

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



**Análisis computacional y experimental sobre el
comportamiento mecánico de las juntas no
convencionales en los perfiles de aluminio estructural
V-Slot**

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería
Mecánica que presenta:

Victor Armando La Rosa Rojas

Asesor:

Jorge Hernan Alencastre Miranda

Lima, 2023


Informe de Similitud

Yo, **Jorge Hernan Alencastre Miranda**, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulado **“Análisis computacional y experimental sobre el comportamiento mecánico de las juntas no convencionales en los perfiles de aluminio estructural V-Slot”**, del autor **Victor Armando La Rosa Rojas**, dejó constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 8%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 15/01/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

San Miguel 15 de enero de 2024

Apellidos y nombres del asesor: Alencastre Miranda, Jorge Hernán	
DNI: 10588073	Firma 
ORCID: 0000-0001-8442-8255	

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a mis queridos padres Luis La Rosa Jiménez y María Rojas Maravi, y a mis hermanos por la constante motivación e inspiración para poder finalizar esta tesis.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer en primer lugar a dios y a mi familia, quienes me brindaron su apoyo incondicional, motivación y empuje constante para poder finiquitar esta etapa.

Agradecer al Dr. Jorge Alencastre Miranda, por el apoyo, comprensión, impulso constante y consejos durante la realización de este trabajo, que fueron valioso para poder finiquitar esta investigación. Como también, agradecer al director de la maestría en Ingeniería Mecánica Dr. Jorge Rodríguez Hernández cuyo apoyo fue fundamental para poder desarrollar las pruebas experimentales, sin ello no hubiera sido posible finalizar esta investigación.

Me gustaría expresar mis agradecimientos al jefe del laboratorio de materiales Dr. Jose Sakihama, al especialista Ing. Carlos Juárez y al especialista del Laboratorio de Ingeniería y Patrimonio Ing. Mauricio Gonzales, sin ellos no hubiera sido posible finalizar la parte experimental de esta tesis.

RESUMEN

Los perfiles de aluminio estructural son normalmente obtenidos a partir de la extrusión, mediante este proceso se puede obtener distintas formas geométricas en la sección transversal del perfil, esto conlleva a que se desarrollen nuevas soluciones de juntas, que estén de acuerdo a los requerimientos de diseño. Es por ello que, el cumplimiento de las distintas solicitudes de diseño dependerá en gran medida de los distintos tipos de conexiones para unir estos tipos de perfiles. Dentro de este gran grupo se encuentran las juntas no convencionales, uno de estos casos es la junta tipo escuadra, que permite la sujeción de perfiles de aluminio en ángulos de 90 grados. Asimismo, permite el manejo y desmontaje sencillo de toda la estructura, sin recurrir al mecanizado, facilitando al operario poder reutilizar el perfil y la junta. Podemos encontrar, que este tipo de junta se utiliza en diferentes aplicaciones, tal como, en robots cartesianos, estructura de impresoras 3D, etc. Donde requieren soportar cargas medias bajas a altas. Sin embargo, la acción de dichas fuerzas sobre la unión no convencional requiere de cálculo y verificación de diseño. Pero, existe muy poca investigación disponible y los principales códigos estructurales (Eurocódigo 9) no proporcionan reglas definidas de diseño. Para evaluar el comportamiento mecánico de la junta y la influencia de estos sobre los perfiles de aluminio, se han desarrollado ensayos experimentales, cálculo teórico y análisis computacional.

Las pruebas experimentales se desarrollaron en la universidad (PUCP). Estas, fueron sometidas a tracción y se verificó que lo primero que fallaba eran las tuercas cabeza de martillo, mas no el bracket, quien es la parte principal de la junta no convencional. Como consecuencia, el perfil horizontal se deflectaba en un aproximado de 2% respecto a la longitud efectiva de la viga. Asimismo, la fuerza máxima que soporta las aletas (canal) del perfil era casi 4 veces mayor a lo considerado por el fabricante. En general, todos los resultados obtenidos en la parte experimental, sirvieron para poder calibrar el modelo computacional, cuyos resultados fueron los esperados, con un margen de error de $\pm 9\%$. Finalmente, esta investigación ayudaría a suplir la falta de información. Como también, serviría para el diseño de estas juntas, tomando en cuenta los resultados obtenidos.

ÍNDICE GENERAL

Carátula	I
Informe de similitud	II
Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
Resumen	V
Índice general	VI
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación.....	2
1.2 Objetivos de la tesis	2
1.3 Metodología	3
2 GENERALIDADES DEL ALUMINIO ESTRUCTURAL	4
2.1 Proceso de extrusión.....	4
2.1.1 Parámetros importantes en la extrusión	5
2.1.2 Defectos en el proceso de extrusión.....	6
2.2 Aleaciones de aluminio	7
3 JUNTAS O UNIONES EN PERFILES DE ALUMINIO	10
3.1 Uniones tradicionales.....	10
3.1.1 Unión soldada.....	10
3.1.2 Unión remachada	11
3.1.3 Unión atornillada.....	11
3.2 Uniones especiales o no convencionales.....	12
3.3 Estado del arte sobre estudios de las uniones no convencionales	19
3.4 Normas y manual de diseño.....	23
4 DESARROLLO TEÓRICO – EXPERIMENTAL	25
4.1 Propiedades estructurales del aluminio.....	25
4.2 Perfil estructural seleccionado	27
4.3 Junta no convencional seleccionado.....	27
4.4 Sistemas de medición y adquisición de data.....	28
4.4.1 Máquina de ensayo	28

4.4.2	Medición por medio de Transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT).....	29
4.4.3	DAQ.....	30
4.5	Desarrollo teórico	31
4.5.1	Modelo conceptual.....	31
4.5.2	Cálculo de la fuerza axial de montaje en los tornillos de la unión .	37
4.6	Ensayos experimentales	39
4.6.1	Pruebas de verificación de deformación.....	40
4.6.2	Pruebas experimentales principales	48
5	SIMULACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL.....	53
5.1	Geometría de la unión no convencional	53
5.1.1	Unión Tipo Escuadra	53
5.2	Descripción y tipo de mallado del modelo computacional	55
5.2.1	Mallado de la Unión Tipo Escuadra	56
5.2.2	Condiciones de contorno y contacto	58
5.3	Parámetros importantes y resultados del modelo computacional	60
5.4	Resultados analítico vs experimental vs computacional.	62
6	CONCLUSIONES.....	67
7	BIBLIOGRAFÍA.....	69

1 INTRODUCCIÓN

Los perfiles de aluminio estructural son normalmente obtenidos a partir de la extrusión, mediante este proceso se puede obtener distintas formas geométricas en la sección transversal del perfil. La diversidad de formas extruidas se debe a diversos factores, ya sea un factor de diseño, estético, facilidad de manejo, etc. Es por ello, que estos tipos de secciones se pueden personalizar de acuerdo a los requerimientos de diseño. Asimismo, para poder suplir las diferentes exigencias, las conexiones para unir los perfiles son de vital importancia, dado que de ello dependerá en gran medida que se cumplan las solicitudes previstas. Los diferentes métodos de unión existentes que se pueden desarrollar para esta función, son las tradicionales y las especiales. Para el primer caso, normalmente se usan la unión soldada, atornillada y remachada. Para el segundo caso, también denominadas juntas no convencionales, son aquellos que en la mayoría de los casos utilizan accesorios de fijación para poder realizar las conexiones y que además poseen elementos que se acoplan a la geometría del perfil extruido, haciendo más sencillo su instalación y desmontaje posterior. Asimismo, una de las principales ventajas de esta conexión radica en la optimización del material base con la consiguiente reducción de costos, facilidad y rapidez de montaje, y reducción de mecanizado.

