de PLA impreso en 3D por FDM (a)[13] y (b)[14]	21
Ilustración 12. Material PLA en el software ANSYS	22
Ilustración 13. Mallada simulación de referencia	23
Ilustración 14. Controles de tiempo ANSYS	23
Ilustración 15. Fuerza vs alargamiento de filamento obtenido por extrusión [14]	24
Ilustración 16. Condiciones de carga viga de referencia.....	25
Ilustración 17. Convergencia Simulación de referencia	26

Ilustración 18. Estado de esfuerzo de Von Mises para la sección central de la viga de referencia.....	27
Ilustración 19. Configuración de contactos ANSYS	28
Ilustración 20. Coeficiente de fricción estático sin lubricante de tipos de PLA-PLA [23]..	29
Ilustración 21. Convergencia de malla Dovetail (a) hembra, (b) pin y (c) macho.....	30
Ilustración 22. Resultados Von Mises simulación Dovetail	31
Ilustración 23. Resultados desplazamiento simulación Dovetail.....	32
Ilustración 24. Convergencia de malla Notched (a) hembra, (b) pin y (c) macho	33
Ilustración 25. Resultados Von Mises simulación Notched	34
Ilustración 26. Convergencia de malla Scarf (a) hembra, (b) pin 1, (c) pin 2 y (d) macho .	36
Ilustración 27. Resultados Von Mises simulación Scarf.....	37
Ilustración 28. Empalme combinado.....	39
Ilustración 29. Planimetría de empalme Combinado	40
Ilustración 30. Convergencia de malla de empalme Combinado (a) hembra, (b) pin y (c) macho	41
Ilustración 31. Resultados Von Mises simulación empalme combinado.....	42

1 RESUMEN

La impresión 3D ha revolucionado los procesos de fabricación, pero las limitaciones en el tamaño de las piezas impresas en 3D han impulsado la búsqueda de soluciones eficientes para el ensamble de componentes de gran tamaño. En este contexto, se ha explorado la adaptación de los empalmes tradicionales japoneses a la tecnología de impresión 3D mediante el proceso por deposición fundida (FDM), con el objetivo de desarrollar uniones resistentes y fiables que permitan superar las limitaciones actuales. A través de simulaciones computacionales en ANSYS, se evaluaron tres tipos de empalmes (Dovetail, Notched y Scarf) sometidos a carga de flexión, siguiendo la norma ISO-178. Los resultados revelaron que el empalme Notched presentó una mejor distribución de tensiones, el Scarf mostró una mayor uniformidad, aunque con desplazamientos considerables y el Dovetail se observaron altas concentraciones de esfuerzos. Basándose en estos hallazgos, se diseñó un nuevo empalme combinado que integra las ventajas de los diseños anteriores, logrando una distribución de esfuerzos más eficiente y reduciendo los desplazamientos. Este estudio demuestra el potencial de los empalmes japoneses adaptados a la impresión 3D como una solución viable para el ensamble de piezas de gran tamaño, ofreciendo una alternativa robusta y eficiente para la manufactura aditiva.

2 INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios en los años ochenta, la impresión 3D ha evolucionado significativamente, pasando de ser una herramienta de prototipado rápido a convertirse en un medio para la fabricación de objetos complejos con una amplia variedad de materiales, como metales, polímeros y plásticos [1]. Esta tecnología ha encontrado aplicaciones en diversos campos, incluyendo la medicina; donde se utiliza para la creación de implantes y prótesis a medida [2], así como en la industria aeroespacial; destacándose por su capacidad para producir componentes ligeros y resistentes [3]. No obstante, una de las principales limitaciones de la impresión 3D es el tamaño del área de impresión, lo que restringe la fabricación de piezas de gran tamaño. Para superar esta restricción es necesario dividir las piezas en partes más pequeñas y ensamblarlas posteriormente, un proceso que presenta retos relacionados con la integridad estructural y la precisión del ensamble[4].

En respuesta a estos desafíos, se han desarrollado innovaciones técnicas de unión, como los empalmes inspirados en la carpintería tradicional japonesa. Estas técnicas permiten ensambles robustos sin necesidad de adhesivos [4], [5]. Los empalmes tradicionales japoneses destacan por su precisión, reversibilidad, resistencia y facilidad de montaje, características que los hacen ideales para diversas aplicaciones. Recientes investigaciones han analizado su resistencia y viabilidad estructural a través de estudios numéricos en uniones esquineras de troncos, donde la cola de milano y otras geometrías parecen funcionar bien bajo ciertas cargas, comprobado con simulaciones por elementos finitos [6] y también por experimentos que evalúan la capacidad de carga del empalme bajo tensión, donde se concluye “En el caso de una unión de cola de milano entre el dintel y la viga collar, se ha confirmado su capacidad para transferir fuerzas de tracción” [7].

Este proyecto aborda las limitaciones de los empalmes japoneses a través del diseño que permitan ensamblar secciones de manera individual, robusta y precisa. En búsqueda de que la pieza final conserve sus propiedades estructurales y funcionales. Se evaluaron distintos tipos de empalme inspirados en la carpintería tradicional que pueden ser aplicados a la impresión 3D por deposición de material FDM (por sus siglas en inglés), con ayuda de la simulación computacional utilizando el método de los elementos finitos FEM (por sus siglas en inglés), determinando el mejor diseño en términos de resistencia mecánica y distribución de cargas que producen esfuerzos de flexión debido a que los esfuerzos de flexión para los casos son críticos.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento mecánico de tres tipos de empalmes utilizados en la carpintería japonesa aplicados en el proceso de impresión 3D por FDM.

3.2 Objetivos específicos

- Modelar en software CAD tres tipos de empalmes de la carpintería japonesa para aplicar en impresión 3D por FDM.
- Seleccionar el empalme japonés más adecuado para aplicación en impresión 3D por FDM por medio del método de los elementos finitos.

4 MODELADO EN SOFTWARE CAD DE UNIONES JAPONESAS ORIENTADOS A LA IMPRESIÓN 3D POR FDM

4.1 Revisión bibliográfica de tipos de empalme

Un empalme japonés se refiere a los métodos de carpintería altamente especializados y complejos que permiten la unión de piezas de madera sin necesidad de refuerzos metálicos, además, la precisión de los empalmes japoneses en su ensamblaje, combina principios de resistencia y funcionalidad adecuados para los materiales y diseños arquitectónicos tradicionales en Japón, arquitectura universalmente conocida por su estética [8].

La Ilustración 1(a) nos deja ver un empalme donde existe un pin o pasador, además del macho y la hembra. Los pines existen para unir los miembros firmemente evitando el desplazamiento, normalmente se busca atravesar ambas estructuras. El pin puede variar en su geometría y podría ser ayudado de un tornillo para que la unión carezca de desplazamiento y obtenga más firmeza. Normalmente este tipo de empalmes se realizaba en las vigas residenciales japonesas.

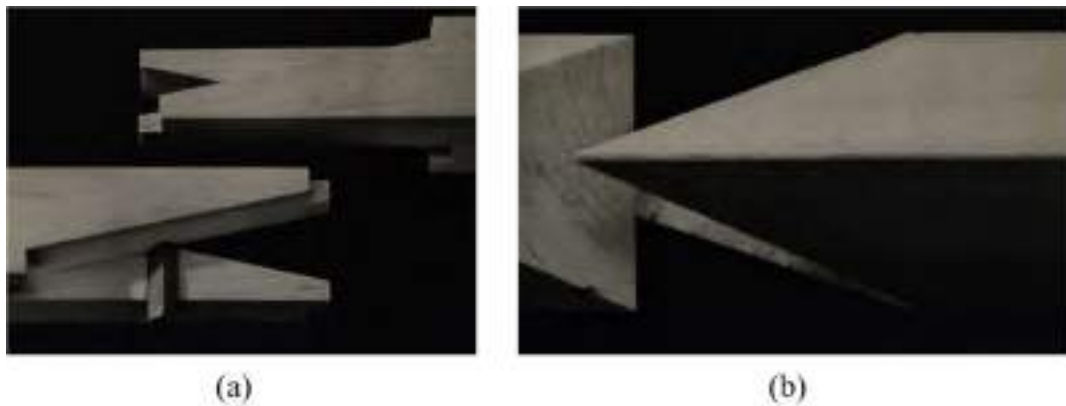


Ilustración 1. (a) Junta de escuadra oblicua y (b) Boca de pájaro o empalme V [8]

La Ilustración 1(b) nos deja ver un tipo de empalme muy utilizado con ayuda de adhesivo, donde solamente se puede ver la hembra y el macho. El empalme de este estilo permite la resistencia a la tracción con ayuda de un agente adhesivo, donde aumentar el área efectiva aumenta la ayuda del adhesivo para la resistencia a la tracción principalmente.

De acuerdo con los requerimientos de ingeniería que se presentarán en la sección 4.2 se tendrá en cuenta lo que se acaba de mencionar y hará parte de la matriz de selección de los tipos de empalme en la sección 4.3.

4.2 Criterios de ingeniería para selección de empalmes

Los requerimientos de la impresión 3D han ido aumentando con los años. Sin embargo, los prototipos de menor escala se han ido quedando atrás, generando la necesidad de fabricar piezas de mayor tamaño que exceden las dimensiones del área de impresión de las impresoras actuales. Algunas de las impresiones funcionan en aplicaciones de ingeniería. I Morosavljevic et al. mencionan como es una necesidad crear empalmes “uniones” de piezas mayores a la cama de las impresoras 3D. Donde se encuentra una oportunidad de diseño la cual se basa en implementar los principios de ingeniería sobre los empalmes japoneses [5]. De acuerdo con las necesidades encontradas se plantearon los siguientes requerimientos de ingeniería específicos que se buscan resolver:

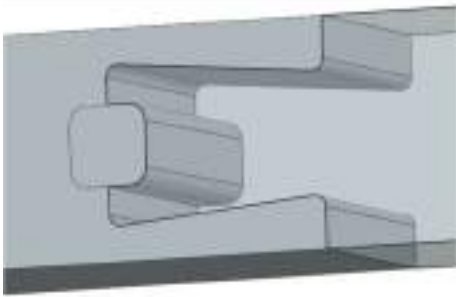
1. Capacidad de impresión en 3D por medio de FDM sin generación de soportes. (O mínima generación de soportes): las discontinuidades creadas por la soportería y el postprocesamiento pueden llegar a actuar como concentradores de tensiones, que podrían ser el inicio de fallas en las piezas, se evita generar defectos inducidos [9].
2. El modelo debe tener la capacidad de soportar cargas de flexión: es nuestro objeto de estudio, la selección de los tipos de empalmes debe tener este criterio, la razón principal del criterio se basa en que no todos los empalmes están diseñados para la carga específica mencionada.
3. Las características geométricas no sean inferiores a 3 milímetros debido a la resolución de la impresora 3D, por debajo de este parámetro las dimensiones quedan distorsionadas al momento de imprimir pudiendo generar defectos inducidos en la impresión [9].
4. Debe contener el mínimo número de concentradores de esfuerzos (aristas vivas) o reducción por medio de radios: Al minimizar las discontinuidades geométricas, como esquinas, muescas y cambios abruptos de sección transversal se evita que la pieza falle por concentradores de esfuerzos [10].
5. Debe tener la mayor área de contacto posible: Aumentar el área de contacto entre componentes ayuda a distribuir las cargas de manera más uniforme, reduciendo la intensidad del esfuerzo y minimizando el riesgo de fallas en el empalme ($\text{Fuerza}/\text{Área}=\text{Esfuerzo}$)[10].
6. Tener una autoalineación de todas sus caras, cuando las geometrías se ensamblen: La autoalineación garantiza una distribución homogénea de las cargas en los empalmes, evitando concentraciones que podrían comprometer la integridad estructural.
7. No se debe usar empalmes que requieran material adhesivo para su unión, de llegar a usar adhesivo se introduciría una variable adicional dependiente de la composición química de cada adhesivo, lo cual no corresponde al objetivo de este trabajo.

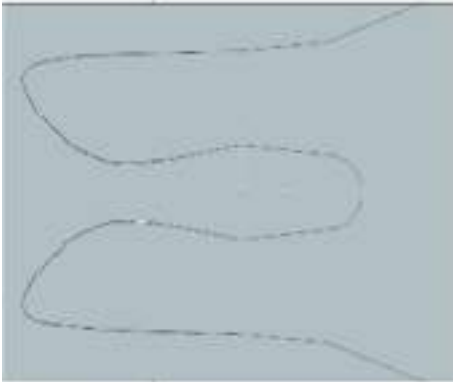
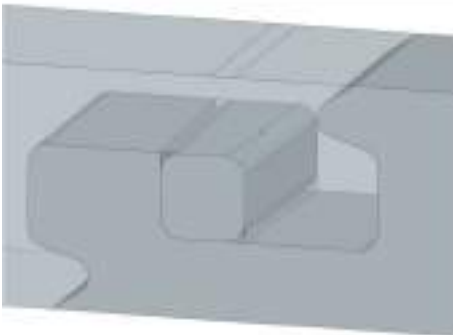
4.3 Selección de tres tipos de empalmes japoneses

Para seleccionar los empalmes japoneses adecuados, es esencial considerar los conceptos presentados en la sección 4.1. Esto permite explicar detalladamente los diversos tipos de empalme que se mostrarán. Además, es crucial cumplir con los requisitos establecidos en la sección 4.2. Para que estos empalmes sean aplicables a la impresión 3D por FDM, se diseñaron prototipos preliminares.

Los diseños preliminares creados se agrupan en dos tipos: de dos y tres cuerpos. Los empalmes de tres cuerpos corresponden al concepto de la Ilustración 1(a), donde se puede ver (el macho, la hembra y el pin). Los empalmes de dos cuerpos corresponden al concepto de la Ilustración 1(b) donde se puede ver (el macho y la hembra). Ver Tabla 1 para los diseños preliminares.

Tabla 1. Diseños preliminares de empalmes en impresión 3D

Tipos de empalme	Imagen
<i>Dovetail:</i> La cola de milano es una de las uniones típicas a evaluar por su relevancia en la carpintería japonesa, es bastante usada y puede darnos una idea preliminar de cómo funcionan los esfuerzos en los empalmes.	 A 3D CAD model of a dovetail joint. It shows a rectangular block with a dovetail-shaped hole on its top surface. A separate rectangular piece, the 'pin', is shown fitting into this hole. The model is rendered in a light blue-grey color with soft shadows.
<i>Arrow:</i> Es una propuesta de diseño en forma de flecha que busca maximizar el área de contacto, con una debilidad en cuanto a concentradores de esfuerzo.	 A 3D CAD model of an arrow joint. It shows a rectangular block with a complex, arrow-shaped hole on its top surface. The hole has a wide base and tapers towards the center. The model is rendered in a light blue-grey color with soft shadows.

Tipos de empalme	Imagen
<i>Fingers:</i> La forma de dedos es una propuesta que busca maximizar el área de contacto entre las piezas, pero con la fortaleza de buscar disipar los esfuerzos y que no se concentren en puntos específicos.	
<i>Notched:</i> Al igual que las demás propuestas esta geometría busca disipar muy bien los esfuerzos con una ventaja y es que puede soportar cargas de torsión.	
<i>Scarf:</i> Esta geometría tiene los mismos principios de los empalmes japoneses de 3 cuerpos, la variación principal en la ubicación de los pines y la cantidad, dando posibilidad a un análisis respecto a la orientación del pin en los planos y su cantidad.	

Los diseños fueron evaluados mediante una matriz de decisión para su selección y posterior simulación. A continuación, se muestra la matriz de decisión usada, ver Tabla 2:

Tabla 2. Matriz de decisión para los empalmes

Conceptos	Grado de relevancia	Tipos de empalmes				
		<i>Arrow</i>	<i>Dovetail</i>	<i>Fingers</i>	<i>Notched</i>	<i>Scarf</i>
Capacidad de esfuerzo a flexión	23	23	23	23	23	23
Capacidad de impresión por FDM y soportería	16	16	16	16	16	16
Mínimo número de concentradores de esfuerzos	21	18	18	15	21	21
Auto alineación de geometrías	19	17	17	17	19	19
Características geometrías superiores a 3mm	9	9	9	9	9	9
Mayor área de contacto	7	1	3	3	7	7
Funcionalidad sin adhesivo	5	-2	2	-2	2	2
TOTAL	100	82	88	81	97	97

A partir de la matriz de decisión presentada en la Tabla 2 se seleccionaron los empalmes Dovetail, Notched y Scarf que cumplieron con los criterios de selección planteados en la sección 4.2. Adicionalmente, se descartó usar las uniones con adhesivos por varias razones; el uso de recursos computacionales, y la cantidad de tipos de adhesivo para mejorar el funcionamiento. Puesto que no es el objetivo de este proyecto analizar la fuerza de los adhesivos en empalmes japoneses impresos en 3D por FDM.

4.4 Modelo 3D de los empalmes seleccionados

Los empalmes seleccionados en la sección 4.3, son los tres empalmes que tuvieron el mayor puntaje, todos ellos se modelaron detalladamente en software CAD. Teniendo en cuenta los criterios de ingeniería y el área de impresión 3D por FDM, ningún modelamiento en este trabajo se hizo de forma sólida, generalmente se realizan las impresiones con un espesor de pared solido que, para este proyecto específico, fue de 3mm; con un porcentaje de relleno del 15% (Ver Ilustración 2); a continuación, se caracterizan las geometrías de los empalmes seleccionados.

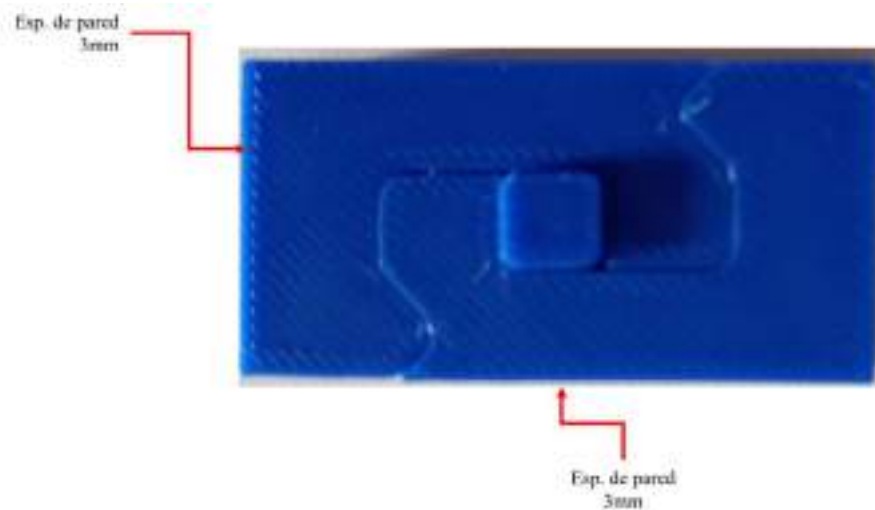


Ilustración 2. Empalme Notched impreso en 3D.

4.4.1 Características geometrías empalme Dovetail

La Ilustración 3 muestra los detalles geométricos de la unión tipo Dovetail. Consta de tres cuerpos, que ensamblados tienen una longitud de 180mm. La cuña tiene en una cara de sección cuadrada de 7x7mm y la otra cara termina con una sección rectangular de 7x8,40mm dando un ángulo de inclinación de 2°, que tiene el objetivo de presionar los otros dos componentes entre sí. El área de contacto entre las superficies es de aproximadamente de 1359,32 mm². (Ver anexo A para mayor detalle de las planimetrías).