El uso de la última conexión mencionada, no solo se limita a áreas de construcción, sino también a áreas; tal como, la ferroviaria, automotriz y aeroespacial. Este tipo de junta se emplean principalmente en aplicaciones de cargas medias bajas, en algunos casos para cargas pesadas, como lo son empleados en estructuras para marcos de puertas y pórticos respectivamente. En la actualidad, el uso de estas juntas se ha diversificado, porque son empleados en diversas construcciones (sistemas de soporte fotovoltaico, muebles industriales) y se acoplan a las necesidades del diseñador. La acción de cargas moderadas, altas sobre las uniones requiere de cálculo y verificación de diseño. Sin embargo, existen muy pocas investigaciones disponibles sobre este tema y los principales códigos estructurales no proporcionan reglas claras de diseño. Por lo que la única forma de evaluar la resistencia de la unión es por medio de ensayos experimentales.

Ante la problemática mencionada en el párrafo anterior, se llevará a cabo el análisis computacional y experimental sobre el comportamiento mecánico de las juntas no convencionales en perfiles de aluminio estructural (V-Slot).

1.1 JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se desarrollará para darle sustento analítico, experimental y computacional a las uniones no convencionales sobre los perfiles extruidos de aluminio v-slot, debido a que, en la actualidad existe muy poca investigación sobre este tema. Tal es el caso de la norma principal para cálculo de estructuras de aluminio (Eurocódigo 9), el cual no proporciona alguna regla de diseño para estos tipos de uniones. Es por ello, que se escogió este tema de investigación, dado que existía muy poca información para un tema muy relevante para distintas áreas de ingeniería, puesto a que en la actualidad los perfiles de aluminio en conjunto con estas juntas tienen múltiples aplicaciones y ventajas.

El enfoque de esta investigación está orientado en determinar el comportamiento mecánico de las juntas y la influencia de estos sobre los perfiles de aluminio por medio de ensayos experimentales, calculo teórico y análisis computacional. En esa línea, esta tesis serviría para el diseño de estas juntas, tomando en cuenta los resultados obtenidos y podría formar parte de futuras investigaciones acerca de este tema.

1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS

- **Objetivo general**

Analizar computacional, teórico y experimentalmente el comportamiento mecánico de las juntas no convencionales en los perfiles de aluminio estructural V-Slot.

- **Objetivos específicos**

1. Revisar el estado del arte de la investigación.
2. Seleccionar el perfil de aluminio y unión no convencional a investigar.
3. Ejecutar ensayos de tracción para verificar el comportamiento mecánico de la unión no convencional

4. Calcular analíticamente las deformaciones existentes en la región de la junta, teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la parte experimental.
5. Desarrollar el modelo digital para contrastar los resultados obtenidos en la parte experimental y analítico.
6. Cotejar los resultados experimentales respecto a valores detallados por el fabricante (perfil de aluminio).
7. Ampliar la información y conocimiento sobre el comportamiento mecánico de las juntas no convencionales.

1.3 METODOLOGÍA

Esta investigación se centra en cuatro capítulos principalmente. El primero, describe el proceso de extrusión de los perfiles de aluminio, así como los parámetros, defectos y las distintas aleaciones. Además, se detalla algunos campos principales de aplicación de las estructuras de aluminio. El segundo, se detalla los distintos tipos de unión existentes y se describe las principales propiedades de las juntas no convencionales. Además, se describe el estado del arte, manuales de diseño y normas que abarcan el tema propuesto. El tercero, abarca dos temas importantes que es el análisis teórico y experimental, se desarrolla un modelo conceptual tomando como punto de partida las pruebas experimentales, los cuales servirán para contrastar con lo determinado en la simulación numérica. En la parte experimental se detalla el perfil y la junta no convencional, así como la máquina y equipo de medición usados en este acápite. El cuarto, se describe la fase del análisis numérico, donde se ha desarrollado el modelo y la calibración de la junta tipo escuadra en el entorno del software de elementos finitos ANSYS. Finalmente, se detallan las conclusiones obtenidas de esta tesis.

2 GENERALIDADES DEL ALUMINIO ESTRUCTURAL

El aluminio es uno de los materiales más versátiles y usados en la actualidad, esto dado por sus diferentes usos en la industria (automotriz, aeronáutica, construcción) y por las propiedades mecánicas que posee. Dentro de ellas, se encuentra su alta disponibilidad al reciclaje, resistencia a la corrosión, gran conductividad eléctrica- térmica, bajo coste, peso ligero y alta resistencia. Es por ello, que el aluminio estructural constituye una alternativa concreta a las estructuras fabricadas con acero. Pero, con la ventaja de que se pueda construirse de manera mucho más rápida y sea adaptable a los requerimientos de diseño, y sobre todo con una inversión menor.

Una de las áreas con mayor relevancia en la actualidad, que está usando este tipo de material es el área de infraestructura (construcción). Esto dado que, el aluminio permite simplificar y agilizar el proceso constructivo, lo que lo hace más rentable en comparación al acero. Asimismo, lo mencionado se puede constatar en las diversas construcciones alrededor del mundo que han utilizado dicho metal. Por ejemplo, se tiene al Ferrari World cuya cubierta está compuesta por aluminio. Asimismo, se tiene al St. Mary Axe, Torre del banco de China, la Torre GT Este de Corea del Sur, son algunas construcciones modernas que fueron posibles gracias al uso del material en estudio.

2.1 PROCESO DE EXTRUSIÓN

Los perfiles de aluminio son el resultado de un proceso de extrusión, cuya definición se base principalmente en empujar a alta presión el metal, a través de una matriz para luego poder moldearlo en un diseño específico. Asimismo, los elementos básicos para este proceso es el propio material (aluminio), la matriz, la prensa y los parámetros de extrusión. El primer elemento, se ha definido líneas arriba, sobre el tipo de perfil que se usa para desarrollar este proceso. El segundo elemento, está fabricada en acero que resiste altas temperaturas y es la responsable de dar forma a los perfiles. El tercer elemento, es la que se encarga de aplicar la presión necesaria para que el metal pueda ser extruido. El cuarto elemento, es aquel que se encarga de controlar y mantener una temperatura adecuada para que así se logre tener las propiedades mecánicas deseadas en las diferentes aleaciones que pueda tener el perfil extruido.

Los perfiles estructurales poseen una amplia variedad de formas de sección transversal que son obtenidas a partir de este proceso. En otras palabras, el proceso de extrusión nos “permite producir formas personalizadas individualmente, que pueden optimizar y racionalizar la geometría de la sección transversal de acuerdo con los requisitos de diseño”[1].

2.1.1 Parámetros importantes en la extrusión

La velocidad de extrusión es una variable esencial y sumamente importante, para poder llevar a cabo diferentes procesos de extrusión en caliente. Este “parámetro juega un rol importante en el control del defecto térmico, la uniformidad del flujo de metal, el comportamiento mecánico y la calidad de la superficie de los perfiles”[2]. Asimismo, a una velocidad baja se reduce la productividad e incrementa la presión a medida que recorre el vástago por la disminución de la temperatura en el tocho (palanquilla) y caso contrario a altas velocidades puede causar sobrecalentamiento de la palanquilla, también puede provocar la no uniformidad en el flujo de metal saliente del proceso (extrusión), lo que conduce a defectos; tal como, deformación por torsión, grietas superficiales de los perfiles extruidos.

La temperatura es un parámetro sumamente importante, dado que afecta directamente las propiedades mecánicas de los materiales, en este caso la del aluminio. Generalmente en los metales, al aumentar la temperatura disminuye su resistencia mecánica y aumentan tanto la ductilidad como la tenacidad.

Como sabemos de ambos parámetros, tanto de la velocidad como de la temperatura, es preciso mencionar que, si la velocidad de extrusión es alta y no se consigue la temperatura ideal, se debe aumentar el precalentamiento del tocho. En la tabla 2.1 se puede precisar las velocidad y temperatura ideal para los diferentes perfiles a desarrollar.

Tabla 2.1: Velocidad-Temperatura para los diferentes perfiles extruidos. Fuente:[3]

	Temperatura (Tocho)	Velocidad (vástago)
Perfiles macizos	420-470 °C	20-40 m/min
Perfiles huecos	470-510 °C	18-30 m/min
Aleaciones duras (6082)	420-530 °C	2-20 m/min

Otro parámetro de igual importancia que los anteriores es la lubricación, esto para disminuir la fricción entre el material de la preforma, la matriz y el contenedor. Asimismo, el uso del lubricante apropiado permitirá que el material extruido pueda fluir y que la fuerza necesaria a lo largo del proceso disminuya considerablemente.

2.1.2 Defectos en el proceso de extrusión

El proceso de extrusión posee distintos parámetros que pueden ser medidos y controlados, tal es el caso de los mencionados anteriormente (velocidad, temperatura, lubricación) y aquellos que no se pueden realizar dichas acciones. Es por esto último que el producto final es afectado por estas variables, y esto se puede ver reflejado en los defectos aparentes en la superficie del material extruido. Existen una variedad de estos desperfectos que son las ampollas, líneas de soldadura, líneas negras, arañazos. El primer caso, es el “resultado del atascamiento de aire, contaminantes o lubricante debajo de la superficie y cuando la temperatura aumenta localmente (por la fricción), el gas se expande y forma una ampolla”[4]. El segundo caso, aparece cuando se detiene la operación de prensado y cuando se inserta una nueva palanquilla en la prensa, en esto las distintas fuerzas actuantes se liberan de la herramienta y su deformación elástica se revierte. Esto “genera un deslizamiento entre la herramienta y la pieza de trabajo (material de aluminio) que finalmente da como resultado una marca de derrape”[5]. El tercer caso, se genera cuando no hay un adecuado transporte o manejo en las cintas transportadoras. Estos defectos se pueden apreciar en la figura 2.1.

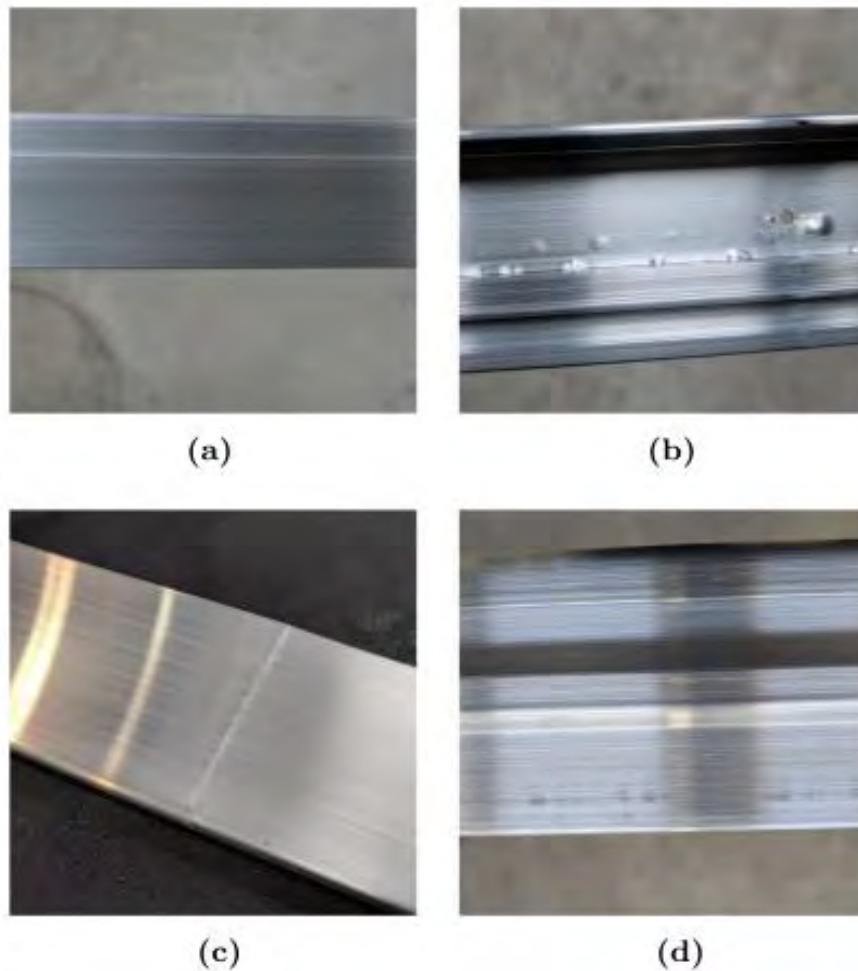


Figura 2.1: Defectos superficiales post-extrusión. Fuente:[5]

En la figura anterior, se puede apreciar un perfil sin ningún defecto superficial (a). Caso contrario, el resto de las imágenes si se puede apreciar los defectos con ampolla (b), defecto con derrape (c) y finalmente con rayones (d).

2.2 ALEACIONES DE ALUMINIO

las aleaciones de aluminio son amalgamas con diferentes metales existentes, que se forman generalmente mediante el proceso de extrusión. Asimismo, se combina con distintos metales con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas. La aleación principalmente, se hace con los siguientes metales; tal como, el aluminio, cobre, silicio, cinc, magnesio y manganeso. Asimismo, se hacen aleaciones secundarias, con menor uso comerciales, ya sea el caso de los metales como el titanio, hierro, níquel, cromo y cobalto. Además, estas aleaciones están divididas en dos; las forjadas y fundidas. El primero, son aquellas moldeadas por medio de golpe dentro de una cavidad o extruidas a

través de un molde y presentan propiedades más uniformes, y mejor ductilidad. El segundo, aquí se “vierte el material (aluminio) en moldes para obtener una forma determinada y como resultado poseen una mayor variación en sus propiedades y son menos dúctiles”[6].

Actualmente las aleaciones de aluminio se dividen en ocho series que dependen de su composición química. Los elementos estructurales están formados por aleaciones que pueden asociarse a las series 5xxx, 6xxx y 7xxx, en donde “los componentes de importancia son los elementos de las aleaciones principales mencionados anteriormente y con la combinación de estos proporcionan un equilibrio entre resistencia (mecánica), resistencia a la corrosión, soldabilidad y extrusión”[7].

Según Ayala[6]:

La serie 5XXX: se produce añadiendo magnesio, cuyo resultado favorece el endurecimiento de la aleación. En esta serie poseen buenas características de soldabilidad, alta resistencia y buena resistencia a la corrosión en atmosferas marinas.