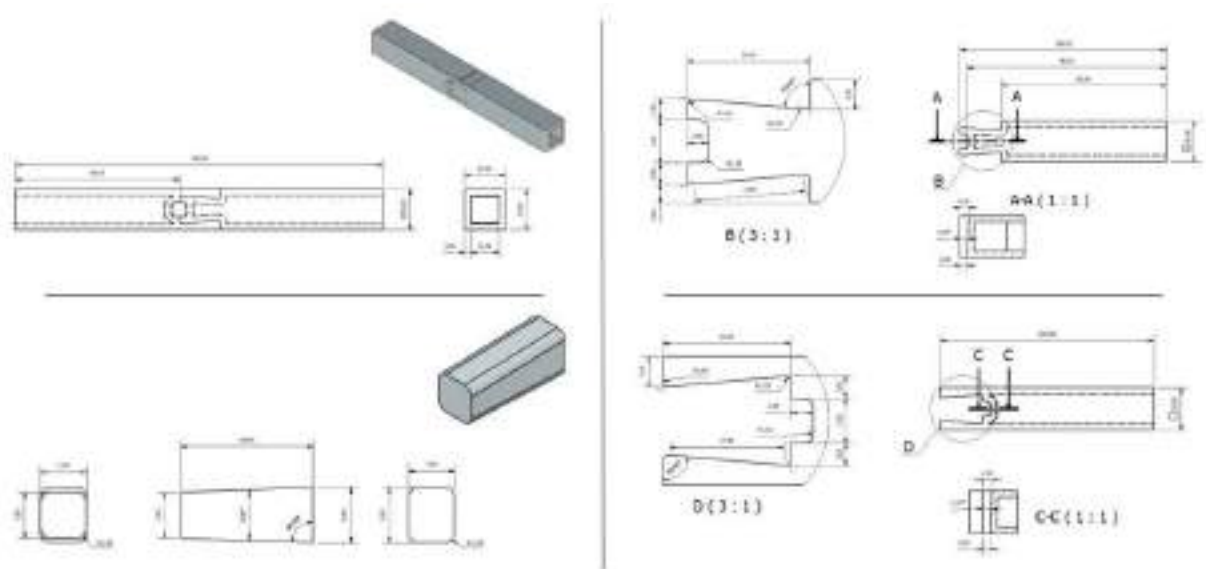


Ilustración 3. Planimetría de empalme Dovetail

4.4.2 Características geometrías empalme Notched

La Ilustración 4 muestra los detalles geométricos de la unión tipo Notched. Consta de tres cuerpos, que ensamblados tienen una longitud de 180mm. Comparte la geometría de la cuña de sección cuadrada de 7x7mm y la otra cara termina con una sección rectangular de 7x8,40mm dando un ángulo de inclinación de 2°, que tiene el objetivo de presionar los otros dos componentes entre sí. El área de contacto entre las superficies es de aproximadamente de 1408.99mm². (Ver anexo A para mayor detalle de las planimetrías).

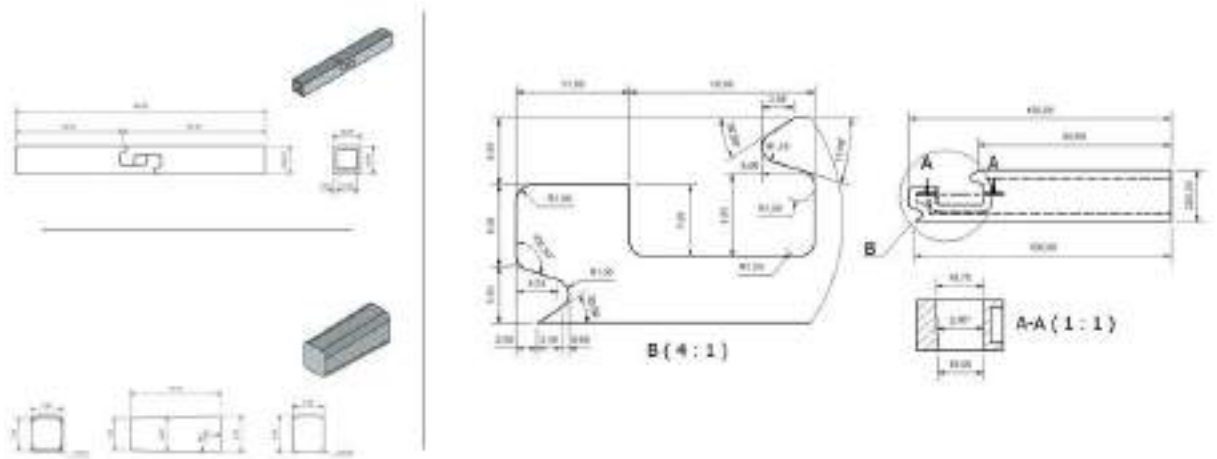


Ilustración 4. Planimetría de empalme Notched

4.4.3 Características geometrías empalme Scarf

La Ilustración 5 muestra los detalles geométricos de la unión tipo Scarf. Consta de 4 cuerpos, que ensamblados tienen una longitud de 180mm. No comparte la geometría de la cuña de los empalmes anteriores (Dovetail y Notched), en este caso las dos cuñas comparten geometría entre ambas, las cuales tienen una cara de sección rectangular de 3x4mm y la otra cara terminan con una sección rectangular de 3x5,40mm dando un ángulo de inclinación de 2°, que tiene el objetivo de presionar los otros dos componentes entre sí. El área de contacto entre las superficies es de aproximadamente de 1160,259mm². (Ver anexo A para mayor detalle de las planimetrías).

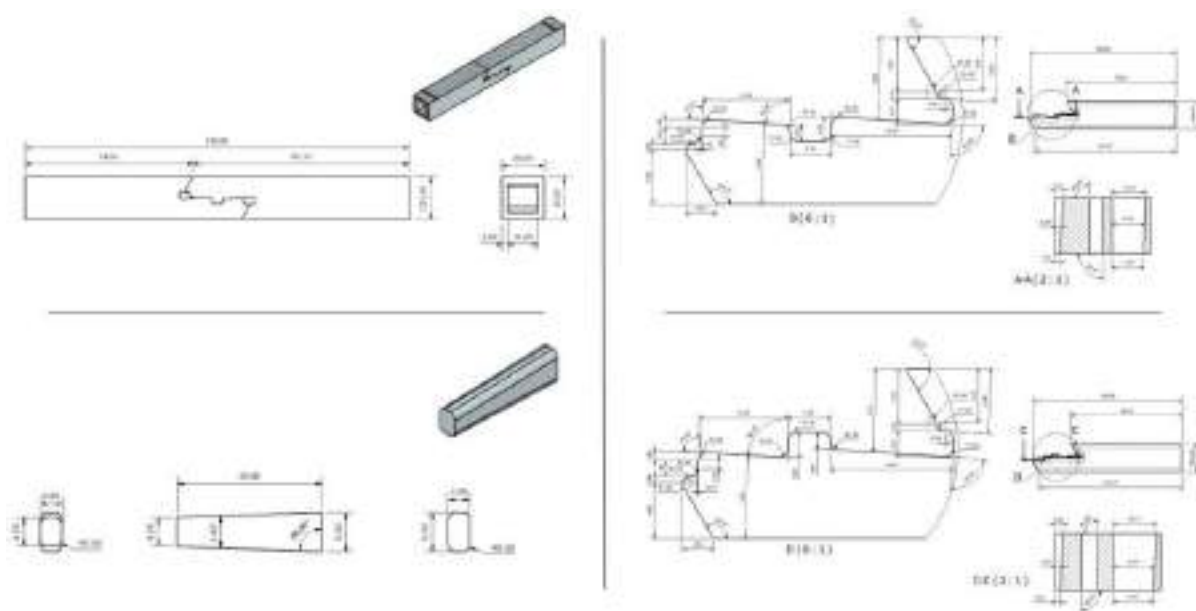


Ilustración 5. Planimetría de empalme Scarf

5 SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS EMPALMES SELECCIONADOS

5.1 Norma técnica ISO-178 para ensayos de flexión

En este proyecto se busca evaluar el comportamiento únicamente para el caso específico de la flexión, por lo tanto, para poder realizar pruebas con características científicas se buscaron normativas que se relacionaran con este tipo de carga. De las normativas vistas se seleccionó la ISO-178 [11] debido a su enfoque para determinar las propiedades de la flexión en materiales plásticos. La ISO-178 define la geometría de cómo deben ser las pruebas (Ver Ilustración 6), además, de factores de medición que se van a observar. Se decidió utilizar el software ANSYS para evaluar el comportamiento mecánico de los empalmes debido a que resulta más económico y eficiente que la fabricación de prototipos impresos. Además, este enfoque permite optimizar el tiempo al no requerir presencia física para realizar pruebas experimentales y facilita la creación de variaciones geométricas en los modelos 3D, dando mayor versatilidad al trabajo que se realizó.

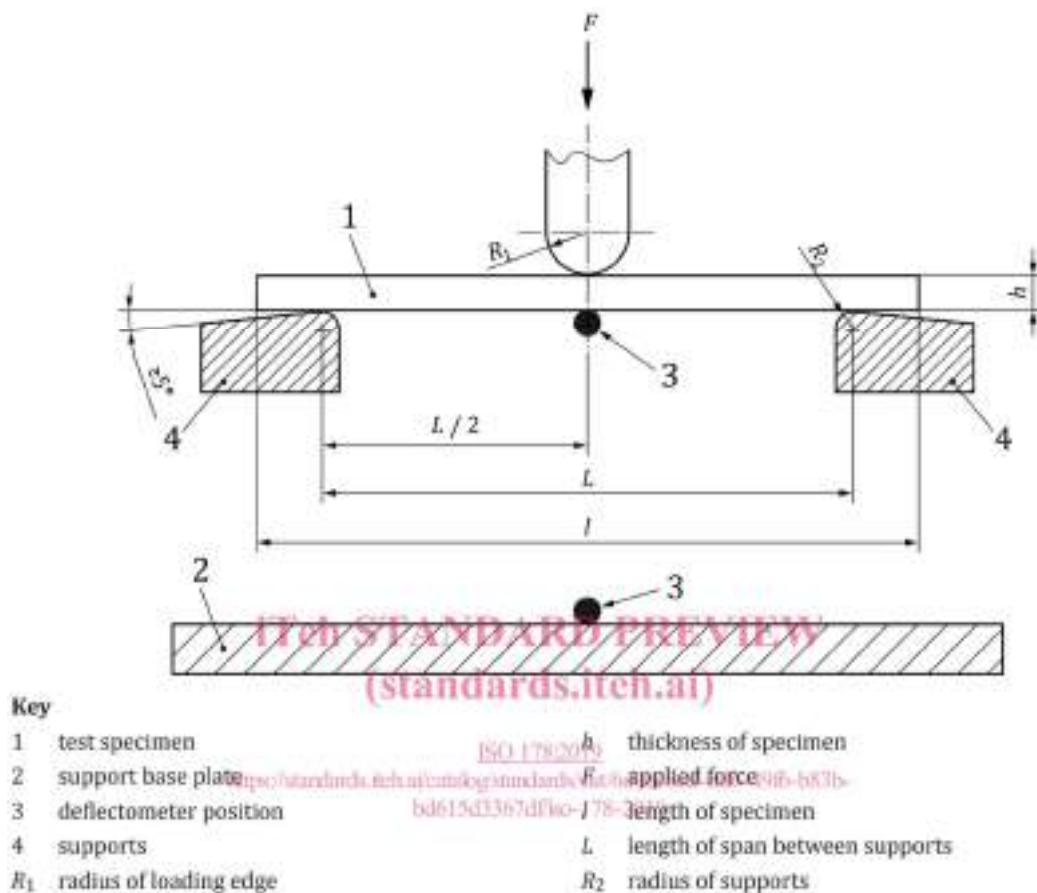
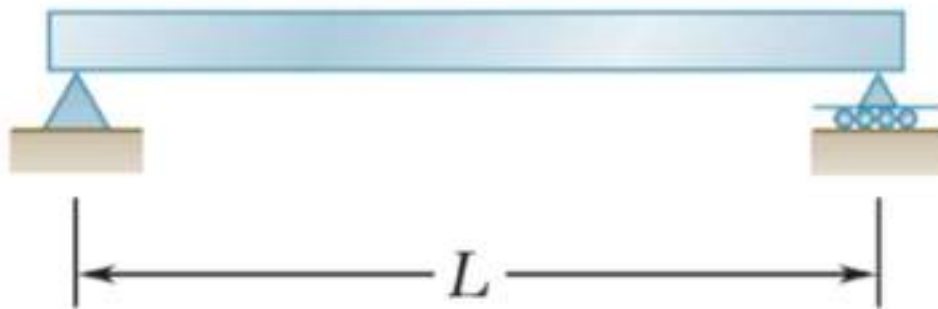


Figure 2 — Position of test specimen and deflectometer at start of test

Ilustración 6. Posición de la muestra de prueba [11]

Para realizar las simulaciones en ANSYS con un enfoque hacia los puntos centrales del empalme y no en sus extremos (puntos de apoyo), se simplificó el modelo, de tal forma que no se usaron geometrías adicionales para la simulación. Las pruebas se realizaron bajo el principio de una viga simplemente apoyada [12], como se muestra en la Ilustración 7.



a) Viga simplemente apoyada

Ilustración 7. Viga simplemente apoyada [12]

5.2 Modelo base-viga continua de referencia

Con el fin de poder tener una referencia de comparación, para las demás simulaciones, se simuló una viga con un espesor de pared de 3 mm y con las dimensiones de 20X20X180 mm. Esta viga permitió entender cómo funciona la pieza completa y cuál sería su resistencia sin ser fraccionada o dividida debido a la limitante de espacio de las impresoras, por lo tanto, los valores generados por la simulación son la referencia para las demás simulaciones.

La Ilustración 8 muestra la viga de referencia con sus respectivos puntos de apoyo y la distancia entre ellos de forma esquemática, esta distribución es estándar para todos los empalmes que se mostrarán.

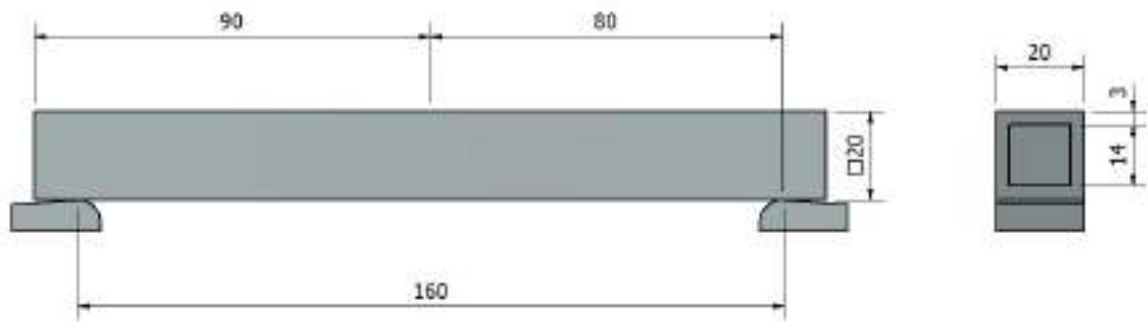


Ilustración 8. Esquema viga de referencia y distancia entre apoyos

5.2.1 Configuración de condiciones de frontera para la simulación

En esta sección se presenta el paso a paso de las condiciones de frontera en la simulación de referencia. Antes de abordar la convergencia del modelo, las iteraciones y los resultados obtenidos, es importante explicar la metodología utilizada.

Se describen las características del software ANSYS (Ver Ilustración 9) para configurar las condiciones de frontera, comenzando por la importación de la geometría y su caracterización. A continuación, se detallan los materiales utilizados, las conexiones establecidas, la malla generada y las condiciones estructurales aplicadas.

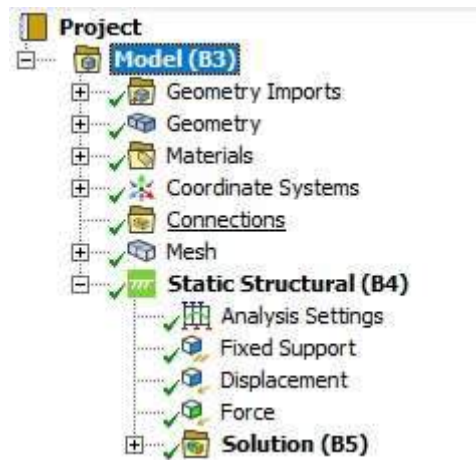


Ilustración 9. Menú de las condiciones de frontera en ANSYS

Con el objetivo de analizar detalladamente el comportamiento de los empalmes bajo flexión, se simplificó el modelo geométrico dividiéndolo en tres volúmenes. En cada volumen se definió un área rectangular de $2 \times 20 \text{ mm}$ (40 mm^2) para aplicar las condiciones de carga. Una fuerza de 50 N se aplicó en el área del volumen central, simulando así la carga nominal. Los apoyos se ubicaron en las áreas de los volúmenes externos. Al concentrar el análisis en el volumen central, donde se encuentran los empalmes, se puede simular de manera más realista su comportamiento bajo la carga de flexión, según lo descrito en la normativa ISO-178 (Ver apartado 5.1). La Ilustración 10, destacada en rojo, muestra claramente el área de interés.

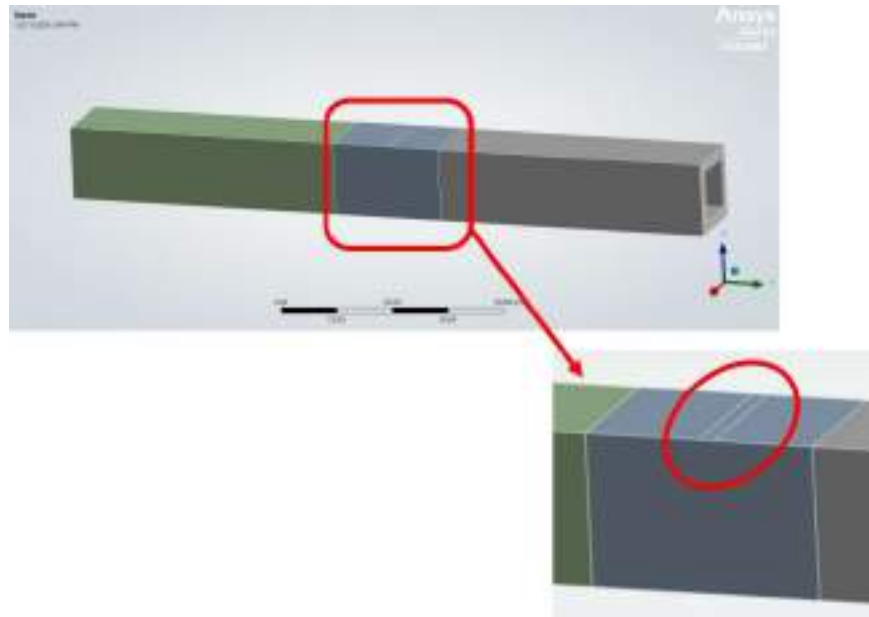


Ilustración 10. División en volúmenes de interés y detalle de punto de presión de la fuerza

Las piezas impresas en 3D presentan una estructura interna compleja y no completamente continua debido al proceso de fabricación aditiva. Sin embargo, es posible simplificar su análisis mecánico utilizando un modelo isotrópico lineal enfocándose en la región elástica del material PLA. Esta simplificación se justifica cuando el interés principal radica en el comportamiento estructural global de la pieza y no en los detalles de su microestructura interna.

Como se observa en Ilustración 11(a) y (b) el comportamiento del PLA en la región elástica presenta una relación lineal entre el esfuerzo y deformación, destacada por la línea roja en ambas graficas. En este proyecto, se definió la zona de interés dentro de este rango, evitando superar los 30 MPa, correspondiente al esfuerzo de fluencia reportado para el PLA comercial de diferentes proveedores. El enfoque asegura que los experimentos y simulaciones se mantenga dentro del comportamiento elástico del material, garantizando resultados representativos de las condiciones de diseño.

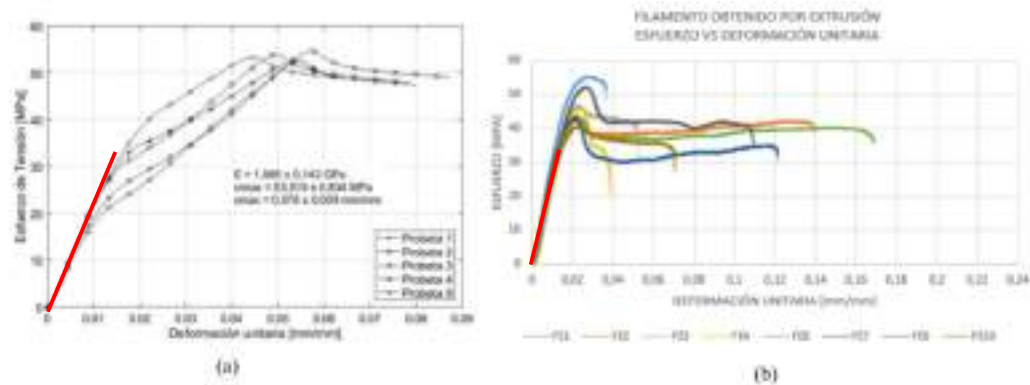


Ilustración 11. Curvas esfuerzo-deformación de PLA impreso en 3D por FDM (a)[13] y (b)[14]

Esta aproximación permite reducir significativamente el tiempo de cálculo sin comprometer la precisión de los resultados en términos de desplazamientos y tensiones principales. Aunque la estructura interna de una pieza impresa en 3D puede influir en el comportamiento local del material, la elección de un modelo de cáscara se basa en la premisa de que el efecto promedio de esta estructura interna puede ser capturado de manera adecuada por las propiedades efectivas del material asignadas a la cáscara. Además, al considerar la pieza como una superficie delgada, se evita modelar la complejidad de la estructura interna (lattice geometry¹), lo que simplifica significativamente el análisis.