La serie 6XXX: Es aquella aleación que contiene silicio y magnesio que proporciones adecuadas general siliciuro de magnesio, que la hacen térmicamente tratable. Dentro de este grupo se caracteriza la aleación 6061, que posee una resistencia media y buena soldabilidad. Esta serie son las más fáciles de extruir y son ampliamente usados en edificios y distintas aplicaciones estructurales.

La serie 7XXX: Contiene al zinc como elemento primario, que cuando se combina con pequeñas proporciones de magnesio, se obtiene una aleación que es térmicamente tratable y posee alta resistencia. Pero, una de sus desventajas es que tiene poca resistencia a la corrosión.

Las series mencionadas anteriormente son aquellas que principalmente se usan para aplicaciones estructurales que es lo fundamental para esta investigación. En la tabla 2.2, se describe las designaciones numéricas (series) para las aleaciones, en esta se puede apreciar las propiedades de cada una y así también los componentes existentes en cada serie y en que campos de la industria son

indispensable estas aleaciones. Asimismo, las letras WH y HT significan por sus siglas en ingles aleaciones endurecible por trabajo y aleaciones tratables térmicamente respectivamente.

Tabla 2.2: Designación numérica para aleaciones forjadas. Fuente:[1]

Series	Elemento de aleación		Propiedades	Campo de aplicación
1XXX	99% Aluminio	WH	Baja resistencia, muy alta ductilidad, muy alta resistencia a la corrosión.	Tanques, techo, paneles.
2XXX	Cobre	HT	Alta resistencia, buena ductilidad, baja resistencia a la corrosión, mala soldabilidad.	Aplicaciones aeronáutico.
3XXX	Manganeso	WH	Resistencia media-baja, alta ductilidad, alta resistencia a la corrosión, mala soldabilidad.	Paneles, sistemas de techos.
4XXX	Silicio	HT	Similar a la serie 3XXX.	No se usa con frecuencia, alambres de soldadura.
5XXX	Magnesio	WH	Alta resistencia, buena ductilidad, muy alta resistencia a la corrosión, buena soldabilidad.	Usado en la marina y aplicaciones en ambientes agresivos.
6XXX	Magnesio y silicio	HT	Buena fuerza, buena ductilidad, buena resistencia a la corrosión, buena soldabilidad.	Estructuras extruidas.
7XXX	Zinc	HT	Muy alta resistencia.	Militar o aplicaciones especializadas
8XXX	otro	HT	Depende de la aleación	

3 JUNTAS O UNIONES EN PERFILES DE ALUMINIO

Las juntas o uniones permiten enlazar diferentes formas de perfiles, es decir, nos permiten juntar dos componentes de resistencia con el objetivo de transmitir una carga elevada de uno a otro. Esto, depende netamente de la actividad o para que fue diseñado. Asimismo, representan un punto importante y muy crítico para el diseño de distintas configuraciones de estructuras. La confiabilidad en las uniones es netamente dependiente del análisis estructural y cálculos de diseño que posteriormente servirá para poder seleccionar el tipo de junta a utilizar.

En el ámbito económico, estas uniones influyen también en el costo general del desarrollo estructural. Pero puede compensar con las siguientes características; tal como, “la facilidad y rapidez de montaje y reproducibilidad implican ventajas económicas que a lo largo pueden equiparar los costes con otros diseños”[1]. Además, poseen características como la capacidad de desmontaje, la durabilidad y la estética.

Las uniones para los perfiles estructurales de aluminio, actualmente existen una gran cantidad de técnicas de unión que son capaces de cumplir con los requisitos estructurales y no estructurales. Dentro de ello, podemos encontrar las uniones tradicionales y especiales (no convencionales). Este último caso, son para aquellos perfiles extruidos, con diferentes secciones transversales.

3.1 UNIONES TRADICIONALES

Las uniones tradicionales de perfiles de aluminio se clasifican en rígidas y móviles. Dentro del primer grupo se encuentra la unión fija o soldada. Asimismo, se encuentran las uniones desmontables; tal es el caso de la unión atornillada, unión con remache, roblones. Para el segundo grupo, se encuentran las uniones giratorias, deslizantes y flexibles. Consecuentemente, las conexiones mecánicas desmontables son usadas frecuentemente en este tipo de uniones de perfiles de aluminio que en acero.

3.1.1 Unión soldada

La unión soldada consiste en unir dos componentes metálicos fundiéndolos entre sí. El aluminio requiere experiencia y precisión para poder hacer dicha acción, para ello es necesario contar con el equipo y herramientas adecuadas. La

soldadura de aleaciones de aluminio es importante para fabricar construcciones estructurales y fabricaciones mecánicas. Sin embargo, la soldadura tiene problemas y puede ser un desafío. Ante ello se tiene en cuenta, distintas consideraciones relacionadas de la superficie a soldar, “una superficie limpia, lisa y protegida es importante en las estructuras de aluminio presoldadas para garantizar buena soldadura, excepto en los procesos de soldadura de alta densidad de energía como la soldadura de haz laser híbrido (LBW)”[8]. Por esto, es importante comprender los diferentes fenómenos relacionados con la superficie y su efecto sobre la soldadura en los perfiles.

3.1.2 Unión remachada

Las uniones remachadas son empleadas para unir de forma permanente diferentes elementos, ya sean perfiles, planchas, etc. Este tipo de fijación se realiza colocando las piezas a juntar en posición de montaje, para esto se tiene que hacer coincidir los agujeros de ambas partes que posteriormente serán unidas por el remache. Este tipo de unión consta de tres partes principales, el cuerpo de forma cilíndrica o vástago, cabeza y el mandril. El primero, es la parte que queda atrapada entre las piezas unidas. El segundo, a menudo tiene una forma de casquete esférico, cuyo diámetro es mayor al cuerpo del remache. El tercero, es la parte más larga y central del remache, por donde se sujetará la remachadora y ejecutará la acción de unión. Las dos primeras partes, poseen diferente material, debido a que “el cuerpo del remache debe de ser lo suficientemente dúctil para deformarse y formar la cabeza, y el vástago lo suficientemente rígido para poder deformar el cuerpo” [6].

3.1.3 Unión atornillada

Las uniones atornilladas son usadas ampliamente en estructuras de ingeniería moderna, diseño de máquinas, elementos estructurales. Esto debido a su bajo costo, confiabilidad y facilidad de montaje y desmontaje. Asimismo, esta unión “es un elemento cilíndrico o cónico roscado en su superficie. Esto último, se entiende por la entalladura o resalte de la geometría particular que sigue una trayectoria helicoidal sobre una superficie cilíndrica, que puede tener distintas configuraciones como cuadrada, trapezoidal, diente sierra o redonda”[9].

3.2 UNIONES ESPECIALES O NO CONVENCIONALES

Las formas extruidas poseen distintas configuraciones (geometría) respecto de los perfiles tradicionales, ante ello se utilizan uniones sin ningún tipo de sujeción o fijación. Estos son denominados generalmente, juntas especiales o juntas no convencionales para extrusión de aluminio, estas " representan una solución muy competitiva respecto a los sistemas de unión tradicional, gracias a la facilidad y rápida ejecución, reducción de tratamientos y mecanizado"[10]. Una de las principales ventajas de este tipo de unión, es la reducción de elementos de unión adicionales como ángulos, cartelas, que a lo largo se reduce en los costes de fabricación y ejecución. En la figura 3.1, se puede apreciar la unión perno canal.