Las propiedades del material PLA [18], para las simulaciones en ANSYS se puede ver en la Ilustración 12.



PLA	
Density	1.24e-06 kg/mm ³
Structural	
Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	1280 MPa
Poisson's Ratio	0.33
Bulk Modulus	1254.9 MPa
Shear Modulus	481.2 MPa
Tensile Ultimate Strength	70 MPa
Tensile Yield Strength	60 MPa

Ilustración 12. Material PLA en el software ANSYS

La malla del modelo se ajustó únicamente en tamaño. En el caso particular de la viga de referencia, los elementos utilizados fueron hexaédricos (hexa20). La malla resultante fue homogénea, con un detalle especial en la geometría en la parte central (Ver Ilustración 13)

¹ El reticulado interno (lattice geometry) se refiere a la estructura interna porosa formada por una red tridimensional de elementos interconectados, utilizada en la impresión 3D por FDM para optimizar el uso del material y mejorar las propiedades mecánicas de las piezas [15], [16], [17]

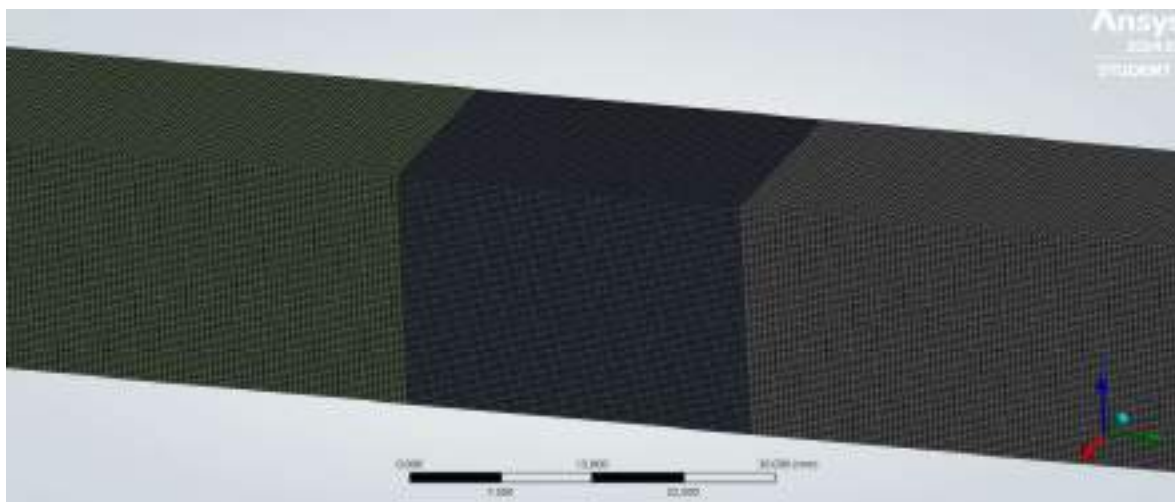


Ilustración 13. Mallada simulación de referencia

La configuración de los pasos² de la simulación está basada en un pseudo tiempo, que utiliza el software para ilustrar el movimiento de la aplicación de la carga y sus reacciones y poder extraer información (Ver Ilustración 14). Esto nos permite observar cómo se desarrolla la simulación en tiempo real, así como los valores transitorios de los esfuerzos y las deformaciones que se van registrando.

Details of "Analysis Settings"	
Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	On
Define By	Time
Initial Time Step	0.1 s
Minimum Time Step	0.1 s
Maximum Time Step	0.2 s

Ilustración 14. Controles de tiempo ANSYS

² Los pasos (step) en una simulación representan el tiempo o etapas que se dividen una simulación para aplicar cargas y condiciones de fronteras [19], [20]

La carga utilizada en el experimento se determinó a partir de la ecuación 1 [11], junto con el análisis de la relación fuerza-alargamiento del material PLA extruido [14], como se muestra en la Ilustración 15. La ecuación es la siguiente:

$$F = \frac{2\sigma b d^2}{3L} \quad 1$$

$\sigma \rightarrow$ Esfuerzo del material (Pa)

$b \rightarrow$ Ancho de la muestra (m)

$d \rightarrow$ Espesor de la muestra (m)

$L \rightarrow$ Distancia entre soportes (m)

Reemplazando con los valores la fuerza es:

$$F = \frac{((2(60 * 10^6 \text{ Pa}))(20 * 10^{-3} \text{ m})((3 * 10^{-3} \text{ m})^2))}{3(160 * 10^{-3} \text{ m})} = 45 \text{ N}$$

Sin embargo, se seleccionó una carga de 50 N considerando la ecuación 1 y la Ilustración 15 ya que este valor representa el límite inferior antes de alcanzar el esfuerzo de fluencia en la curva correspondiente al filamento con el peor desempeño en el análisis de la ilustración 15. Esta elección asegura que las pruebas se mantengan dentro del rango elástico del material, permitiendo evaluar su comportamiento estructural sin inducir deformaciones plásticas o fallas prematuras independiente de los diferentes tipos de filamento que se lleguen a usar en la posterior prueba física que continuara este trabajo.



Ilustración 15. Fuerza vs alargamiento de filamento obtenido por extrusión [14]

Las condiciones de carga fueron: un soporte fijo en la parte A, un patín en la parte B (configurado como un desplazamiento libre en el eje Y en ANSYS) y la fuerza de 50 N de forma negativa en el eje Z, en la parte C de la viga (Ver Ilustración 16).

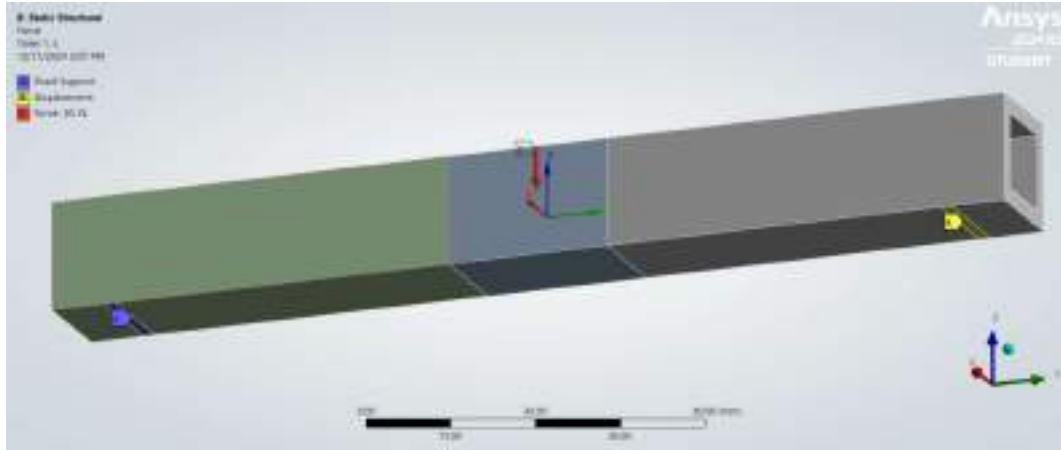


Ilustración 16. Condiciones de carga viga de referencia

Para poder simplificar el modelo se crearon áreas en puntos específicos de 2x20mm (zona A, B y C) para cargar el modelo de tal forma que existiera homogeneidad entre todos los modelos.

5.2.2 Convergencia del modelo base

La convergencia del mallado es el proceso mediante el cual se refina progresivamente la malla para garantizar que los resultados obtenidos sean independientes del tipo del tamaño y tipo de los elementos. El proceso consiste en reducir sistemáticamente el tamaño de elementos y comparar los resultados clave (tensiones, desplazamientos o temperaturas) de tal forma que las diferencias entre los resultados no sean significativas [21]. Es normal aceptar menos del 20% de error para esfuerzos y deformaciones máximas; entre el 5% y 10% de error para esfuerzos promedio, deformaciones elásticas y flujos de calor promedio; entre el 1% y 5% de error para desplazamientos relacionados con esfuerzos promedio y temperaturas promedio calculadas [22]. Al querer obtener resultados precisos y con una alta convergencia se requerirá mayor tiempo y recursos computacionales.

La convergencia del modelo de referencia presentado en la Ilustración 17 permite ver la estabilización del modelo de forma casi lineal, donde a pesar de que se aumente el número de elementos el resultado continuara siendo el mismo.

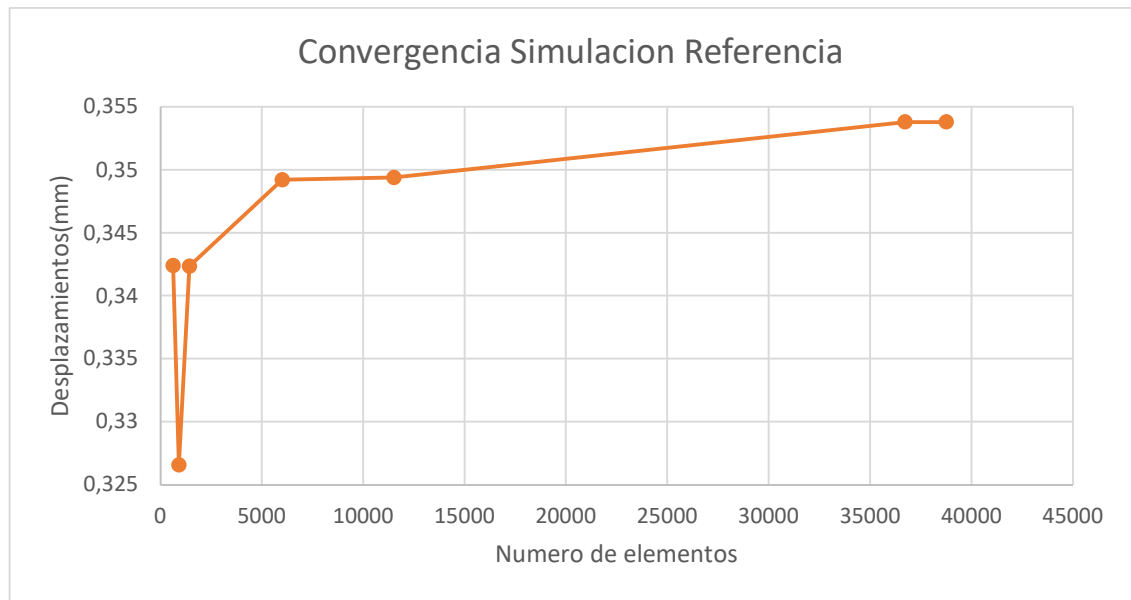


Ilustración 17. Convergencia Simulación de referencia

En la Tabla 3 se resume cuantitativamente el proceso de convergencia del modelo. A medida que se aumenta los elementos y nodos, también mejora la precisión, alcanzando un margen de error del 0%. Esto demuestra que el tamaño óptimo de los elementos para la simulación de referencia se encontró después de reducir el tamaño de los elementos a 1,5mm, por lo que finalmente se seleccionó un tamaño de elemento de 1mm y tipo de elemento hex20.

Tabla 3. Resultados convergencia simulación de referencia

Tamaño Elemento	Nodos	Elementos	Deformaciones totales	Error Relativo
mm	#	#	mm	%
5	3972	624	0,3424	-
4	10200	912	0,32658	5%
3	10200	1440	0,34236	5%
2	33572	6006	0,34921	2%
1,5	63744	11520	0,34938	0%
1	184348	36720	0,35379	1%
0,75	194548	38760	0,35379	0%

Si bien el tamaño de los elementos aumenta la precisión de los resultados, también incrementa significativamente el tiempo de cálculo y el requerimiento de recursos computacionales. No obstante, para el modelo de referencia (Ver Tabla 3), se observó que al disminuir el tamaño del elemento a 0,75mm no se produjeron cambios en la deformación respecto a un tamaño de 1mm. Por esta razón, en los demás empalmes se detuvo el refinamiento de la malla cuando se alcanzó la convergencia, optimizando así el proceso de simulación.

5.2.3 Análisis de resultados de la viga de referencia

La Ilustración 18 permite visualizar que con 50N el esfuerzo de Von Mises máximo está en el punto de aplicación de la fuerza, algo completamente normal y además de observar como el punto central de la viga tiene una distribución nula. A pesar de que este valor podría conocerse teóricamente como se mencionó anteriormente, esta simulación será la base de comparación para el resto del trabajo. Si el esfuerzo máximo de Von Mises equivaliera al punto de fluencia del material PLA este valor sería homologo al punto de fluencia del material, dejando ver el punto de inicio de plasticidad de manera directa.

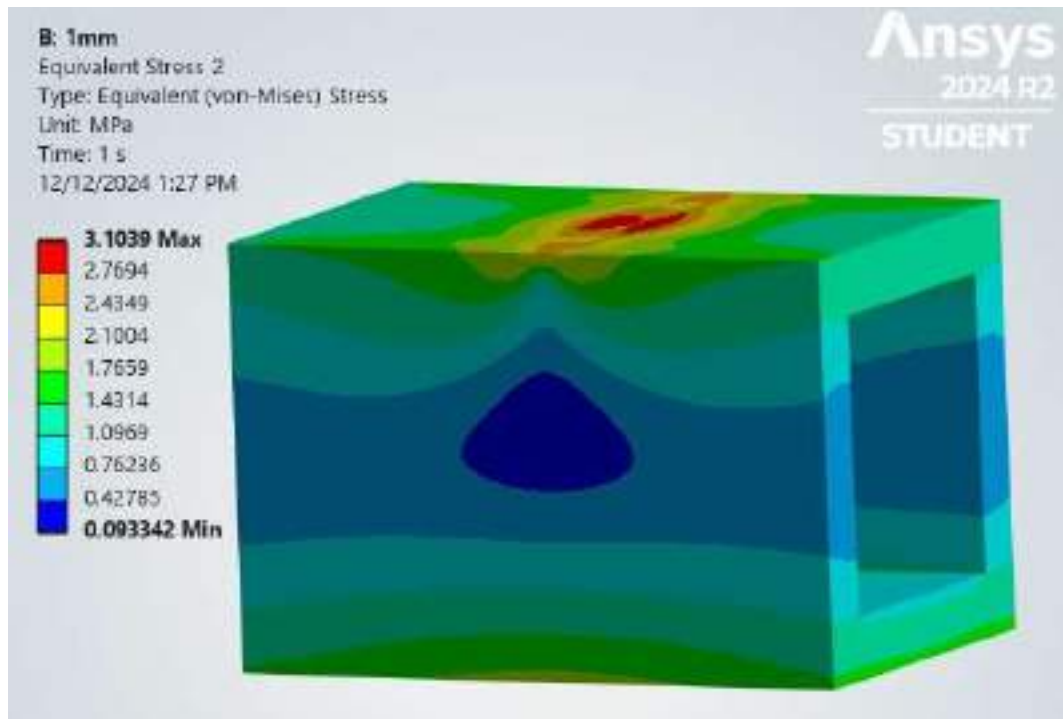


Ilustración 18. Estado de esfuerzo de Von Mises para la sección central de la viga de referencia

La Tabla 4 deja en evidencia los datos de la simulación, la deformación obtenida por cada 50 N de carga, la viga se deformará 0,35mm, siempre y cuando se encuentre en la zona elástica. Para el objetivo de este proyecto, como se mencionó anteriormente, el punto limite fue la fluencia (60 MPa), y no se evaluó la plasticidad.

Tabla 4. Resultados de simulación de viga de referencia

Tiempo	Deformación	Von Mises	Max. Cortante
s	mm	MPa	MPa
0.1	3,54E-02	0,31039	0,17855
0.2	7,08E-02	0,62078	0,3571
0.4	0,14152	1,2416	0,7142
0.6	0,21228	1,8623	1,0713

Tiempo	Deformación	Von Mises	Max. Cortante
0.8	0,28303	2,4831	1,4284
1	0,35379	3,1039	1,7855

5.3 Análisis de resultados de viga Dovetail

5.3.1 Condiciones de contacto

La unión Dovetail tiene una diferenciación en la configuración de las condiciones de frontera respecto al modelo de referencia, ya que no es un solo cuerpo sino tres. El cambio esta exactamente en las regiones de contacto (inexistentes en el modelo de referencia, puesto que solamente era un cuerpo), las regiones de contacto son cruciales para poder definir como interactúan las piezas del modelo bajo las condiciones de carga que tienen. Las configuraciones de contacto en ANSYS definen como interactúan dos o más superficies en un modelo. Permiten simular el comportamiento físico entre las piezas que están en contacto y se caracterizan porque pueden entrar o salir del contacto durante la simulación.

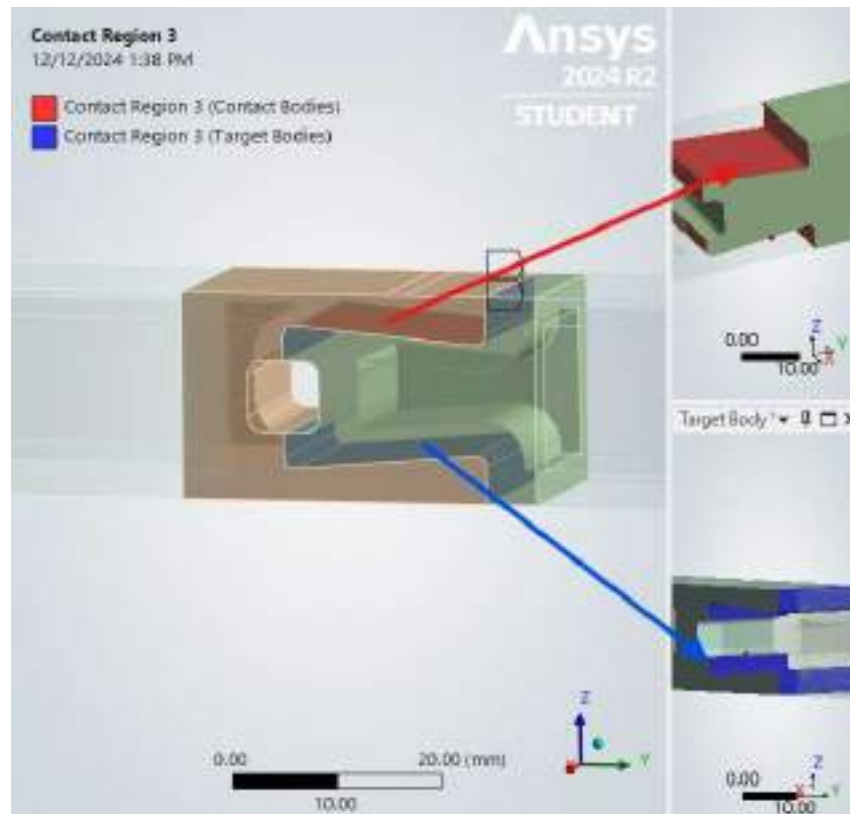


Ilustración 19. Configuración de contactos ANSYS

La Ilustración 19, muestra cómo se realizó la configuración de contacto entre superficies para la simulación Dovetail (color azul hembra y color rojo macho). Para el caso de la simulación Dovetail se usó un contacto friccional; este tipo de contacto es una interacción entre

superficies que presenta resistencia al deslizamiento relativa entre las partes debido a la fricción. Es usado normalmente para modelar interacciones físicas más realistas donde la fricción puede jugar un papel importante en la transferencia de cargas y estabilidad del modelo. Para usar este contacto es necesario tener el valor del coeficiente de fricción estático (μ) del material. La Ilustración 20 permite ver que el valor del coeficiente esta entre 0.2-0.3 con el valor de 50N de carga sin lubricante, con fines de que la fricción no sea una variable que pueda cambiar los resultados significativamente, se tomó el valor de $\mu=0.2$ para la configuración en ANSYS [23].