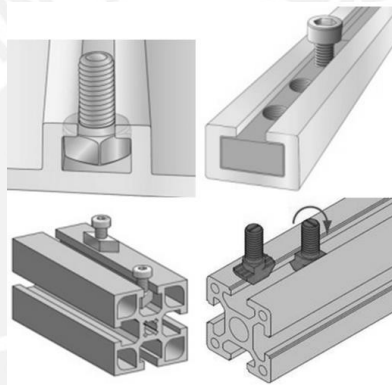


Figura 3.1: Unión perno-canal. Fuente:[11]

Estos tipos de juntas que se muestra en la figura superior se usan en los perfiles con ranuras en T. " Esta unión permite colocar los tornillos en cualquier lugar a lo largo del perfil si ningún tipo de mecanizado, con la posibilidad de reubicar fácilmente la cabeza del tornillo a lo largo de la pista" [11].

Otro tipo de junta son las uniones para puertos atornillados (screw ports), son usados para unir perfiles de aluminio para diferentes aplicaciones estructurales. "el puerto o ranura del tornillo se pueden roscar mediante mecanizado, cuando se utilizan tornillos métricos, incluso si la solución más común está representada por tornillo autorroscante"[10]. Este tipo de unión puede tener diferentes configuraciones tal como se muestra en la figura 3.2.

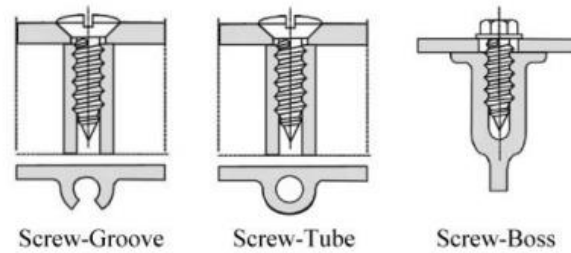


Figura 3.2: Configuraciones de la unión para puertos atornillados. Fuente:[10]

por otro lado, se tiene las juntas a presión (snap-flit joint) entre perfiles de aluminio, la elasticidad de este material es muy adecuada para el ajuste a presión. En comparación a las uniones tradicionales, este tipo de junta da un montaje mucho más rápido. Sin embargo, una de sus desventajas principales, es la dificultad de separación. Este tipo de unión se muestra en la figura 3.3.

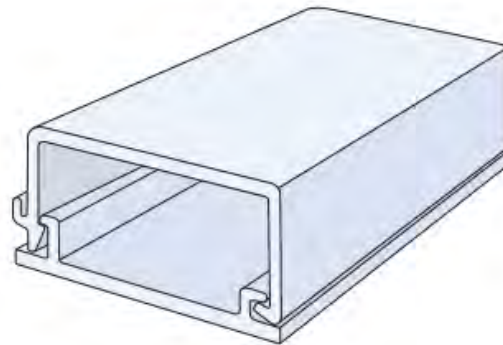


Figura 3.3: Junta a presión. Fuente:[12]

Las juntas o uniones de perfil a perfil (jointing profile to profile) son uniones que se realizan entre perfiles, que contienen distintas configuraciones para que puedan encajar o acoplarse una con otra. Asimismo, estas uniones pueden usar uniones roscadas longitudinales, esto para fijar el eje por donde se desliza. Por otro lado, dentro de estas uniones se tiene la junta telescópica, que cuenta con ajuste de altura continua mediante una tuerca que corre libremente en su pista y al apretar los sujetadores, se bloquea la altura y elimina algún deslizamiento. Lo descrito se puede apreciar en la figura 3.4.

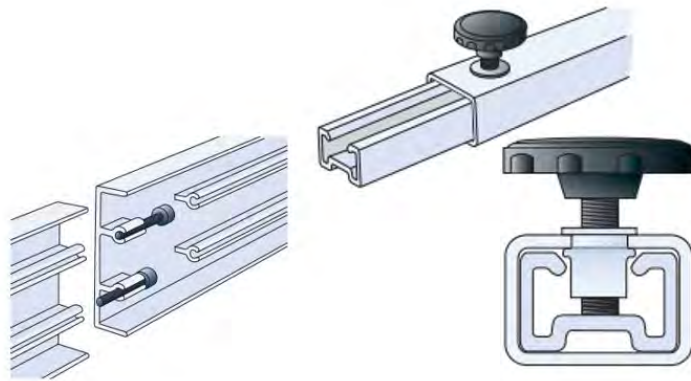


Figura 3.4: Junta de perfil a perfil mediante unión atornillada(izquierda)-Junta longitudinal telescópica (derecha). Fuente:[12]

De las uniones descritas anteriormente, se generan distintas configuraciones que permiten asociar perfiles de distintas formas de extrusión y poder tener uniones en forma de T o uniones de esquinas. Para lograr estas asociaciones, se tienen en cuenta o se incluyen las otras juntas inicialmente presentadas.

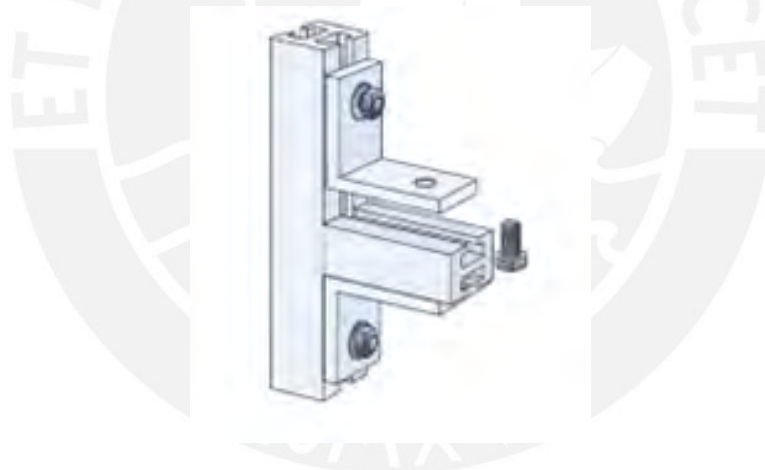


Figura 3.5: Unión en forma de T. Fuente:[12]

Como se puede apreciar en la figura 3.5, se realiza la unión de perfil a perfil en forma de T, con la ayuda de las juntas perno-canal, junta con puertos atornillados y otras juntas más, generando así una sinergia con las diferentes configuraciones y uniones existentes.

En la figura 3.6, lado derecho se puede apreciar la junta no convencional denominado unión de travesaño interno doble. Asimismo, en el lado izquierdo se puede apreciar la conexión, para ello se tiene que tener en cuenta que el perfil central deber estar roscado o en todo caso se tiene que mecanizar y es donde

se introducirá el tornillo central de la junta. Además, se podrá deslizar toda la unión por el canal del otro perfil (horizontal) que finalmente se fijará apretando los prisioneros en los extremos.