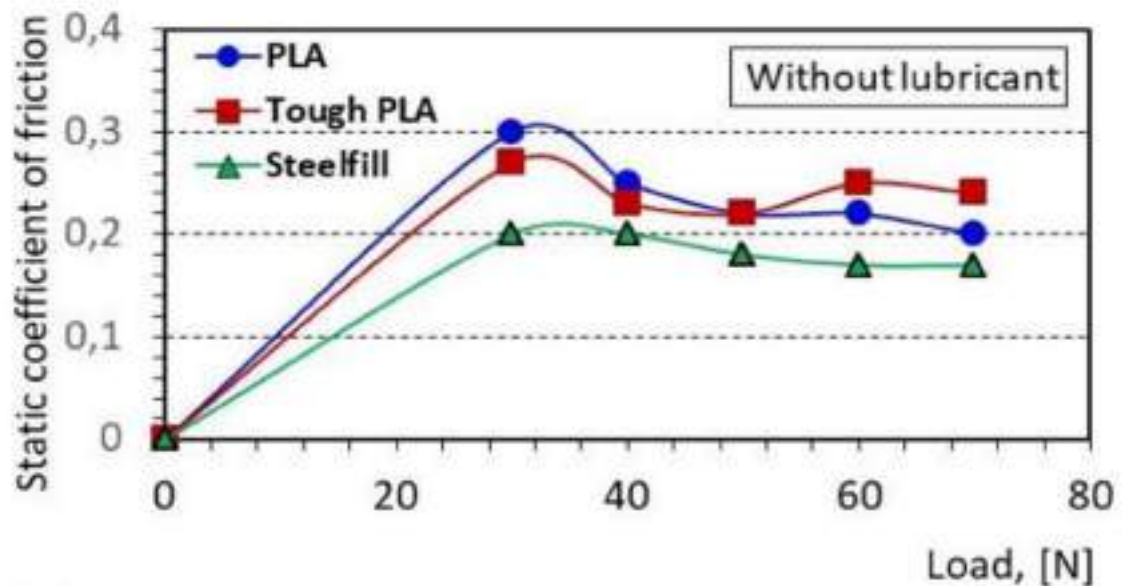


Ilustración 20. Coeficiente de fricción estático sin lubricante de tipos de PLA-PLA [23]

5.3.2 Convergencia de malla

Los modelos CAD del empalme Dovetail (hembra (a), pin (b) y macho (c)) exhiben un comportamiento de convergencia similar como se muestra en la Ilustración 21. Al refinar la malla aumentando el número de elementos, el desplazamiento calculado se estabiliza, alcanzando un valor prácticamente constante para un tamaño de elemento específico en los tres casos. El error relativo presentado por los 3 modelos fue del 2%.

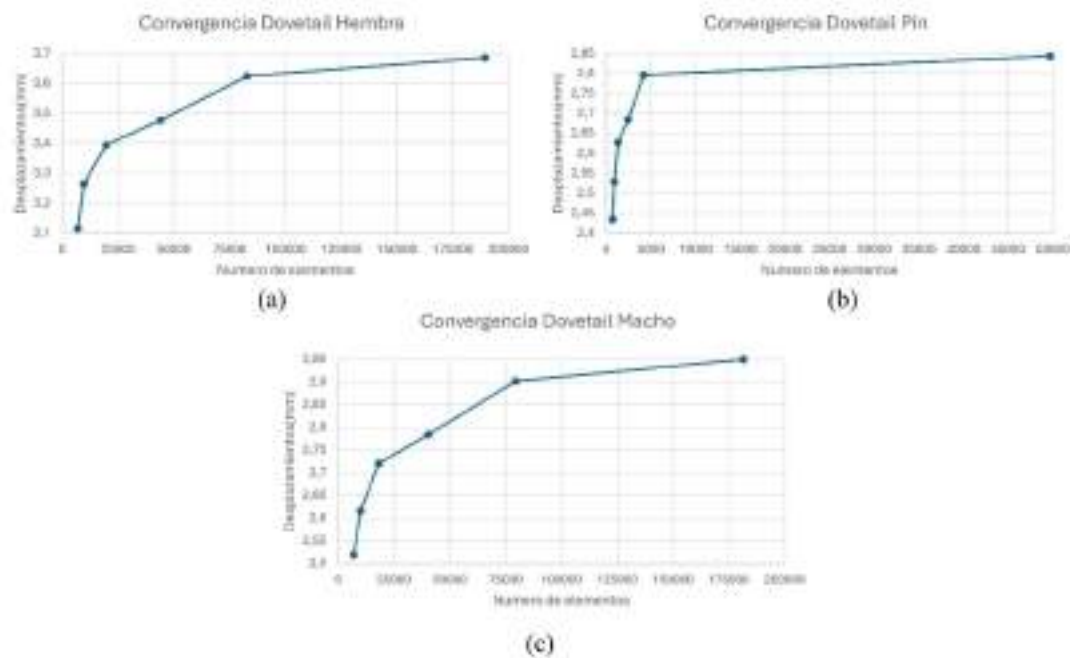


Ilustración 21. Convergencia de malla Dovetail (a) hembra, (b) pin y (c) macho

La Tabla 5, muestra el tamaño de la malla por cada modelo del empalme Dovetail (hembra (a), pin (b) y macho (c)), además, de la cantidad de nodos, elementos, desplazamiento relativo y error porcentual que tuvo cada modelo. Además, para todos los modelos del empalme Dovetail se usó un tipo de elemento tetraédrico (Tet10)

Tabla 5. Resultados y selección de tamaño de malla para los modelos de empalme Dovetail

Modelo	Tamaño Elemento	Nodos	Elementos	Desplazamiento	Error Relativo
Nombre de pieza	mm	#	#	mm	%
Dovetail hembra	1	279794	189436	3,6853	2%
Dovetail pin de ajuste	1	72470	49722	2,843	2%
Dovetail macho	1	268612	181526	2,9494	2%

5.3.3 Estado de esfuerzos y desplazamientos viga Dovetail

Se puede ver un esfuerzo máximo de Von Mises de alrededor de 26,86 MPa en la Ilustración 22, además, los esfuerzos están concentrados en una sola sección con un desplazamiento máximo de 3,66mm (Ver Tabla 6). Los esfuerzos concentrados en un solo punto podrían generar fallo estructural en el empalme Dovetail en el tiempo.

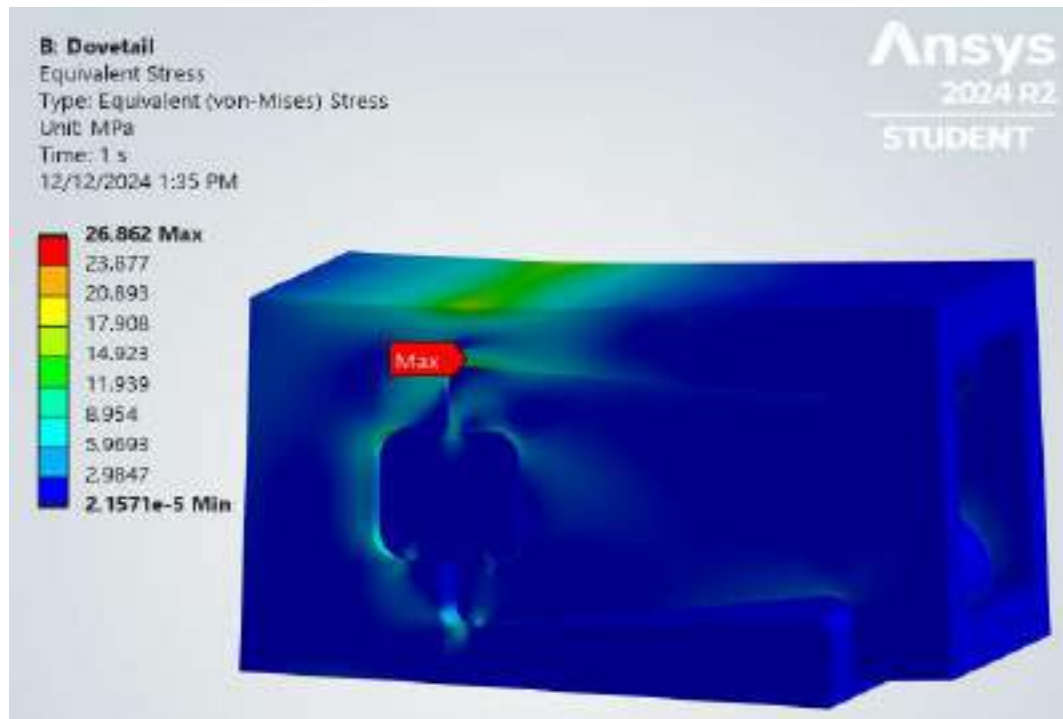


Ilustración 22. Resultados Von Mises simulación Dovetail

El sistema de simulación utilizado está compuesto por múltiples cuerpos, lo que lo clasifica como un sistema multicuerpo. Este tipo de configuración se caracteriza porque los desplazamientos observados no son exclusivamente propios del material, sino que también están influenciados por la separación existente entre los cuerpos en la simulación. En la Ilustración 23, se muestran los resultados de desplazamiento lo que resalta la importancia de evaluar tanto las propiedades del material como la interacción entre los componentes del sistema.



Ilustración 23. Resultados desplazamiento simulación Dovetail

Tabla 6. Resultados simulación Dovetail

Tiempo	Desplazamiento	Von Mises	Max. Cortante
s	mm	MPa	MPa
0.1	0,36621	2,6804	1,473
0.2	0,73283	5,3711	2,9517
0.35	1,283	9,4042	5,1681
0.55	2,0157	14,775	8,1196
0.75	2,7488	20,147	11,072
0.88	3,2068	23,504	12,917
1	3,6649	26,862	14,762

5.4 Análisis de resultados viga Notched

5.4.1 Condiciones de carga

Las condiciones y ubicaciones de carga del modelo Notched son exactamente las mismas mencionadas en la sección 5.2.1 y en la sección 5.3.1, donde la fuerza fue de 50N y el coeficiente de fricción estático $\mu=0.2$.

5.4.2 Convergencia del modelo Notched

Los modelos CAD del empalme Notched (hembra (a), pin (b) y macho (c)) exhiben un comportamiento de convergencia similar como se muestra en la Ilustración 24. Al refinar la malla aumentando el número de elementos, el desplazamiento calculado se estabiliza, alcanzando un valor prácticamente constante para un tamaño de elemento específico en los tres casos. El error relativo presentado por los 3 modelos fue del 1%.

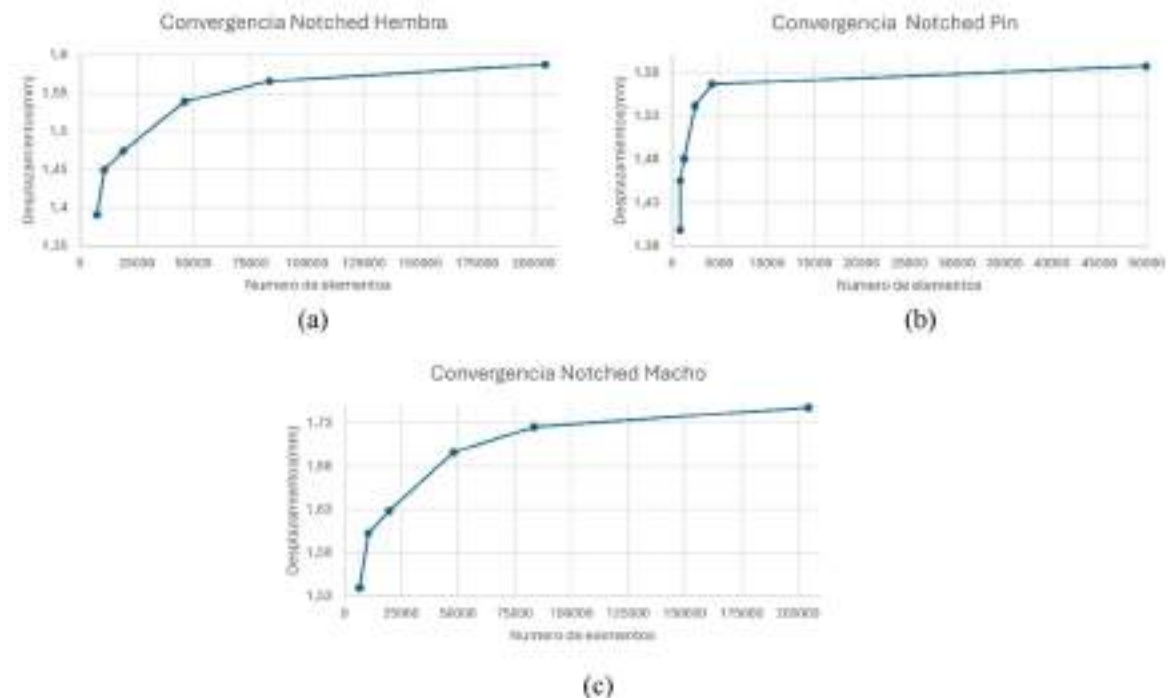


Ilustración 24. Convergencia de malla Notched (a) hembra, (b) pin y (c) macho

La Tabla 7, muestra el tamaño de la malla por cada modelo del empalme Notched (hembra (a), pin (b) y macho (c)), además, de la cantidad de nodos, elementos, desplazamiento relativo y error porcentual que tuvo cada modelo. Además, para todos los modelos del empalme Notched se usó un tipo de elemento tetraédrico (Tet10)

Tabla 7. Resultados y selección de tamaño de malla para los modelos de empalme Notched

Modelo	Tamaño Elemento	Nodos	Elementos	Desplazamiento	Error Relativo
Nombre de pieza	mm	#	#	mm	%

Modelo	Tamaño Elemento	Nodos	Elementos	Desplazamiento	Error Relativo
Notched hembra	1	300502	204986	1,587	1%
Notched pin de ajuste	1	72753	49927	1,5874	1%
Notched macho	1	300118	204537	1,7475	1%

5.4.3 Estado de esfuerzos y desplazamientos viga Notched

La Ilustración 25 muestra un esfuerzo máximo de 16,90 MPa, siendo menor que el empalme Dovetail, pero mayor que la simulación de la viga base. El diseño Notched presenta esfuerzos en el radio inferior izquierdo. Aunque los esfuerzos son bajos, es un signo positivo, ya que indica la existencia de carga en otros puntos distintos a los observados en el modelo Dovetail.

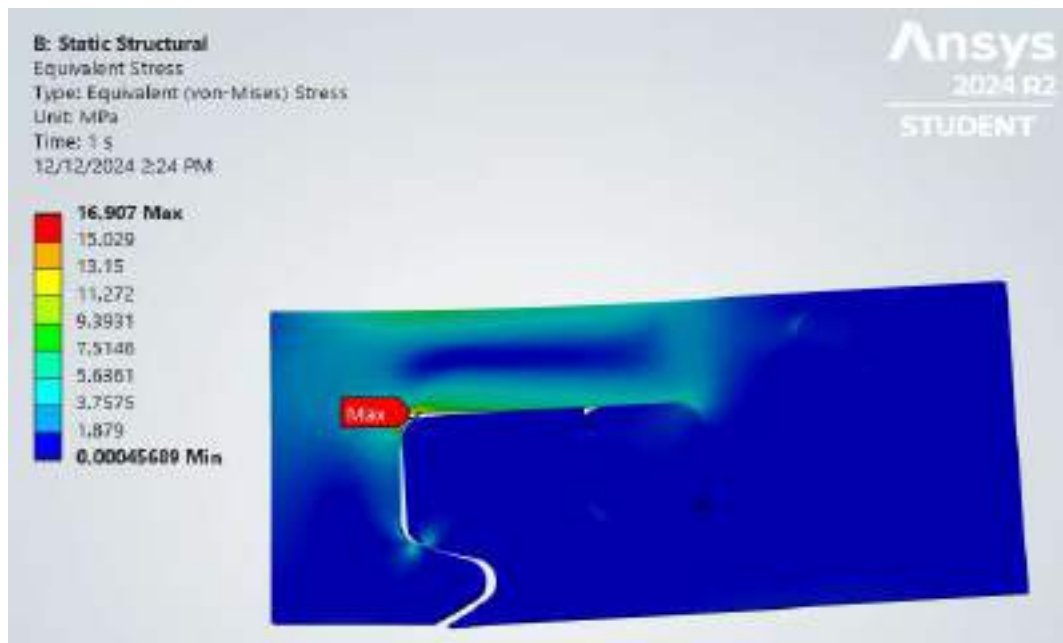


Ilustración 25. Resultados Von Mises simulación Notched

Existe un desplazamiento de 1.74 mm, como se puede ver en Tabla 8. A pesar de que los esfuerzos son menores, estos siguen concentrando en puntos específicos, lo que puede hacer que el diseño sea vulnerable por esta razón.

Tabla 8. Resultados simulación Notched

Tiempo	Desplazamiento	Von Mises	Max. Cortante
s	mm	MPa	MPa
0.1	0,17488	1,691	0,87978
0.2	0,34964	3,3812	1,7592

Tiempo	Desplazamiento	Von Mises	Max. Cortante
0.35	0,6118	5,9162	3,0781
0.55	0,96139	9,2979	4,8376
0.75	1,3108	12,68	6,5971
0.88	1,5291	14,793	7,6969
1	1,7475	16,907	8,7967

5.5 Análisis de resultados viga Scarf

5.5.1 Condiciones de carga

Las condiciones y ubicaciones de carga del modelo Scarf son exactamente las mismas mencionadas en la sección 5.2.1 y en la sección 5.3.1, donde la fuerza fue de 50N y el coeficiente de fricción estático $\mu=0.2$.

5.5.2 Convergencia de malla

Los modelos CAD hembra (a), pin 2 (c) y macho (d) del empalme Scarf exhiben un comportamiento de convergencia similar en la Ilustración 26. Sin embargo, el pin 1 (b) tiene un error relativo del 5%, dicho error se presenta debido al mal funcionamiento de este dentro del ensamble que se detallara en la siguiente sección. Al refinar la malla aumentando el número de elementos, el desplazamiento calculado se estabiliza en los modelos anteriormente mencionados, alcanzando un valor prácticamente constante para un tamaño de elemento específico en los tres casos. El error relativo presentado por los 4 modelos fue diferencial (Ver Tabla 9).

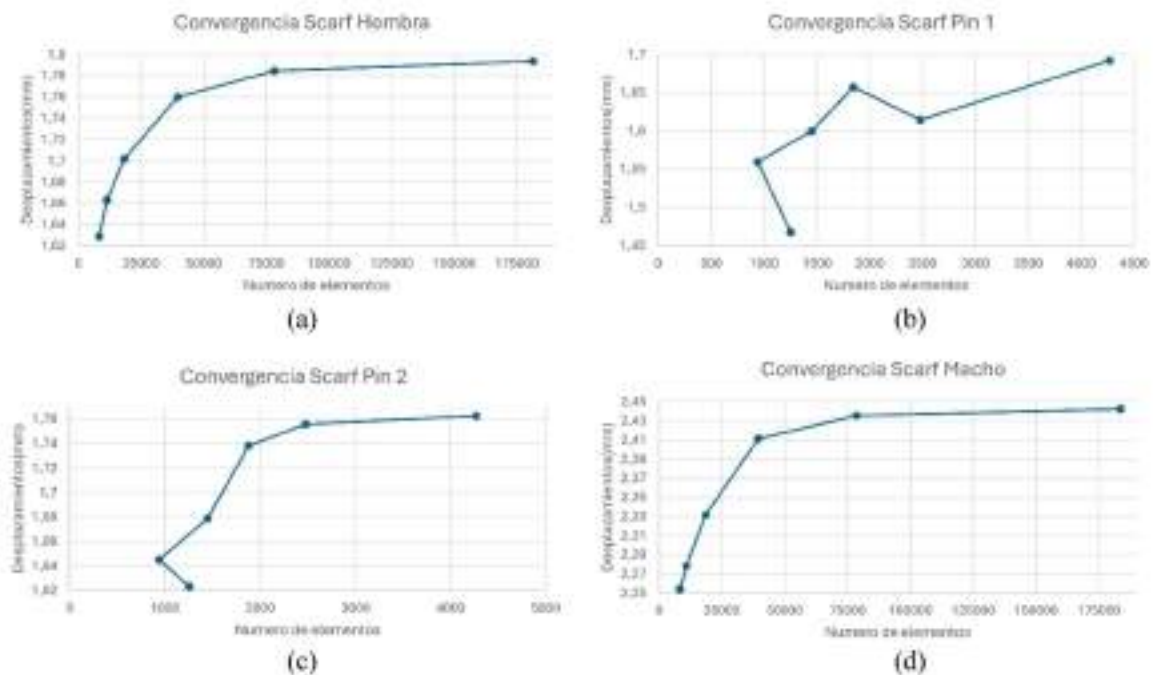


Ilustración 26. Convergencia de malla Scarf (a) hembra, (b) pin 1, (c) pin 2 y (d) macho

La Tabla 9, muestra el tamaño de la malla por cada modelo del empalme Scarf (hembra (a), pin 1 (b), pin 2 (c) y macho (d)), además, de la cantidad de nodos, elementos, desplazamientos relativos y error porcentual que tuvo cada modelo. Además, para todos los modelos del empalme Scarf se usó un tipo de elemento tetraédrico (Tet10)

Tabla 9. Resultados y selección de tamaño de malla para los modelos de empalme Scarf

Modelo	Tamaño Elemento	Nodos	Elementos	Desplazamiento	Error Relativo
Nombre de pieza	mm	#	#	mm	%
Scarf hembra	1	269586	181373	1,7938	1%
Scarf pin 1 de ajuste	1	8818	4268	1,6923	5%
Scarf pin 2 de ajuste	1	8818	4268	1,7624	0%
Scarf macho	1	273016	183619	2,4424	0%

5.5.3 Estado de esfuerzos y desplazamientos viga Scarf

La Ilustración 27 muestra un esfuerzo máximo de 17,36 MPa, siendo menor que el empalme Dovetail, pero mayor que el empalme Notched. El diseño Scarf presenta esfuerzos en la hembra donde se une con el macho justo en el radio interior derecho. Aunque el esfuerzo es más bajo que el Dovetail tiene un gran problema de diseño, lo que es un signo negativo del empalme.

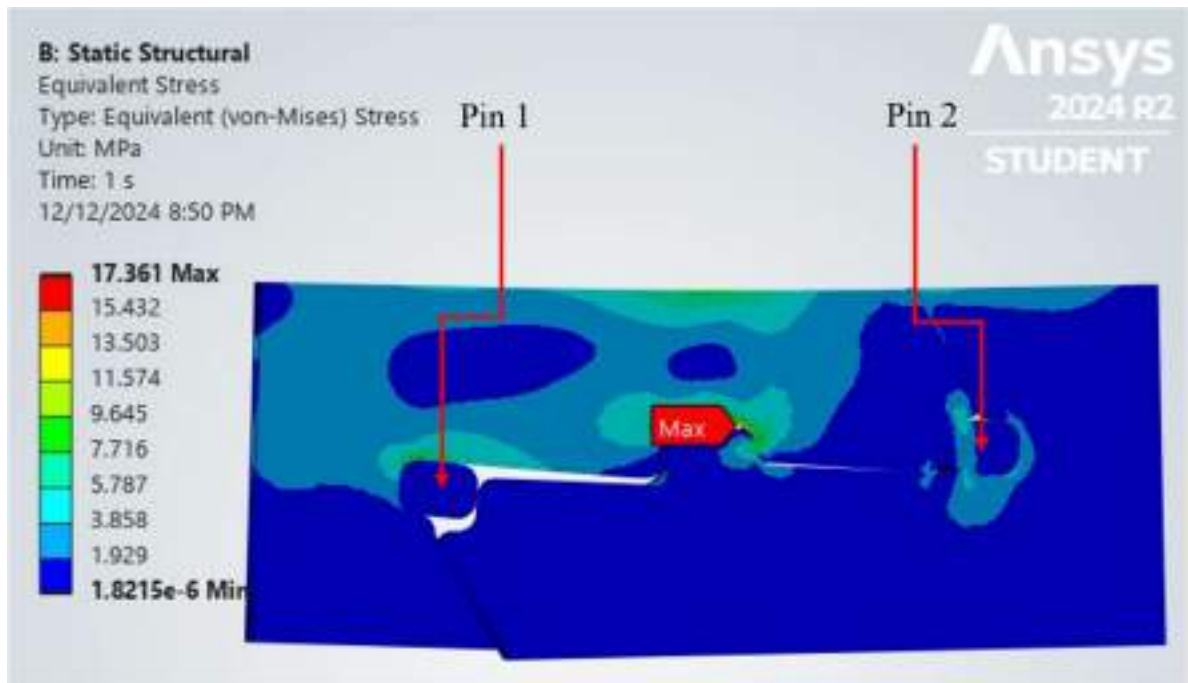


Ilustración 27. Resultados Von Mises simulación Scarf

La Ilustración 27, en conjunto con el análisis de convergencia de malla del pin 1 (Ver Ilustración 26(b)) evidencia un claro problema de diseño en el empalme Scarf. El pin 1 presenta un desplazamiento excesivo, generando un juego entre las piezas hembra y el macho. Esta condición compromete la función de ajuste del empalme, provocando un desajuste general y un aumento significativo desplazamiento en la junta. Este comportamiento anómalo se refleja en la curva de convergencia, que no muestra una tendencia clara a estabilizarse, sin embargo, el error relativo porcentual llega a un 5%.

Tabla 10. Resultados simulación Scarf

Tiempo	Desplazamiento	Von Mises	Max. Cortante
s	mm	MPa	MPa
0.1	0,24595	1,7287	0,9295
0.2	0,49051	3,4566	1,8588
0.35	0,85787	6,0673	3,2627
0.55	1,3449	9,5352	5,1276
0.75	1,8333	13,018	7,0006
0.88	2,1375	15,185	8,1659
1	2,4424	17,361	9,336

5.6 Resumen de resultados

Hasta este punto se han mostrado los modelos con respecto a la matriz de decisión que se realizó, vemos modelos con muchos defectos que no vale la pena iterar hasta la falla (60 MPa,) puesto que el modelo de referencia los supera en funcionamiento, la Tabla 11, hace un resumen de los datos expuestos hasta este punto.

Tabla 11. Resumen de las simulaciones realizadas.

Modelos	Desplazamiento Max	Von Mises Max (MPa)	Cortante Max (MPa)	Observación
Referencia	0,35379	3,1039	1,7855	Diseño uniforme – La simulación al ser un solo cuerpo muestra la deformación real de la pieza
Notched	1,7475	16,907	8,7967	Esfuerzo elevado, pero con el valor de desplazamiento mínimo de los 3 empalmes, puntos críticos en muesca
Scarf	2,4424	17,361	9,336	Esfuerzo mínimo y desplazamiento intermedia, tensiones elevadas en áreas críticas
Dovetail	3,6649	26,862	14,762	Esfuerzo y desplazamiento elevados en el empalme

El análisis de los resultados revela una marcada disparidad en el comportamiento de los diferentes tipos de empalmes bajo carga de flexión. Mientras la viga de referencia exhibe un desplazamiento máximo inferior a 1mm y un comportamiento estructural uniforme, los empalmes presentan valores de tensión significativamente superiores. El empalme Dovetail, en particular, supera el tercio del límite elástico del PLA (60MPa), lo que indica una condición de sobreesfuerzo inaceptable. El empalme Scarf, aunque presenta un desempeño ligeramente mejor, también muestra desplazamientos excesivos debido al error de diseño previamente explicado que compromete su integridad estructural. En contraste, el empalme Notched, si bien no alcanza el desempeño de la viga de referencia, demuestra ser la opción más viable de las tres, presentando los menores valores de deformación y tensión.

6 Nueva propuesta de diseño de empalme combinado

En base a los resultados obtenidos de las simulaciones mostradas hasta la sección anterior 5.6, se propone un rediseño de empalme con todas las virtudes observadas respecto a la visualización de los esfuerzos y desplazamientos de los modelos anteriores. El diseño se nombró empalme combinado (Ver Ilustración 28) por su combinación de los modelos anteriores, no es una figura común japonesa, pero si ha sido inspirada en los empalmes tradicionales.

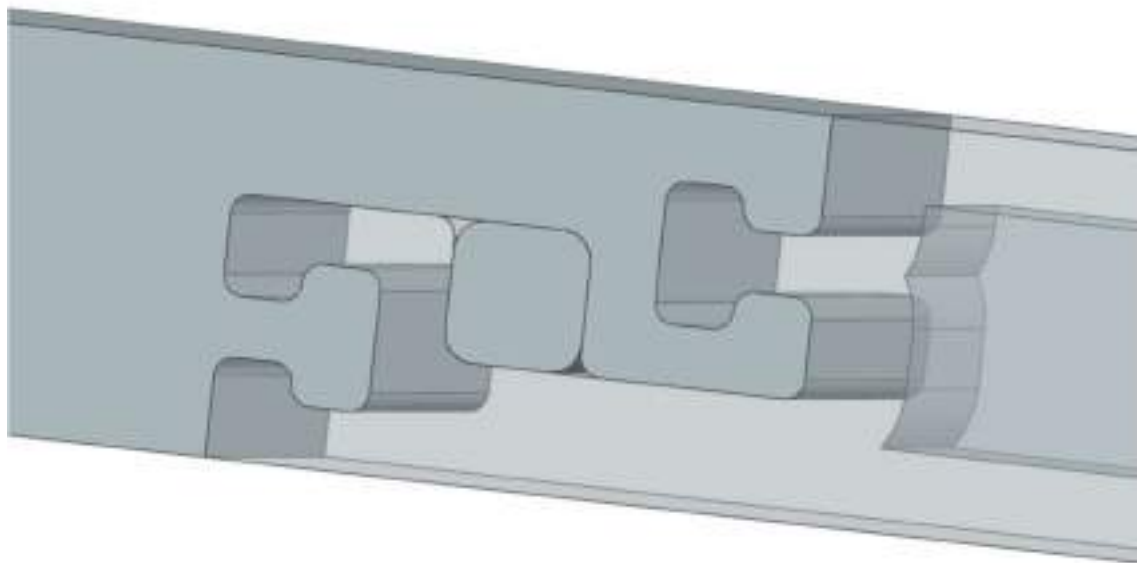


Ilustración 28. Empalme combinado

6.1.1 Características geométricas viga de empalme combinado

La Ilustración 29 muestra los detalles geométricos de la unión tipo combinada. Consta de 3 cuerpos, que ensamblados tienen una longitud de 180mm. Comparte la geometría de la cuña de los empalmes anteriores (Dovetail y Notched), por lo tanto, la cuña tiene una sección cuadrada de 7x7mm y la otra cara termina con una sección rectangular de 7x8,40mm dando un ángulo de inclinación de 2°, que tiene el objetivo de presionar los otros dos componentes entre sí. El área de contacto entre las superficies es de aproximadamente de 2094,09mm². (Ver anexo A para mayor detalle de las planimetrías).

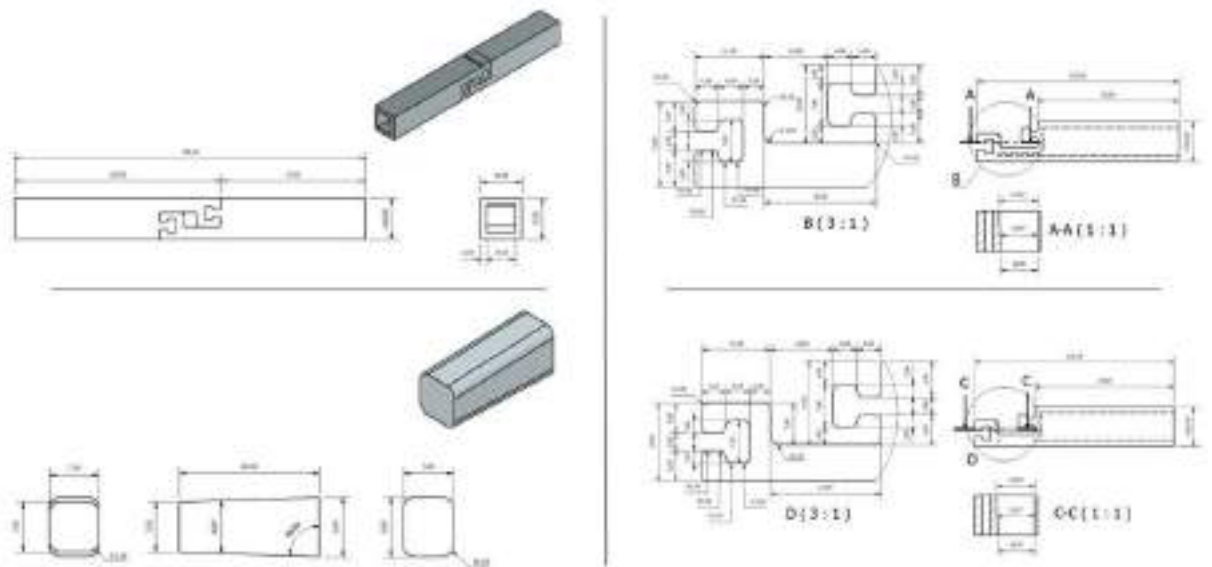


Ilustración 29. Planimetría de empalme Combinado

6.1.2 Condiciones de carga

Las condiciones y ubicaciones de carga del modelo combinado son exactamente las mismas mencionadas en la sección 5.2.1 y en la sección 5.3.1, donde la fuerza fue de 50N y el coeficiente de fricción estático $\mu=0.2$.

6.1.3 Convergencia del modelo

Los modelos CAD del empalme Combinado (Ver Ilustración 30, hembra (a), pin (b) y macho (c)) presentan un comportamiento de convergencia con pendiente descendente y similar entre ellos. Este tipo de convergencia se observa cuando los valores de desplazamiento disminuyen a medida que se refina la malla. Al incrementar el número de elementos en la malla, los desplazamientos calculados tienden a estabilizarse, alcanzando un valor prácticamente constante para un tamaño de elemento específico en los tres casos. Cabe destacar que el error relativo reportado en los 3 modelos fue del 0%.

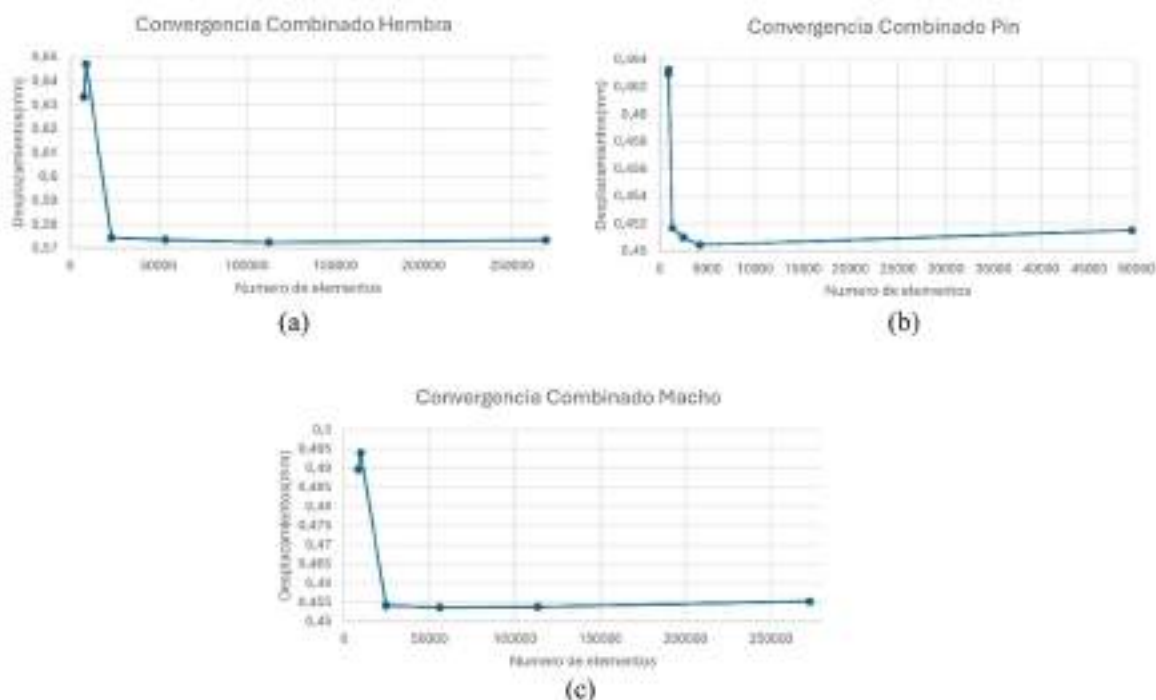


Ilustración 30. Convergencia de malla de empalme Combinado (a) hembra, (b) pin y (c) macho

La Tabla 12, muestra el tamaño de la malla por cada modelo del empalme Combinado (hembra (a), pin (b) y macho (c)), además, de la cantidad de nodos, elementos, desplazamiento relativo y error porcentual que tuvo cada modelo. Además, para todos los modelos del empalme Combinado se usó un tipo de elemento tetraédrico (Tet10)

Tabla 12. Resultados y selección de tamaño de malla para los modelos de empalme Combinado

Modelo	Tamaño Elemento	Nodos	Elementos	Desplazamiento	Error Relativo
Nombre de pieza	mm	#	#	mm	%
Combinado hembra	1	394509	269412	0,57349	0%
Combinado pin 1 de ajuste	1	72164	49494	0,45151	0%
Combinado macho	1	399896	272651	0,45518	0%

6.1.4 Estado de esfuerzos y desplazamientos viga de empalme combinado

Como se puede ver en la Ilustración 31, el modelo de empalme combinado presenta un esfuerzo máximo de 9.3 MPa, la distribución de los esfuerzos es uniforme y a pesar de concentrarse en una zona en específico, la geometría logra acaparar un área mayor a lo mostrado anteriormente. La Tabla 13 nos deja ver una deformación mínima, menor a 1mm.

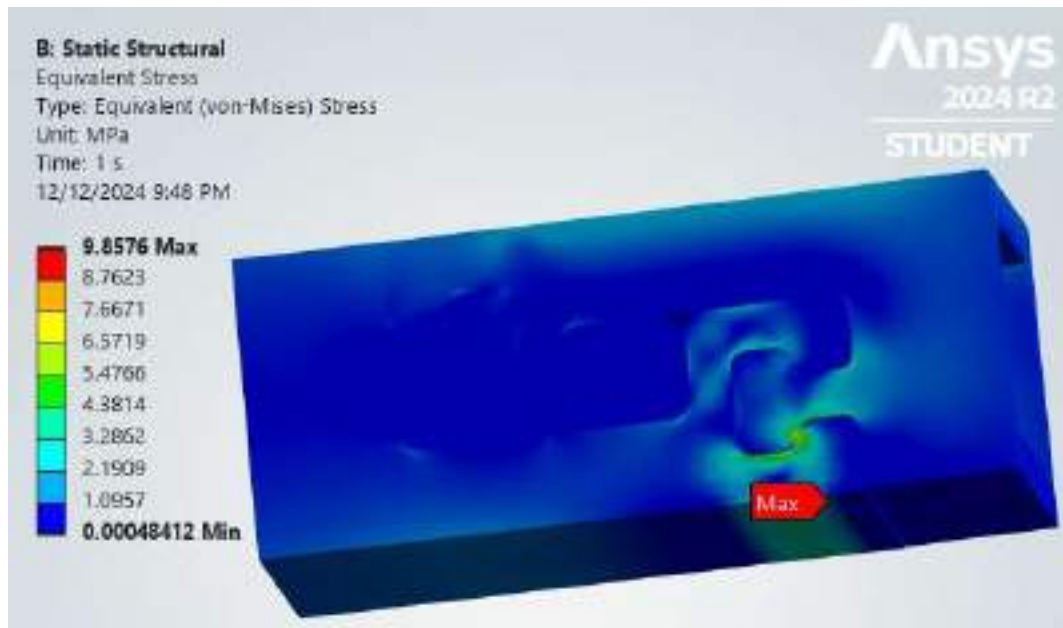


Ilustración 31. Resultados Von Mises simulación empalme combinado

Al comparar los resultados obtenidos para el nuevo diseño con los valores de la viga de referencia y los empalmes japoneses (Ver Tabla 11 y Tabla 13), se observa una mejora significativa en el desempeño. El nuevo diseño presenta una reducción en el desplazamiento máximo de entre un 67,18% y un 84,35%, y una disminución en la tensión de Von Mises de entre un 41,69% y un 63,30%, en comparación con los empalmes Notched y Dovetail, respectivamente. Estos resultados indican que el nuevo diseño es capaz de soportar cargas de flexión de manera más eficiente, con una deformación y esfuerzos notablemente menores.

Tabla 13. Resultados simulación empalme combinado

Tiempo	Desplazamiento	Von Mises	Max. Cortante
s	mm	MPa	MPa
0.1	5,70E-02	0,98313	0,54238
0.2	0,11466	1,9698	1,0866
0.35	0,20081	3,448	1,9021
0.55	0,31548	5,4183	2,9891
0.75	0,43014	7,3901	4,0768
0.88	0,50181	8,6237	4,7574
1	0,57349	9,8576	5,4381

7 CONCLUSIONES

En la evaluación y el análisis realizado demuestra que los empalmes tradicionales japoneses adaptados a la impresión 3D por FDM podrían ser una solución viable para la fabricación de piezas de gran tamaño. Sin embargo, los resultados muestran, que las geometrías más simples, como empalme combinado, ofrecen un mejor balance entre la resistencia mecánica, el menor desplazamiento y facilidad de fabricación.

Los resultados de las simulaciones mostraron que los empalmes analizados presentaron comportamientos mecánicos diversos. El empalme Dovetail presentó esfuerzos concentrados en un punto específico y los valores más altos en deformación y en el esfuerzo de Von Mises. El empalme Notched mostró la mejor distribución de esfuerzos (de los empalmes japoneses), aunque con puntos críticos.

El rediseño propuesto, denominado empalme combinado, logro reducir los esfuerzos de Von Mises entre un 41.7% y un 63.3%, además de distribuirlos de manera más uniforme. Asimismo, presento una disminución en la deformación de entre un 67.2% y un 84.4% y un aumento en el área de contacto de entre un 32.7% y un 44.6% en comparación con los empalmes japoneses.