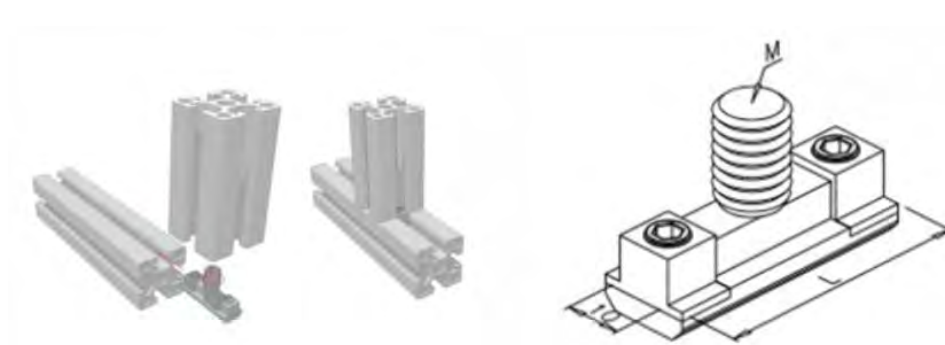


Figura 3.6: Unión travesaño interno doble. Fuente:[13]

La junta no convencional denominado escuadra interior (delantero/trasero), son aquellos que se fijan internamente al canal del perfil mediante prisioneros, permitiendo la sujeción de los perfiles a unir, ya sea en distintas configuraciones; tal como, la forma en T o hacer la junta en esquineros. Este elemento se puede apreciar al lado derecho de la figura 3.7. Asimismo, se puede apreciar al lado izquierdo como se realiza la instalación.



Figura 3.7: Escuadra interior (trasero/delantero). Fuente:[13]

Otro elemento es la unión travesaño interno (doble sencillo), este tipo de sujeción que tiene forma de una U, para esto posee dos laterales que por donde se introducirán los prisioneros para poder sujetar al perfil vertical, esto se dará al interior del canal. Asimismo, en el perfil horizontal se introduce la base de la unión, para luego sujetarlo mediante un prisionero a la base del perfil vertical. Esta configuración se da en forma de T y se muestra en la figura 3.8.

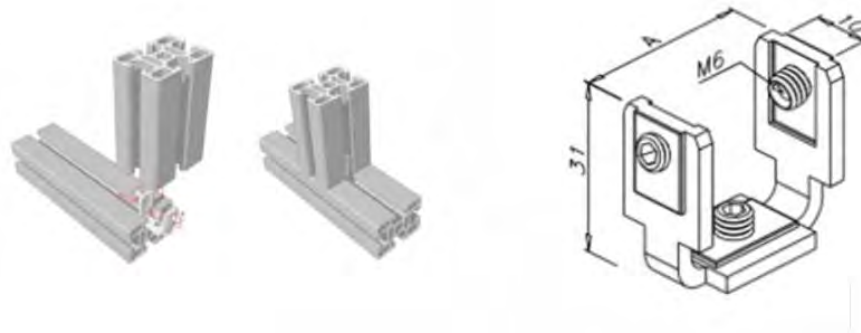


Figura 3.8: Unión travesaño interno doble. Fuente:[13]

La junta no convencional estándar, son básicos para la unir perfiles en ángulo recto, ya sea en esquinero o en T. Asimismo, la placa intermedia presente en esta junta, distribuye las tensiones para ofrecer un apriete en toda su superficie y su geometría permite resistir a la torsión. Para desarrollar el montaje, se tiene que mecanizar una rosca en el perfil vertical y taladrar un orificio en el perfil horizontal para poder generar el apriete con una llave Allen y así tener la unión de ambos perfiles. Lo mencionado se puede apreciar en la figura 3.9.



Figura 3.9: Unión estándar. Fuente:[14]

Los elementos para las uniones bajo presión son especialmente desarrollados para aplicaciones pesadas. En la figura 3.10 se puede apreciar que la junta se puede deslizar a través del canal y en sus extremos existe una unión atornillada que genera la presión entre ambos perfiles. En este tipo de unión no es necesario ningún tipo de mecanizado para los perfiles actuantes.

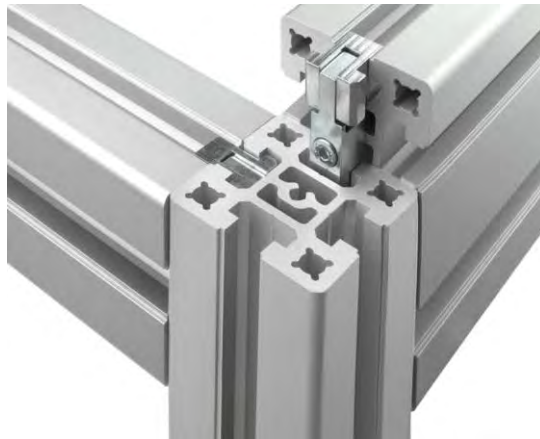


Figura 3.10: Unión por presión. Fuente:[15]

Siguiendo con los las uniones especiales para conexiones internas, se tiene a la unión automática que necesita ser mecanizado. Asimismo, estas uniones pueden soportar cargas más elevadas, posee gran resistencia al desplazamiento, torsión y flexión. Esta junta, poseen un cuerpo fileteado o roscado que será instalado en el canal de la guía, una vez fijado en dicho lugar, en el perfil perpendicular a este perfil, pasará una tuerca cabeza de tornillo que se fijará a un tornillo que pasará por el interior del cuerpo roscado que se encuentra montado en la ranura del perfil. Lo descrito anteriormente se podrá observar en la figura 3.11.

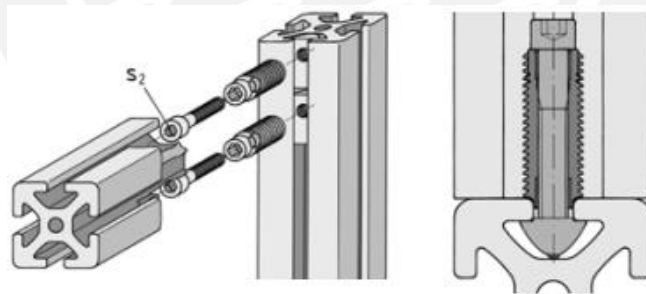


Figura 3.11: Unión automática. Fuente:[16]

Otro caso se tiene a las uniones universales de acero inoxidable, estos son muy resistentes a altas fuerzas, cambios bruscos de temperatura y vibraciones. Estas juntas están anclados a un perfil, para ello se tiene que mecanizar el perfil (para este caso el perfil horizontal), mientras el segundo perfil (vertical) se puede desplazar (por medio del canal) al punto que se desee la conexión. Este tipo de conexión se puede utilizar para ambas caras laterales del perfil horizontal y así

generar un unión más compacta y robusta con el perfil vertical. Lo descrito anteriormente se puede apreciar en la figura 3.12.

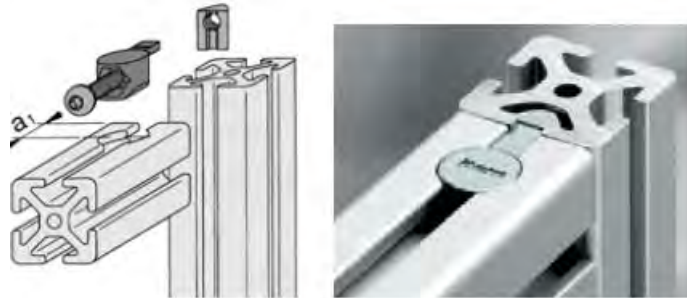


Figura 3.12: Elemento de unión universal. Fuente:[16]

Otro tipo de elemento de unión son las escuadras, cuya función principal son las conexiones a 90 grados. Ante ello se tiene a las escuadras de aluminio extruido, estos pueden tener distintas dimensiones que son adaptables a las dimensiones de los perfiles extruidos. Este tipo de junta, se realiza con la ayuda de pernos cabeza de martillo que se acopla al canal de los perfiles, la cantidad de estos tornillos, se deberá básicamente a los canales presentes en los perfiles y el tipo de escuadra seleccionada. Todo lo mencionado se podrá observar en la figura 3.13. Asimismo, este tipo de uniones son principalmente usadas para la estructura principal de las impresoras 3D.