La viabilidad técnica de los modelos simulados radica en su capacidad para soportar cargas de flexión comparables a una viga de referencia homogénea, con deformaciones menores en el empalme combinado (0.57 mm frente a 0.35mm de la viga de referencia). Además, los empalmes optimizados permiten una manufacturabilidad eficiente al evitar el uso de adhesivos y minimizar procesos complejos de ensamble (uniones atornilladas). Esto resalta la importancia de las simulaciones por elementos finitos como una herramienta de validación.

9 RECOMENDACIONES

Para las pruebas experimentales, se recomienda complementar los resultados con pruebas físicas para validar los modelos simulados y confirmar la resistencia mecánica bajo condiciones reales de operación.

En la evaluación de otros tipos de cargas se recomienda ampliar el alcance de las pruebas para incluir, además, de la flexión, esfuerzos como la torsión y la tracción. Esto permitirá un análisis más integral del comportamiento mecánico de los empalmes, especialmente en aplicaciones donde las piezas puedan estar sujetas a múltiples tipos de esfuerzo simultáneamente.

Para la optimización de diseños se recomienda explorar modificaciones geométricas adicionales en los empalmes seleccionados, como la variación del tamaño de los pines y ajuste de los radios, para reducir aún más los puntos críticos de concentración de esfuerzos.

Si se considera la aplicación de adhesivos en futuros estudios, se recomienda evaluar su uso como complemento a los empalmes. Esto podría mejorar la resistencia a esfuerzos de tracción y flexión en configuraciones específicas.

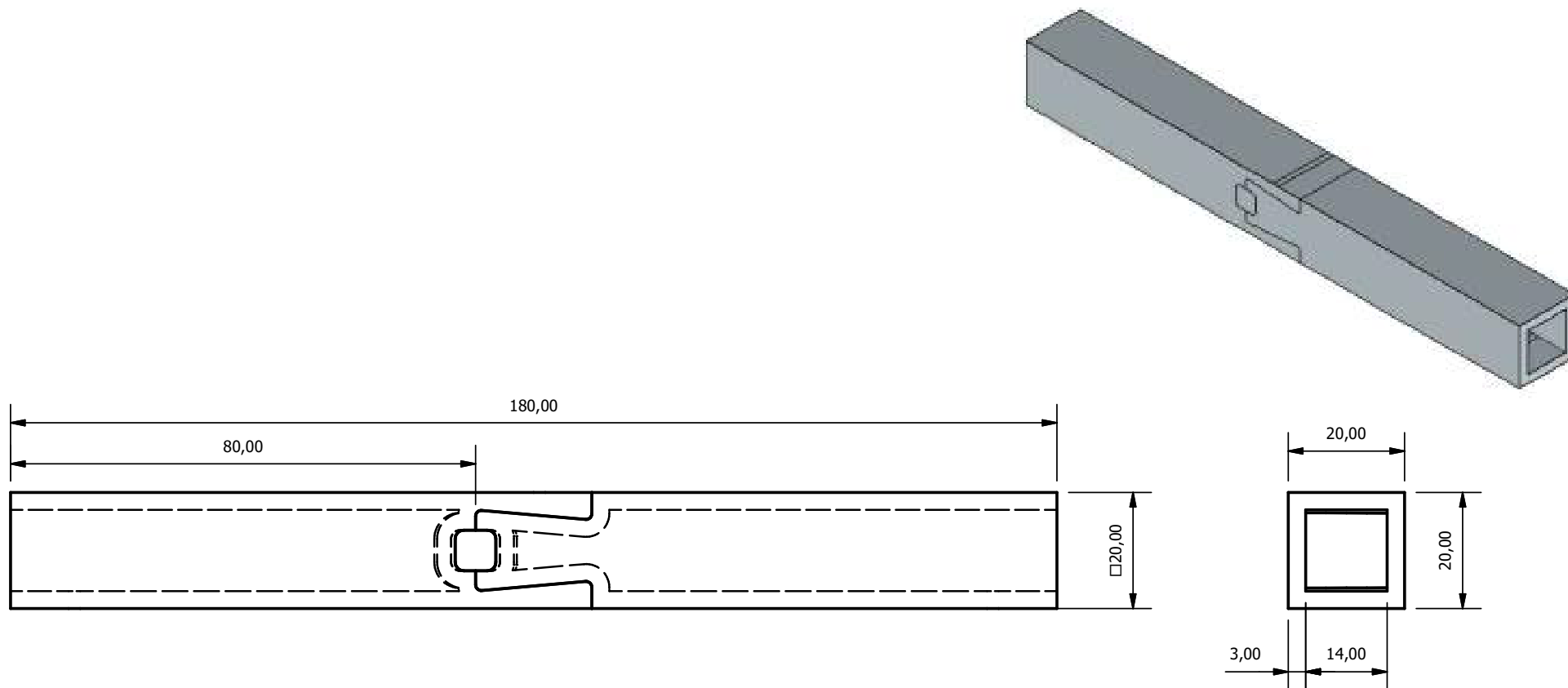
Se recomienda utilizar diferentes materiales y métodos de impresión para los tipos de empalme seleccionados. Comparar estos con los valores obtenidos en este estudio permitirá identificar los mejores métodos y materiales para este fin, garantizando así una optimización en la resistencia y funcionalidad de los empalmes.

10 BIBLIOGRAFÍA

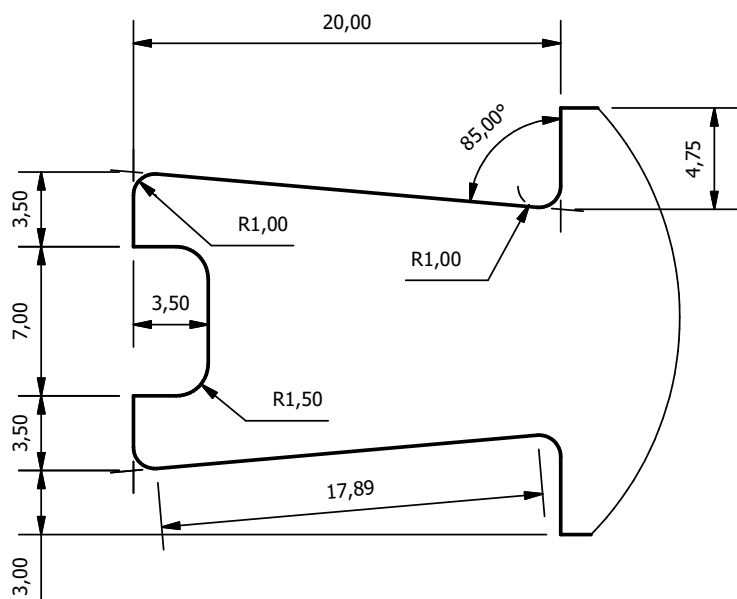
- [1] I. Gibson, D. Rosen, y B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. New York, NY: Springer New York, 2015. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3.
- [2] F. Auricchio y S. Marconi, «3D printing: clinical applications in orthopaedics and traumatology», *EFORT Open Rev.*, vol. 1, n.º 5, pp. 121-127, may 2016, doi: 10.1302/2058-5241.1.000012.
- [3] B. Blakey-Milner *et al.*, «Metal additive manufacturing in aerospace: A review», *Mater. Des.*, vol. 209, p. 110008, nov. 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110008.
- [4] A. Katsumaru y R. Ozawa, «Design of 3D-printed assembly mechanisms based on special wooden joinery techniques and its application to a robotic hand», en *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Paris, France: IEEE, may 2020, pp. 9981-9987. doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9197475.
- [5] I Morosavljevic, D. Kozak, J. Morosavljevic, y I. Opacak, «Numerical and experimental analysis of the application of traditional woodworking joinery on 3D printed parts», presentado en Proceedings of the 10th international scientific and expert conference team 2022, Croatia, 22 2022.
- [6] P. Kłosowski, I. Lubowiecka, A. Pestka, y K. Szepietowska, «Historical carpentry corner log joints—Numerical analysis within stochastic framework», *Eng. Struct.*, vol. 176, pp. 64-73, dic. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.08.095.
- [7] A. Karolak y J. Jasieńko, «Experimental research on tensile dovetail joint between rafter and collar beam», *Eng. Struct.*, vol. 307, p. 117854, may 2024, doi: 10.1016/j.engstruct.2024.117854.
- [8] «The art of Japanese joinery».
- [9] K. Zarbane y Z. Beidouri, Eds., *Proceedings of CASICAM 2022*. en Springer Tracts in Additive Manufacturing. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. doi: 10.1007/978-3-031-32927-2.
- [10] R. G. Budynas, K. J. Nisbett, J. K. Nisbett, y J. E. Shigley, *Shigley's mechanical engineering design*, 10. ed. in SI units. en McGraw-Hill series in mechanical engineering. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015.
- [11] *ISO-178-2019 Plastics- Determination of flexural properties*, Switzerland., abril de 2019.
- [12] F. P. Beer, «Mecanica Vectorial para Ingenieros Estatica».
- [13] E. Serna M., *Desarrollo e Innovación en Ingeniería (ed. 4)*. Zenodo, 2019. doi: 10.5281/ZENODO.3387679.
- [14] B. J. U. R. César Augusto Villamizar Sierra, «Análisis de las Propiedades Mecánicas en Piezas de PLA Fabricadas por Manufactura Aditiva con Fibras Orgánicas de Refuerzo», Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2022.
- [15] «2.1.1. Lattice». Accedido: 12 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://ansyshelp.ansys.com/public/////Views/Secured/corp/v242/en/acp_md/acp_md_create_lattice.html
- [16] «3.1.3. Lattice Optimization Shape Processing». Accedido: 12 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en:

- https://ansyshelp.ansys.com/public//Views/Secured/corp/v242/en/mech_struct_opt/ds_topo_shape_process_lattice.html
- [17] «3.2.4. Lattice Optimization Analysis». Accedido: 12 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://ansyshelp.ansys.com/public//Views/Secured/corp/v242/en/mech_struct_opt/ds_topo_shape_process_lattice.html
- [18] S. Farah, D. G. Anderson, y R. Langer, «Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review», *Adv. Drug Deliv. Rev.*, vol. 107, pp. 367-392, dic. 2016, doi: 10.1016/j.addr.2016.06.012.
- [19] «16.2.2. Steps, Substeps, and Equilibrium Iterations». Accedido: 8 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://ansyshelp.ansys.com/public//Views/Secured/corp/v242/en/wb_sim/ds_Steps_Substeps_Eq.html
- [20] «16.1.1. Step Controls for Static and Transient Analyses». Accedido: 8 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://ansyshelp.ansys.com/public//Views/Secured/corp/v242/en/wb_sim/ds_Step_Controls.html
- [21] «18.10. Using Adaptive Convergence». Accedido: 7 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://ansyshelp.ansys.com/public//Views/Secured/corp/v242/en/wb_sim/ds_Convergence.html
- [22] «Guidelines for Mesh Convergence in Ansys Mechanical | Ansys Courses». Accedido: 7 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://innovationspace.ansys.com/courses/courses/topics-in-meshing-for-structural-analysis/lessons/guidelines-for-mesh-convergence-in-ansys-mechanical/>
- [23] N. Stoimenov, M. Kandeve, M. Zagorski, y P. Panev, «Static and Kinetic Friction of 3D Printed Polymers and Composites», *Tribol. Ind.*, vol. 46, n.º 1, pp. 97-106, mar. 2024, doi: 10.24874/ti.1546.08.23.10.

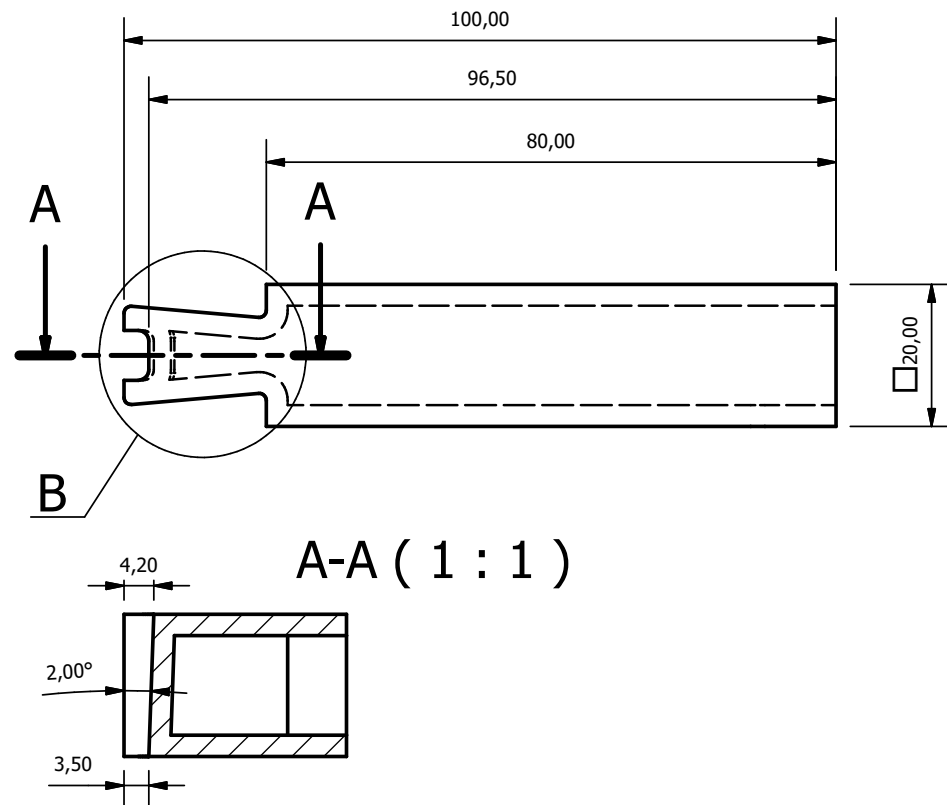
ANEXO A



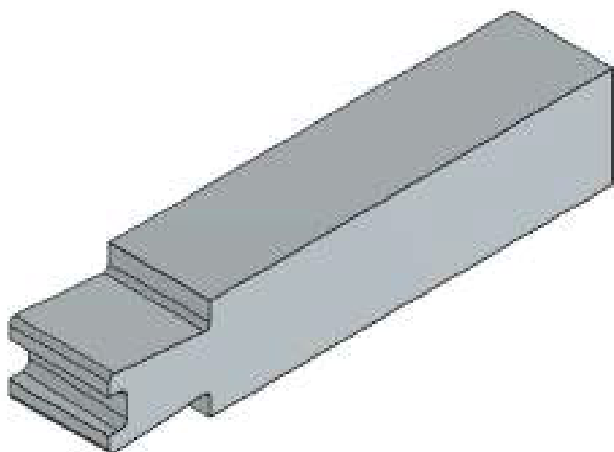
EMPRESA:  INGENIERÍA MECÁNICA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA				Se debe tener en cuenta las especificaciones de la impresora 3D para su modelado CAD Si no se indica lo contrario: -Las cotas se expresan en mm.		TITULO: EMPALME JAPONÉS DOVETAIL APLICADO A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
COD PROYECTO: TS-002				MATERIAL:		PROYECTO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA				
DIBUJO	DYLAN GARCIA		05/12/2024	HOJA A4 ESCALA: 1 : 1 		NOMBRE DE PIEZA: EMPALME JAPONÉS DOVETAIL	
DISEÑO	RICARDO VARGAS		05/12/2024				
APROBO	JORGE GARCIA		06/12/2024	HOJA 1 DE 4			
NOTAS: - Se tiene un espesor de pared para el proceso de impresión de 3mm.							



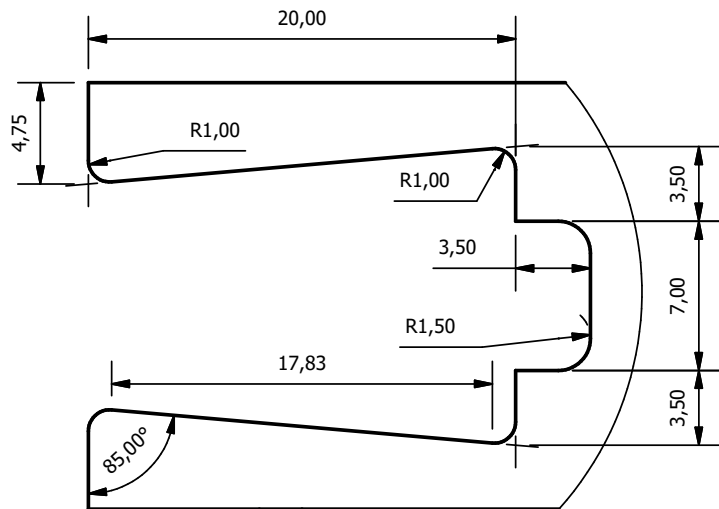
B (3 : 1)



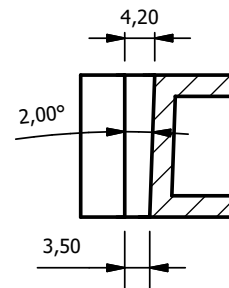
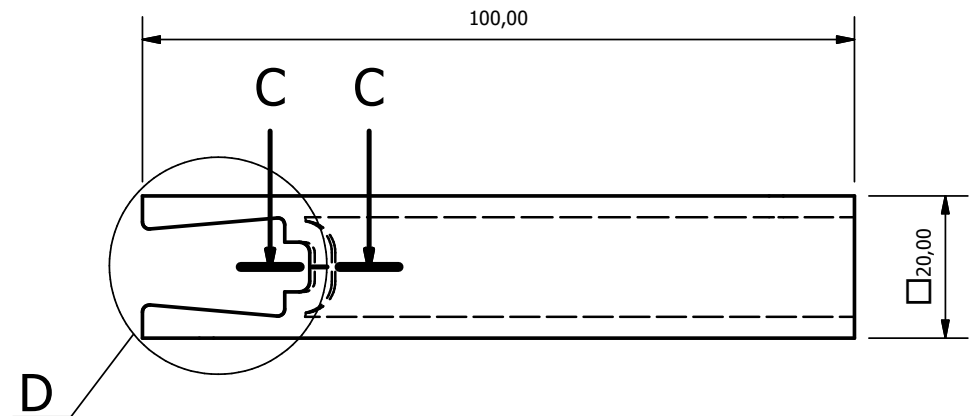
A-A (1 : 1)



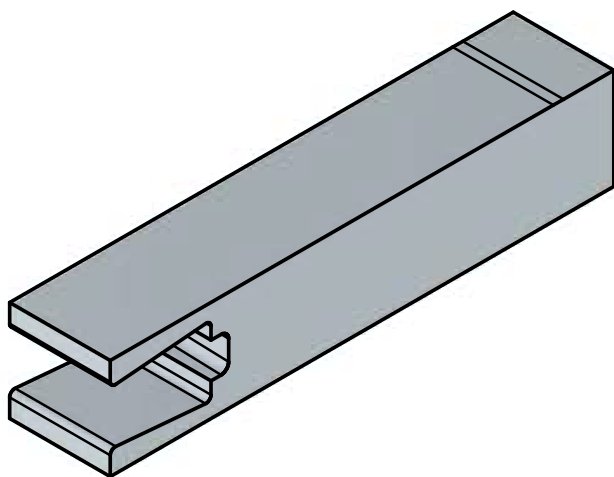
EMPRESA:  INGENIERÍA MECÁNICA CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO				Se debe tener en cuenta las especificaciones de la impresora 3D para su modelado CAD Si no se indica lo contrario: -Las cotas se expresan en mm.				TITULO: EMPALME JAPONÉS DOVETAIL APLICADO A IMPRESIÓN 3D POR FDM			
COD PROYECTO: TS-002				MATERIAL: Plástico PLA				PROYECTO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR FDM			
	NOMBRE	FIRMA	FECHA								
DIBUJO	DYLAN GARCIA		05/12/2024	HOJA A4	ESCALA: 1 : 1				NOMBRE DE PIEZA: DOVETAIL HEMBRA		
DISEÑO	RICARDO VARGAS		05/12/2024	HOJA 2	DE 4						
APROBO	JORGE GARCIA		06/12/2024	NOTAS: - Existe simetría a lo largo del eje de corte A-A. - Se tiene un espesor de pared para el proceso de impresión de 3mm.							



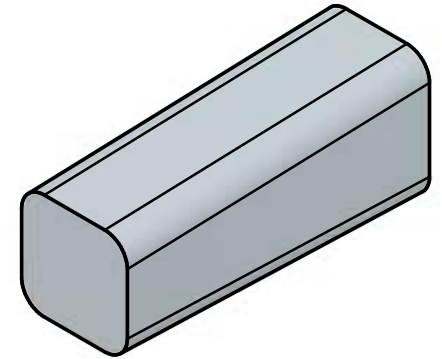
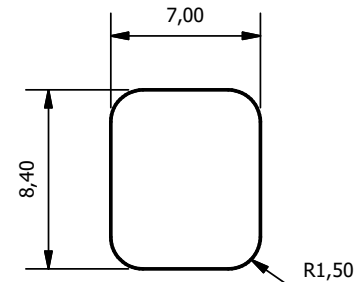
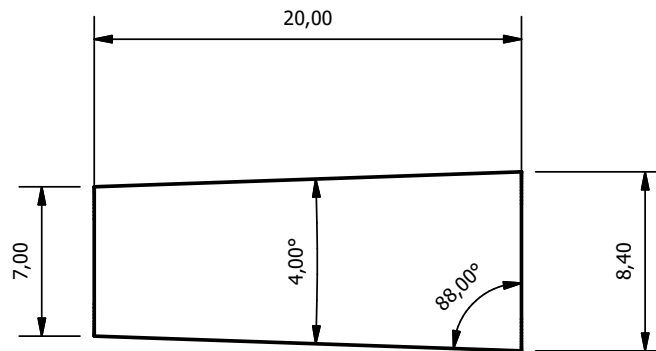
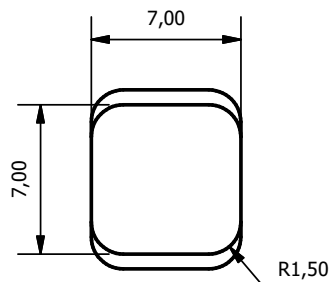
D (3 : 1)



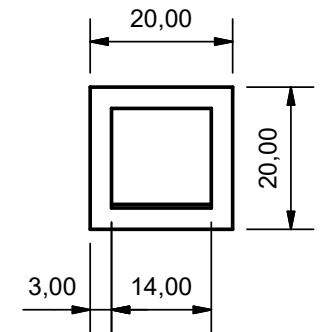
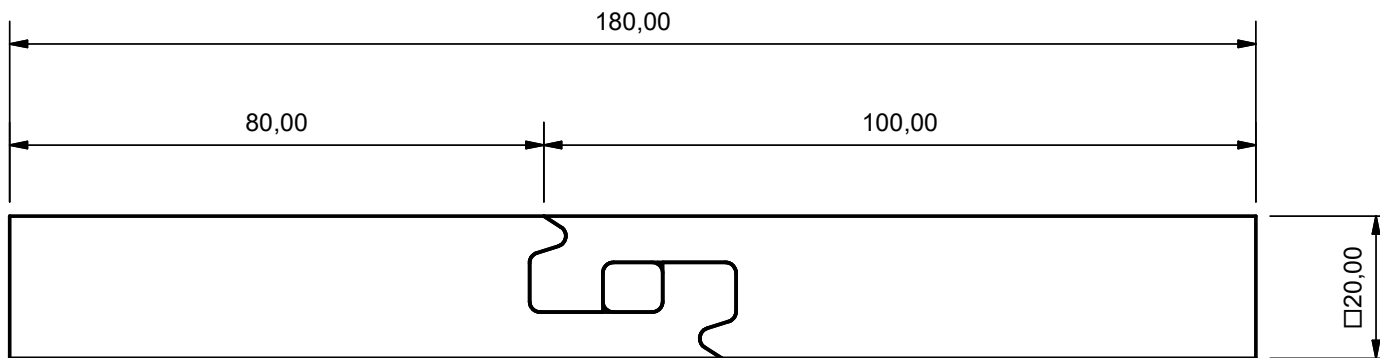
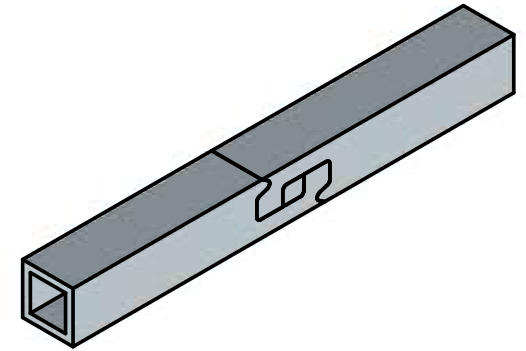
C-C (1 : 1)



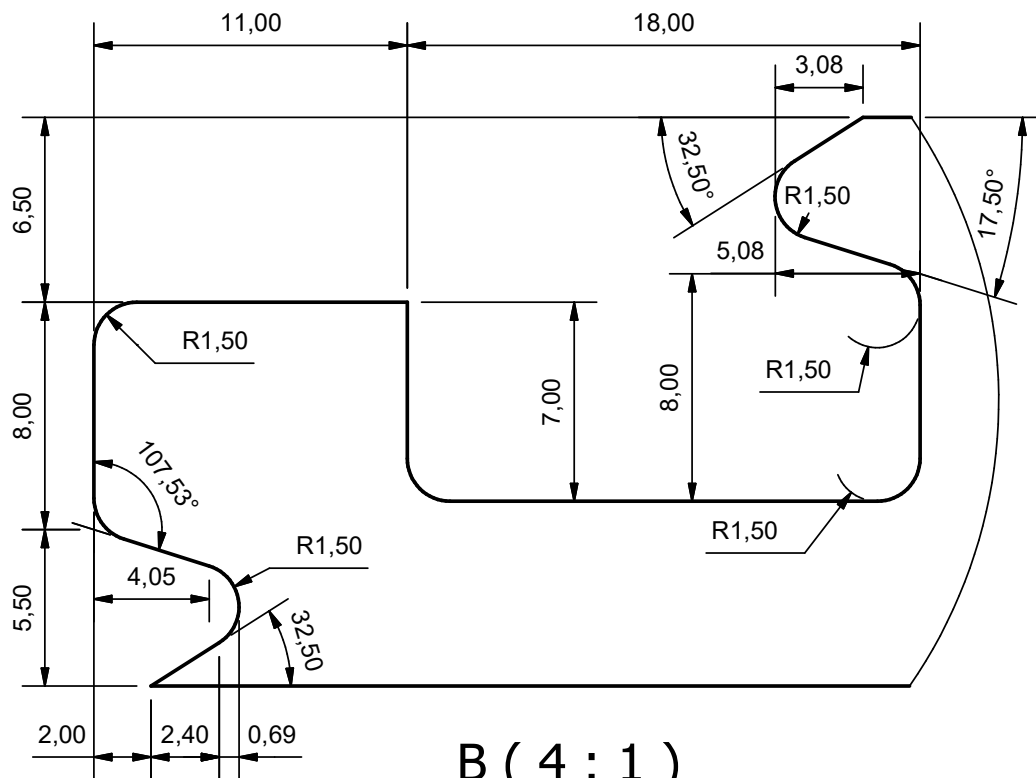
EMPRESA:  INGENIERÍA MECÁNICA CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO				Se debe tener en cuenta las especificaciones de la impresora 3D para su modelado CAD Si no se indica lo contrario: -Las cotas se expresan en mm.				TITULO: EMPALME JAPONÉS DOVETAIL APLICADO A IMPRESIÓN 3D POR FDM			
COD PROYECTO: TS-002				MATERIAL: Plástico PLA				PROYECTO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR FDM			
	NOMBRE	FIRMA	FECHA								
DIBUJO	DYLAN GARCIA		05/12/2024	HOJA A4	ESCALA: 1 : 1				NOMBRE DE PIEZA: DOVETAIL MACHO		
DISEÑO	RICARDO VARGAS		05/12/2024	HOJA 3	DE 4						
APROBO	JORGE GARCIA		06/12/2024								
NOTAS: - Existe simetría a lo largo del eje de corte C-C. - Se tiene un espesor de pared para el proceso de impresión de 3mm.											



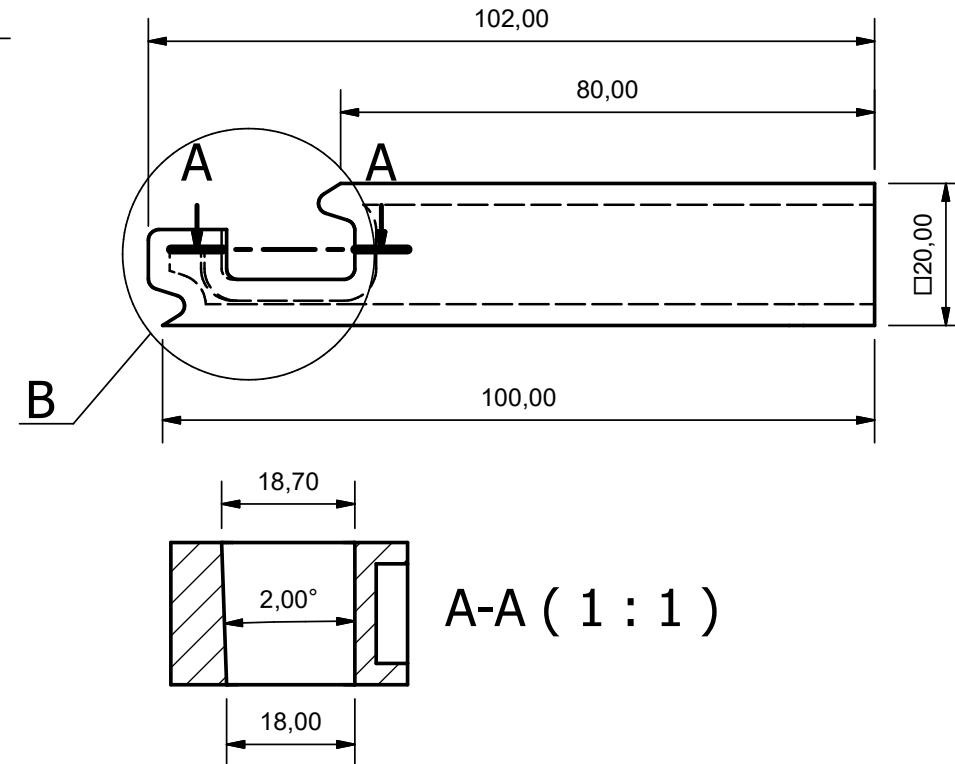
EMPRESA:  INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD DEL CAJAMARCA CONVENIO DE COLABORACIÓN CON EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CALI				Se debe tener en cuenta las especificaciones de la impresora 3D para su modelado CAD Si no se indica lo contrario: -Las cotas se expresan en mm.		TITULO: EMPALME JAPONÉS DOVETAIL APLICADO A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
COD PROYECTO: TS-002				MATERIAL:		PROYECTO:	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	Plástico PLA		EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
DIBUJO	DYLAN GARCIA		05/12/2024	HOJA A4	ESCALA: 3 : 1		
DISEÑO	RICARDO VARGAS		05/12/2024	HOJA	4	DE	4
APROBO	JORGE GARCIA		06/12/2024	NOMBRE DE PIEZA: PIN DE AJUSTE DOVETAIL			
NOTAS: - Todos los redondeos que se observan son de 1,50mm. - Se tiene un espesor de pared para el proceso de impresión de 3mm.							



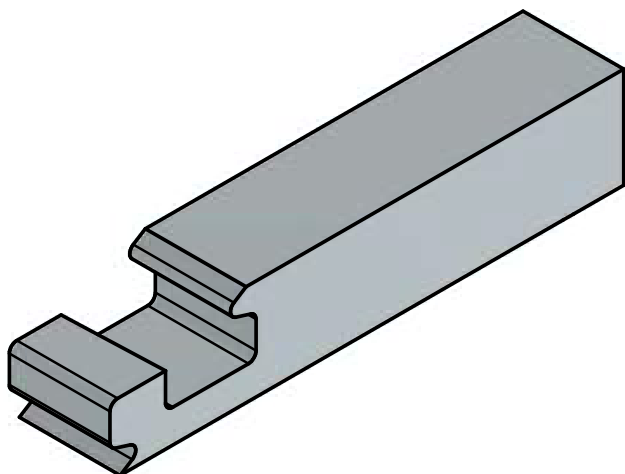
EMPRESA:  INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD DEL CAJAMARCA				Se debe tener en cuenta las especificaciones de la impresora 3D para su modelado CAD Si no se indica lo contrario: -Las cotas se expresan en mm.		TÍTULO:	
COD PROYECTO: TS-002						EMPALME JAPONÉS NOTCHED APLICADO A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	MATERIAL:		PROYECTO:	
DIBUJO	DYLAN GARCIA		05/12/2024			EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
DISEÑO	RICARDO VARGAS		05/12/2024	HOJA A4	ESCALA: 1 : 1		
APROBO	JORGE GARCIA		06/12/2024	HOJA 1	DE 3		
NOTAS: - Se tiene un espesor de pared para el proceso de impresión de 3mm.						NOMBRE DE PIEZA:	
						EMPALME JAPONÉS NOTCHED	



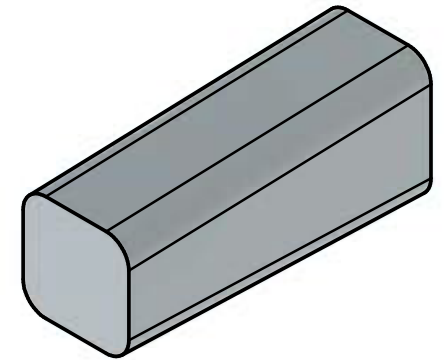
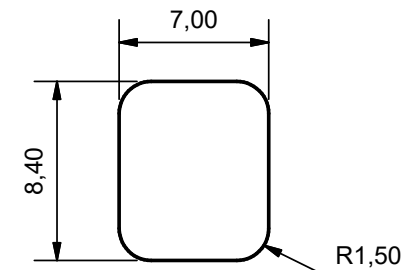
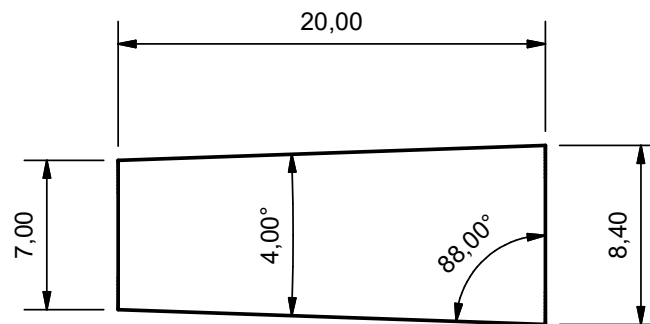
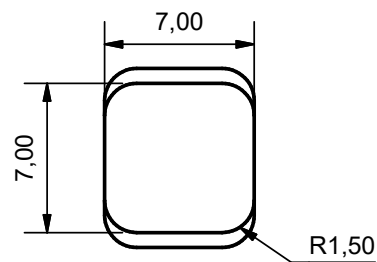
B (4 : 1)



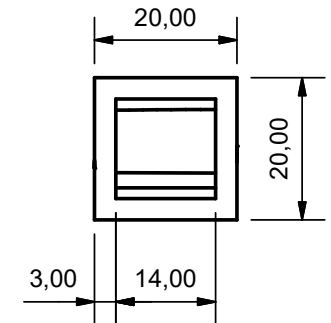
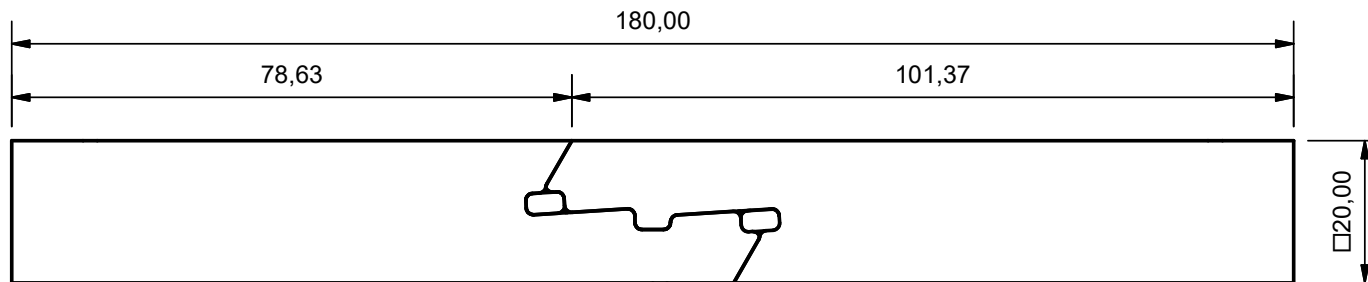
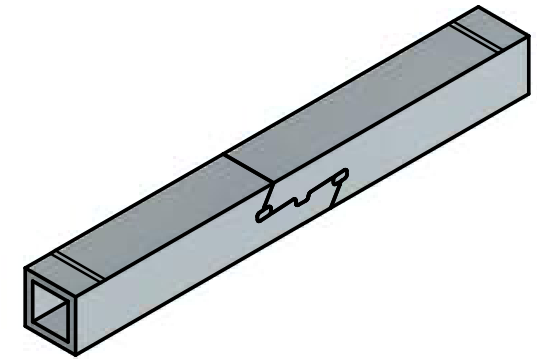
A-A (1 : 1)



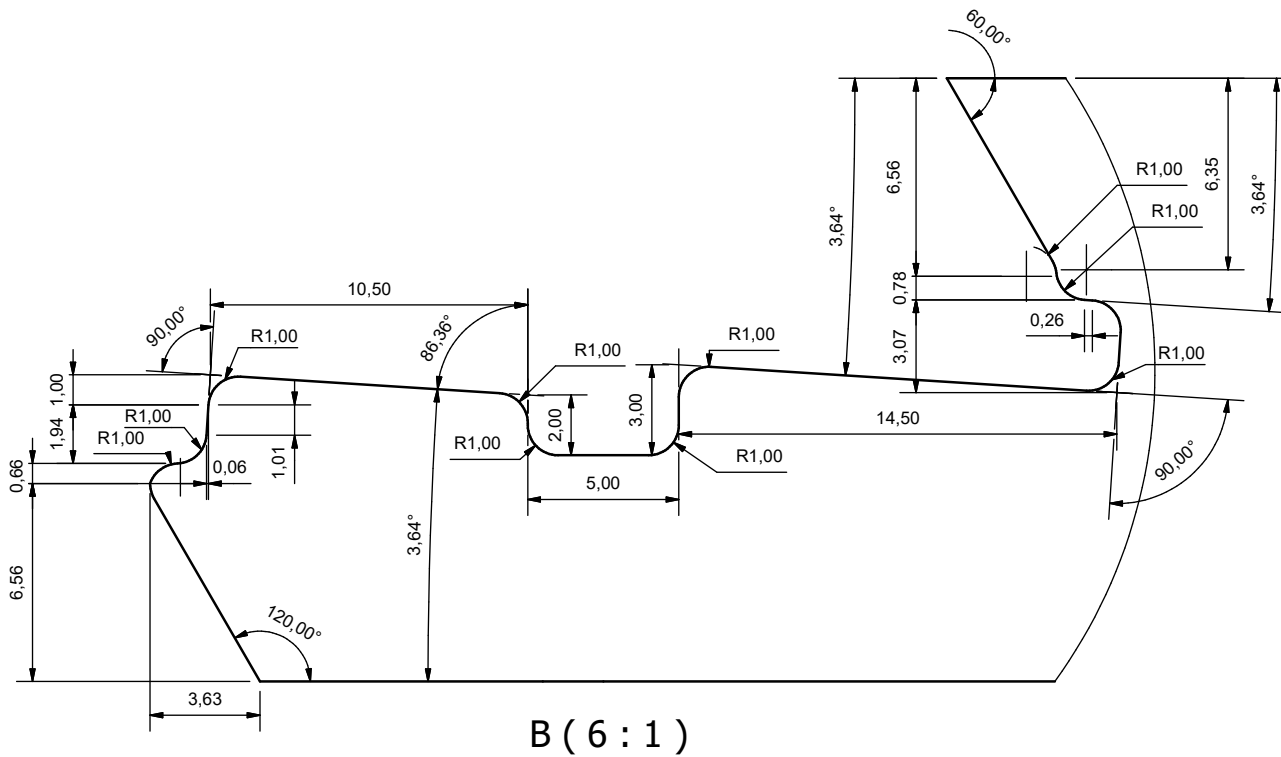
EMPRESA:  INGENIERÍA MECÁNICA CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA				Se debe tener en cuenta las especificaciones de la impresora 3D para su modelado CAD Si no se indica lo contrario: -Las cotas se expresan en mm.				TITULO: EMPALME JAPONÉS NOTCHED APLICADO A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
COD PROYECTO: TS-002									
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	MATERIAL:				PROYECTO:	
DIBUJO	DYLAN GARCIA		05/12/2024	Plástico PLA				EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
DISEÑO	RICARDO VARGAS		05/12/2024	HOJA A4	ESCALA: 1 : 1				
APROBO	JORGE GARCIA		06/12/2024	HOJA	2	DE	3	NOMBRE DE PIEZA:	
NOTAS: - Existe simetría a lo largo del eje de corte A-A. - Todos los redondeos que se observan en el detalle B son de radio de 1.5mm. - Se tiene un espesor de pared para el proceso de impresión de 3mm.								NOTCHED SIMÉTRICO	