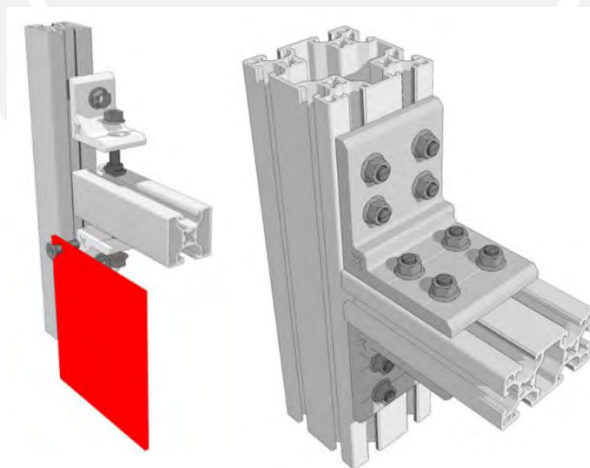


Figura 3.13: Unión mediante escuadras. Fuente:[13]

Si bien los campos de aplicación de los sistemas de juntas especiales son muy amplios, que no solo se limitan al campo de la construcción, sino también a las áreas automotriz, ferroviaria, espacial, etc. Existe poca literatura disponible al respecto del tema tratado y “los códigos estructurales del aluminio no

proporcionan especificaciones, tal es el caso del Eurocódigo 9, que no proporciona reglas claras de diseño” [11]. Es por ello que se procede a métodos experimentales para poder determinar y evaluar la resistencia de la unión.

3.3 ESTADO DEL ARTE SOBRE ESTUDIOS DE LAS UNIONES NO CONVENCIONALES

En esta sección se encontrarán todas las investigaciones realizadas acerca del tema propuesto. Para ello se tomará en cuenta en particular a las juntas especiales o no convencionales. En la actualidad, su uso se ha extendido en las diversas industrias que han utilizado los perfiles de aluminio, con fines estructurales. Pero, ante su gran demanda, se dispone de muy poca información sobre el comportamiento mecánico de estas. Ante lo mencionado, se detallará líneas debajo, todos los estudios que cubren este tema de investigación.

Fiorino, Macilo[11]:

Llevo a cabo diversos experimentos para poder evaluar el comportamiento estructural de las uniones perno-canal, para ello ha considerado tomar dos secciones transversales con diferentes diámetros de perno.

El objetivo principal de esta investigación fue definir los principales problemas relacionados con la geometría de la unión, la influencia del tipo de carga y la respuesta estructural de la unión. Consecuentemente, la experimentación se centró en la configuración de cómo se colocaba la cabeza del perno en el canal del perfil de aluminio. Por ello, se seleccionaron dos canales de aluminio extruido AW 6005A-T6, que son adecuados para diámetros de los tornillos M10 y M8, cuyo material fue de acero de grado 8.8 y las tuercas hechas de acero S35 (platina ubicada en el canal). Asimismo, para que se tenga en cuenta las posibles condiciones de carga que puedan darse en las diferentes aplicaciones de este tipo de unión, se considerara tres direcciones de carga diferentes, tal como se puede apreciar en la figura 20. La primera dirección, consiste en una fuerza paralela al canal del perfil que induce un deslizamiento del conjunto perno-tuerca a través del canal mismo. La segunda dirección, es una fuerza transversal perpendicular al eje del canal, que pone la tuerca de la placa en contacto con el alma del canal. La tercera dirección, consiste en una fuerza de tensión o extracción que tiende a sacar la tuerca de la placa del canal de aluminio. En general, se hicieron 26 pruebas, de estos 14 fueron para la primera dirección de

carga, 6 para la segunda y 6 para la tercera carga. Luego, se han desarrollado modelos numéricos para las diferentes cargas detalladas anteriormente y que finalmente se compararon con los valores encontrados experimentalmente. El desarrollo experimental se muestra en la figura 3.14.

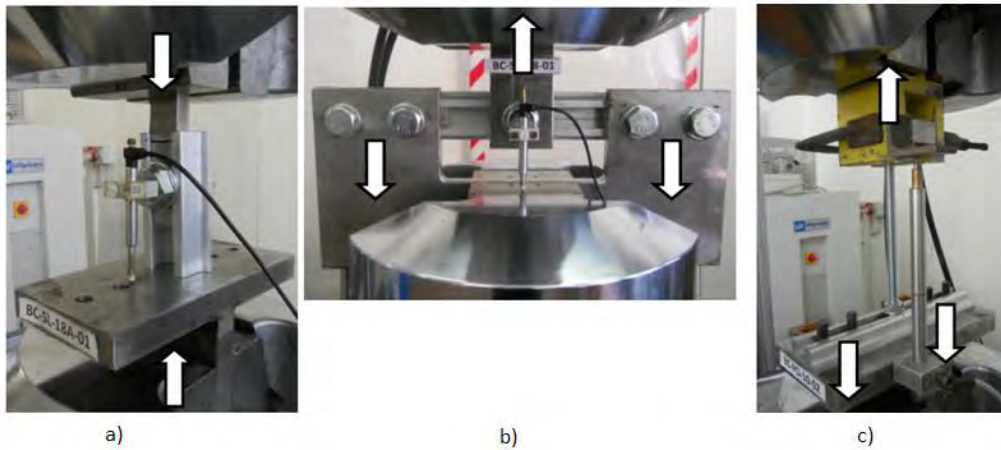


Figura 3.14: Disposición de las cargas para la parte experimental, a) primera dirección de carga (longitudinal), b) segunda dirección de carga(transversal) y c) tercera dirección de carga(extracción).

Fuente:[11]

Macillo, Vincenzo [10]:

Llevaron a cabo diversos estudios experimentales destinados a evaluar la influencia de diferentes parámetros geométricos y mecánicos en el comportamiento de extracción de conexiones roscadas. Asimismo, teniendo en cuenta estos resultados se ha desarrollado y calibrado modelos de elementos finitos no lineales.

El objetivo principal del estudio fue definir los principales aspectos relacionados con la geometría de la unión, la influencia del tipo de carga y principalmente la respuesta estructural de la unión mediante ensayos experimentales. En el desarrollo experimental se investigó el comportamiento de extracción de las juntas SG (configuración Screw-Groove). Este programa tuvo 45 pruebas, de las cuales 13 fueron de la configuración SG, 28 ST (Screw-Tube) y 4 SB(Screw-Boss). Asimismo, las propiedades mecánicas de los materiales utilizados se han definido mediante seis ensayos de tracción sobre aleaciones de aluminio y tres ensayos sobre tornillos autorroscantes. Las probetas se extraen de perfiles extruidos fabricados en aleación AW 6060-T5, AW 6082-T6, AW 6060-T5

respectivamente, para cada configuración mostrada líneas arriba. Asimismo, los diámetros de los tornillos autorroscante varían dependiendo de la configuración en estudio. Para la primera configuración, esto se tomaron 4,8 y 5,5 mm de diámetro para los tornillos. Para la segunda configuración se tomó 5,5 y 6,3 mm de diámetro para el tornillo. Para la tercera configuración, se tomó de 6,3mm de diámetro encajados en un canal de tornillo. Después de la parte experimental, con el fin de proporcionar una herramienta de diseño general, se desarrolló modelos numéricos capaces de predecir la respuesta de las uniones sobre la base de los resultados experimentales. En la figura 3.15, se muestra las configuraciones desarrolladas en la investigación.