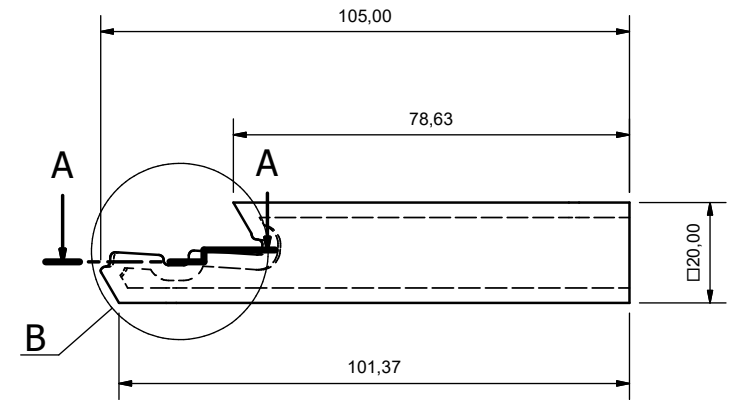
EMPRESA:  INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE GUAYMAS				Se debe tener en cuenta las especificaciones de la impresora 3D para su modelado CAD Si no se indica lo contrario: -Las cotas se expresan en mm.		TITULO: EMPALME JAPONÉS NOTCHED APLICADO A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
COD PROYECTO: TS-002				MATERIAL: Plástico PLA		PROYECTO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	HOJA	ESCALA:		
DIBUJO	DYLAN GARCIA		05/12/2024	A4	3 : 1		
DISEÑO	RICARDO VARGAS		05/12/2024				
APROBO	JORGE GARCIA		06/12/2024	HOJA	3	DE	3
NOTAS: - Todos los redondeos que se observan son de 1,50mm. - Se tiene un espesor de pared para el proceso de impresión de 3mm.						NOMBRE DE PIEZA: PIN DE AJUSTE NOTCHED	



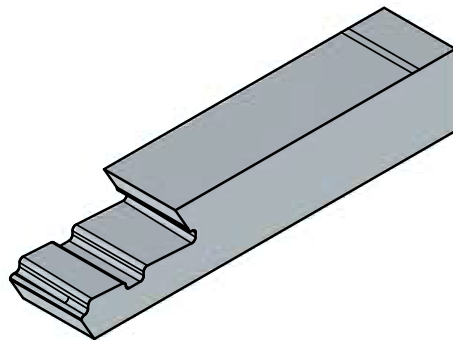
EMPRESA:				 Se debe tener en cuenta las especificaciones de la impresora 3D para su modelado CAD Si no se indica lo contrario: -Las cotas se expresan en mm.		TITULO:	
COD PROYECTO: TS-002						EMPALME JAPONÉS SCARF APLICADO A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	MATERIAL:		PROYECTO:	
DIBUJO	DYLAN GARCIA		05/12/2024			EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
DISEÑO	RICARDO VARGAS		05/12/2024	HOJA A4	ESCALA: 1 : 1		
APROBO	JORGE GARCIA		06/12/2024	HOJA 1	DE 4		
NOTAS:				NOMBRE DE PIEZA:			
- Se tiene un espesor de pared para el proceso de impresión de 3mm.				EMPALME JAPONÉS SCARF			



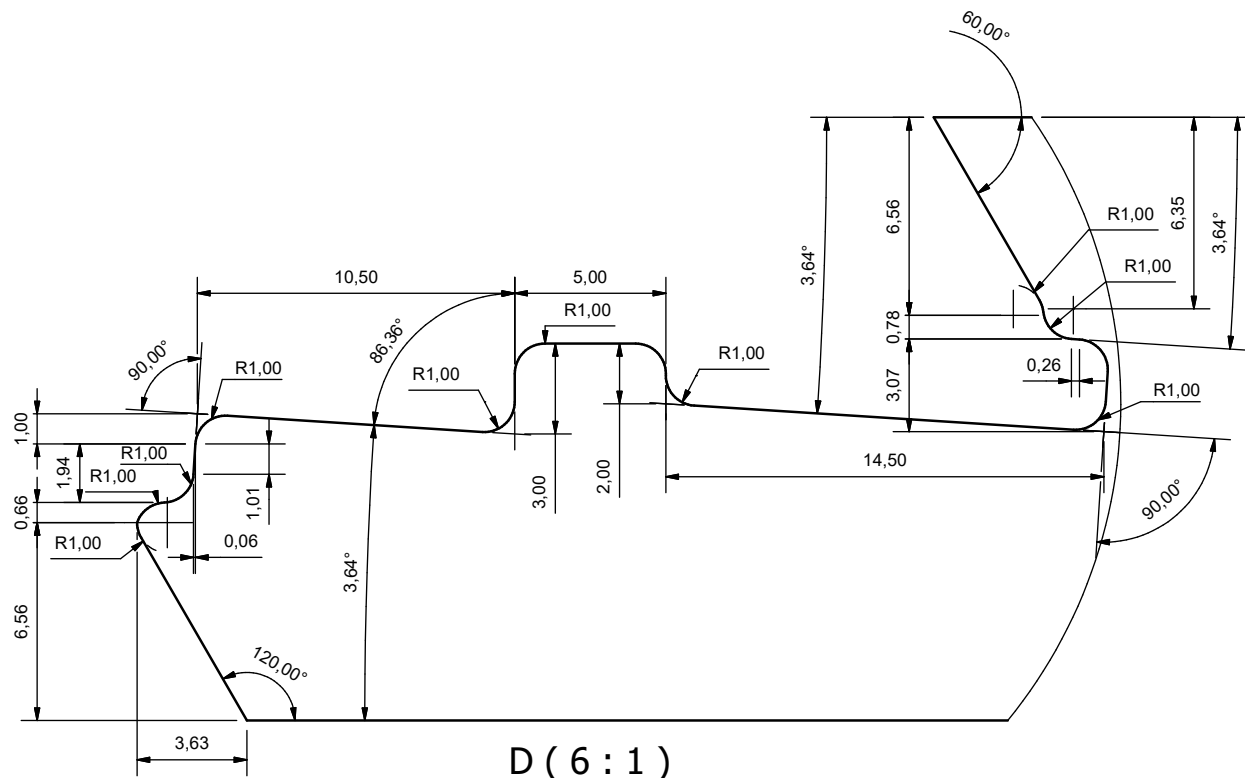
B (6 : 1)



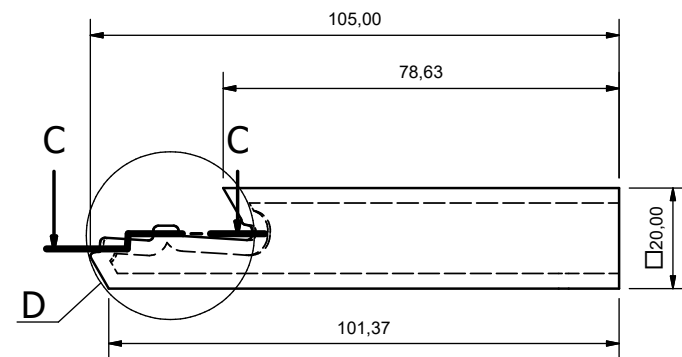
A-A (2 : 1)



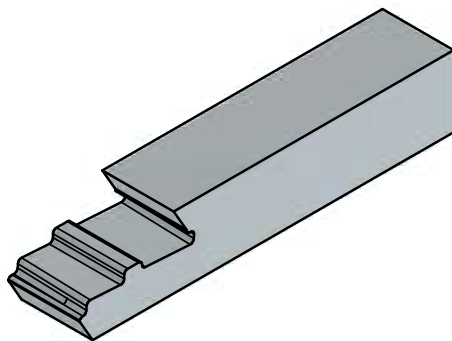
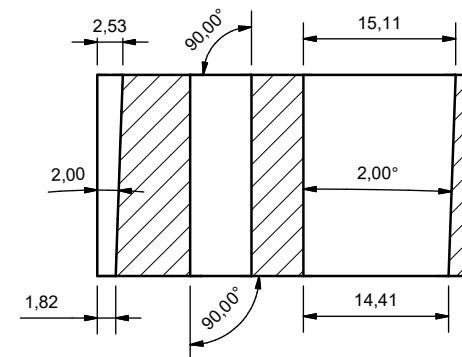
EMPRESA:				Se debe tener en cuenta las especificaciones de la impresora 3D para su modelado CAD Si no se indica lo contrario: -Las cotas se expresan en mm.		TITULO: EMPALME JAPONÉS SCARF APLICADO A IMPRESIÓN 3D POR FDM		
								
COD PROYECTO: TS-002								
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	MATERIAL:		PROYECTO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR FDM		
DIBUJO	DYLAN GARCIA		05/12/2024	Plástico PLA				
DISEÑO	RICARDO VARGAS		05/12/2024	HOJA A3	ESCALA: 1 : 1			
APROBO	JORGE GARCIA		06/12/2024	HOJA	2 DE 4			
NOTAS:								
- Existe simetría a lo largo del eje de corte A-A.						NOMBRE DE PIEZA: SCARF HEMBRA		
- Todos los redondeos que se observan en el detalle B son de 1mm								
- Se tiene un espesor de pared para el proceso de impresión de 3mm.								



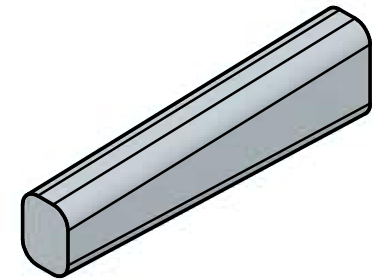
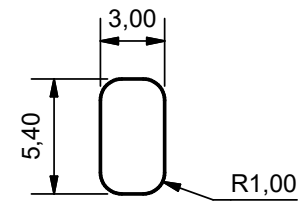
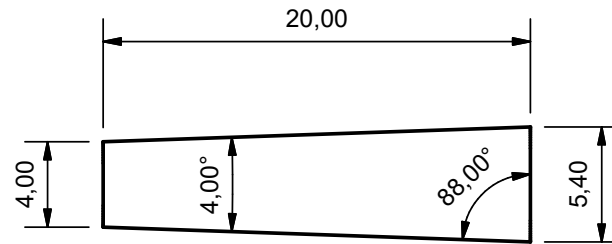
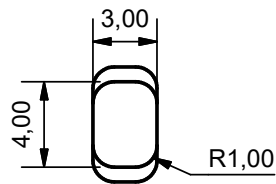
D (6 : 1)



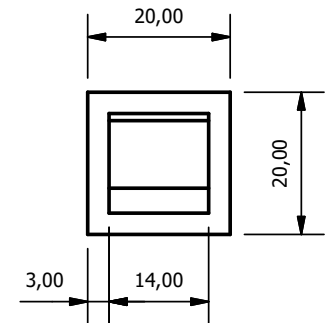
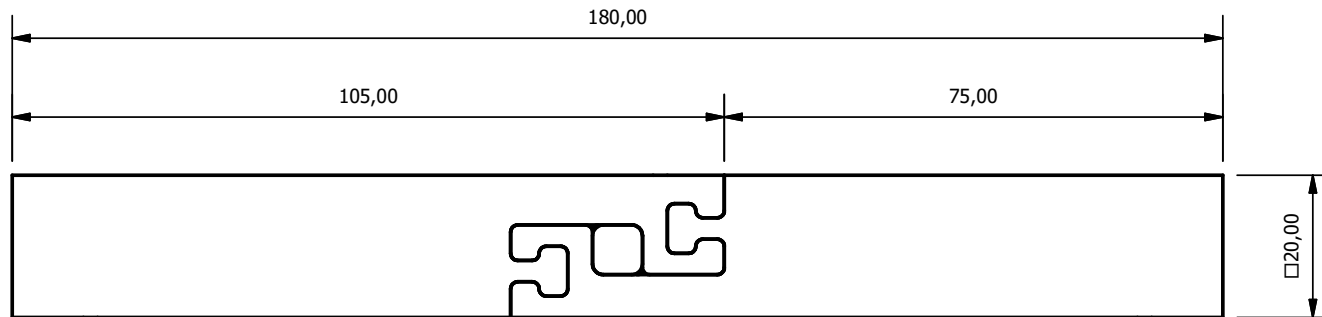
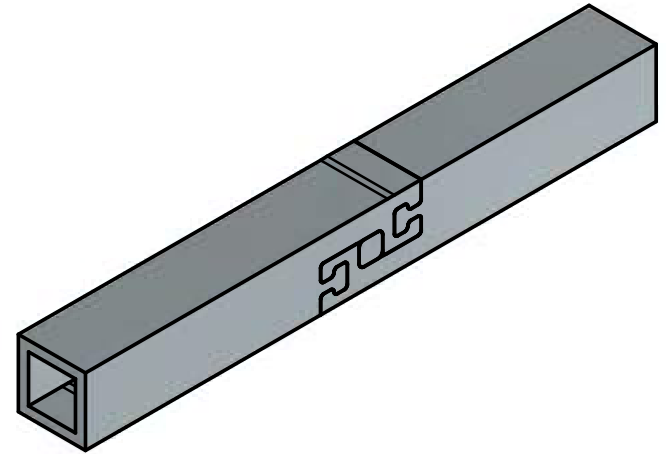
C-C (2 : 1)



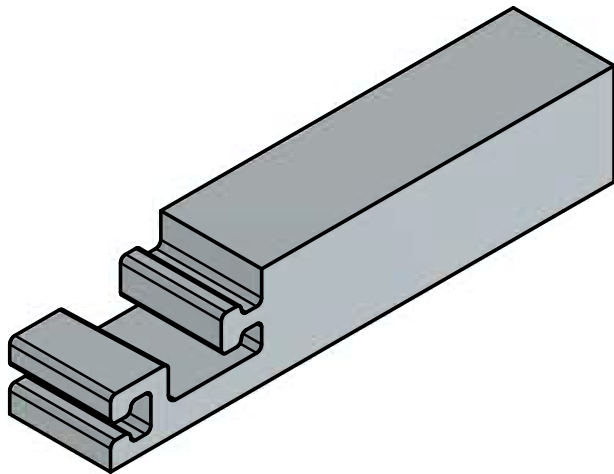
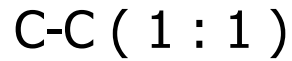
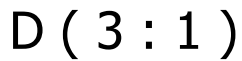
EMPRESA:  INGENIERÍA MECÁNICA				Se debe tener en cuenta las especificaciones de la impresora 3D para su modelado CAD Si no se indica lo contrario: -Las cotas se expresan en mm.		TITULO: EMPALME JAPONÉS SCARF APLICADO A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
COD PROYECTO: TS-002							
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	MATERIAL:		PROYECTO:	
DIBUJO	DYLAN GARCIA		05/12/2024	Plástico PLA		EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
DISEÑO	RICARDO VARGAS		05/12/2024	HOJA A3	ESCALA: 1 : 1		
APROBO	JORGE GARCIA		06/12/2024	HOJA 3	DE 4	NOMBRE DE PIEZA:	
NOTAS: - Existe simetría a lo largo del eje de corte C-C. - Todos los redondeos que se observan en el detalle D son de radio de 1mm. - Se tiene un espesor de pared para el proceso de impresión de 3mm.						SCARF MACHO	



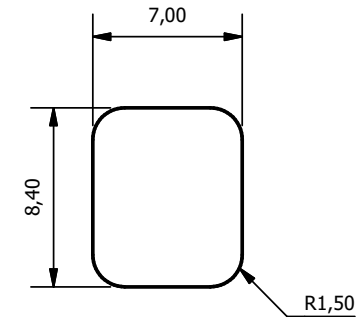
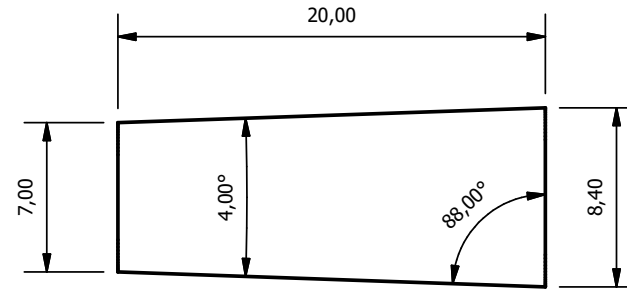
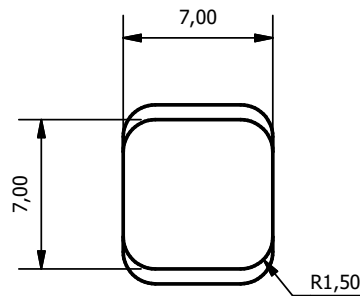
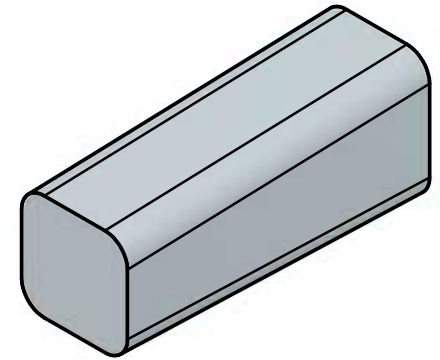
EMPRESA:				Se debe tener en cuenta las especificaciones de la impresora 3D para su modelado CAD Si no se indica lo contrario: -Las cotas se expresan en mm.		TITULO: EMPALME JAPONÉS SCARF APLICADO A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
							
COD PROYECTO: TS-002				MATERIAL: Plástico PLA		PROYECTO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA				
DIBUJO	DYLAN GARCIA		05/12/2024	HOJA A4 ESCALA: 3 : 1 		NOMBRE DE PIEZA: PIN DE AJUSTE SCARF	
DISEÑO	RICARDO VARGAS		05/12/2024				
APROBO	JORGE GARCIA		06/12/2024	HOJA 4 DE 4			
NOTAS: - Todos los redondeos que se observan son de 1mm. - Se tiene un espesor de pared para el proceso de impresión de 3mm.							



EMPRESA:  INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD DEL SAZUAY				Se debe tener en cuenta las especificaciones de la impresora 3D para su modelado CAD Si no se indica lo contrario: -Las cotas se expresan en mm.		TITULO: EMPALME COMBINADO APLICADO A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
COD PROYECTO: TS-002							
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	MATERIAL:		PROYECTO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
DIBUJO	DYLAN GARCIA		05/12/2024				
DISEÑO	RICARDO VARGAS		05/12/2024	HOJA A4	ESCALA: 1 : 1		
APROBO	JORGE GARCIA		06/12/2024	HOJA 1	DE 4		
NOTAS: - Se tiene un espesor de pared para el proceso de impresión de 3mm.						NOMBRE DE PIEZA: EMPALME COMBINADO	



EMPRESA:  INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD DE COLOMBIA UNIVERSITY OF COLOMBIA				Se debe tener en cuenta las especificaciones de la impresora 3D para su modelado CAD Si no se indica lo contrario: -Las cotas se expresan en mm.				TITULO: EMPALME COMBINADO APLICADO A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
COD PROYECTO: TS-002				MATERIAL: Plástico PLA				PROYECTO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR FDM	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA						
DIBUJO	DYLAN GARCIA		05/12/2024	HOJA A4	ESCALA: 1 : 1				
DISEÑO	RICARDO VARGAS		05/12/2024	HOJA 3	DE 4				
APROBO	JORGE GARCIA		06/12/2024	NOTAS: - Todos los redondeos que se observan en el detalle D son de 1mm a menos que se indique lo contrario. - Se tiene un espesor de pared para el proceso de impresión de 3mm.				NOMBRE DE PIEZA: COMBINADO MACHO	



EMPRESA:				 INGENIERÍA MECÁNICA UNIVERSIDAD DEL CAJAMARCA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA		Se debe tener en cuenta las especificaciones de la impresora 3D para su modelado CAD Si no se indica lo contrario: -Las cotas se expresan en mm.		TITULO:			
COD PROYECTO: TS-002								EMPALME COMBINADO APLICADO A IMPRESIÓN 3D POR FDM			
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	MATERIAL:		PROYECTO:					
DIBUJO	DYLAN GARCIA		05/12/2024	Plástico PLA		EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE EMPALMES JAPONESES UTILIZADOS EN CARPINTERÍA APLICADOS A IMPRESIÓN 3D POR FDM					
DISEÑO	RICARDO VARGAS		05/12/2024	HOJA A4	ESCALA: 3 : 1			NOMBRE DE PIEZA:			
APROBO	JORGE GARCIA		06/12/2024	HOJA 4	DE 4						
NOTAS: - Todos los redondeos que se observan son de 1,50mm. - Se tiene un espesor de pared para el proceso de impresión de 3mm.										Pin de Ajuste Combinado	