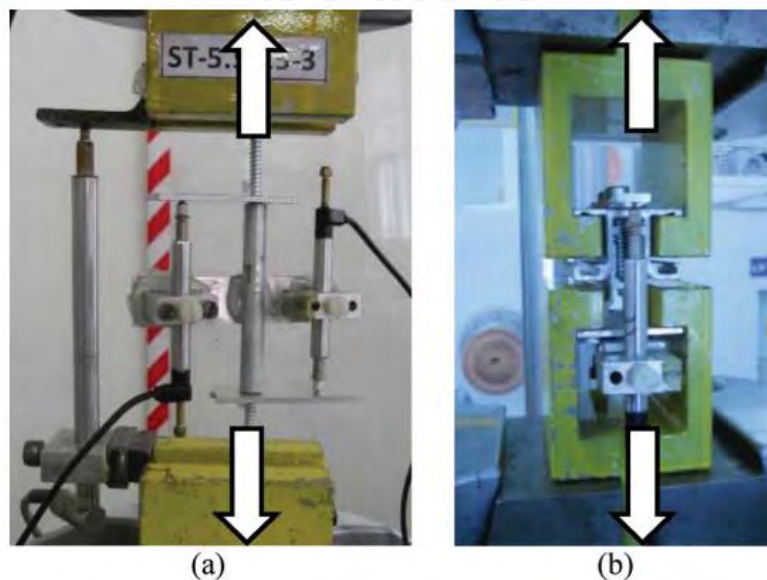


Figura 3.15: Configuraciones desarrolladas en el estudio experimental, caso a) SG, ST y b) SB.

Fuente:[10]

Kissell, Menzemer, Deliwala [18]:

Llevaron a cabo un estudio del comportamiento de extracción de sujetadores autorroscantes en ranuras presentes en extrusiones de aleación de aluminio.

El principal objetivo fue estudiar la influencia de diferentes parámetros que afectan la resistencia de la junta o unión. Para ello, se llevaron 79 pruebas de extracción en 19 configuraciones diferentes de uniones tipo SG (Screw-Groove). Para el caso de los parámetros e investigación fueron seis geometrías diferentes respecto de la ranura del perfil. Asimismo, los perfiles de aluminio fueron de aleación 6063-T5 y 6061-T5, el diámetro del aluminio fue 4.8, 5.5 y 6.3 mm, cuya

longitud de empotramiento fue de 6 a 38mm. Con los resultados obtenidos en la parte experimental, propusieron una formulación de diseño, con el fin de evaluar la resistencia a la extracción. En la figura 3.16 se muestra la configuración de prueba experimental.



Figura 3.16: Configuración de prueba experimental. Fuente:[18]

Holmberg, Joakim [19]:

En esta tesis se desarrolló estudios experimentales para poder determinar el comportamiento estático de uniones perno-canal en las estructuras de aluminio. Para ello se usó dos tipos de juntas y dos casos de carga, que posteriormente sirvieron para crear un modelo teórico. Asimismo, se realizó un análisis dinámico en donde se comparó este último modelo con medidas experimentales. Esta descripción previa, es el objetivo principal de la investigación.

Para la realización de este estudio, se ha tomado en cuenta dos tipos de conexiones canal-perno con distintas geometrías (R120, D90), ambos requieren dos pernos en cada lado, tal como se puede apreciar en la figura 3.17 ítem a. Además, para la unión con los perfiles se utilizó pernos de acero y tuercas de aluminio, de manera que este último permitiese fijar el ala del perfil de aluminio con la junta, que consecuentemente se unirá con el perfil a unir. Por otro lado, una vez encontrado el tipo de junta a realizar, se construyó con vigas en U el equipo de medición. En adición, la carga que se aplicó a los perfiles vertical y horizontal, fueron accionados por un cilindro hidráulico.

Finalmente, los análisis estáticos mostraron que las tasas de elasticidad vertical para ambas conexiones podrían considerarse infinitas. caso contrario, en la

dirección horizontal solo R120 podría considerarse rígido. Consecuentemente el análisis dinámico incluía la verificación experimental en donde se pudo verificar pequeñas discrepancias entre los modelos teóricos y resultados experimentales.

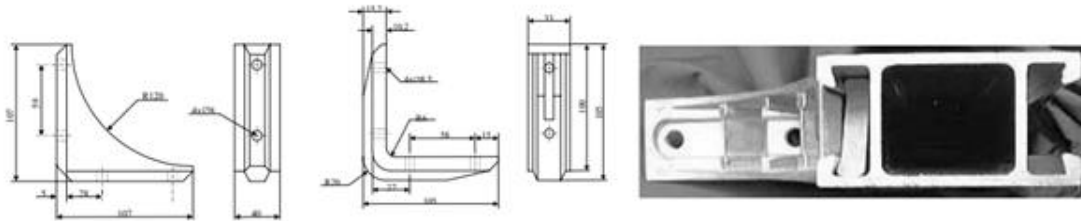


Figura 3. 17: a) Uniones utilizadas, b) Ensamble de la junta no convencional, c) Esquema hidráulico y experimental. Fuente: [19]

3.4 NORMAS Y MANUAL DE DISEÑO

En el primer capítulo del Eurocódigo 9 [20] (EN 1991-1-1), basado en el diseño de estructuras de aluminio en el capítulo 8, diseño de uniones, se puede apreciar que las principales juntas son las tradicionales, tal como, las uniones atornilladas, remachadas y soldadas. En esto, se detallan puntos importantes para el diseño de cada uno de ellos, que posteriormente pueda ser implementado en base a los requerimientos del diseñador, para ello también se describe las distintas cargas que pueden actuar sobre ellos. Dentro de este capítulo, también se puede apreciar una forma más de conexión que no se ha descrito con anterioridad, es la conexión con adhesivos, cuyo principal agente de unión es un adherente, tal es el caso de los adhesivos epóxicos, que reemplazan parcialmente las uniones soldadas. También, están las uniones híbridas que son la mezcla entre las juntas tradicionales con las adhesivas. Asimismo, se detalla otros tipos de unión en el que menciona que las reglas de diseño de estos se dan en EN 1991-1-4[21].

La parte 1.4 de la norma proporciona las reglas para el diseño del sistema de unión típico utilizados en estructuras de paredes delgadas, como tornillos autorroscantes/taladrantes y remaches ciegos. Además, en la parte 1.1 se menciona como único caso de unión especial al método de fijación mecánica tornillo-ranura.

Caso contrario sucede en algunos casos de manuales de diseño (fabricante), este es el caso del manual publicado por Sapa[12] y Hydal[22] . En estos, se puede verificar que poseen la información completa y referencial del material a

trabajar, dentro de ello se encuentra algunas formulaciones de diseño para juntas especiales tornillo-ranura y perno-canal. Así como también, se proponen las dimensiones sugeridas para estas uniones especiales. Pero, entre los diversos elementos de unión existentes en la actualidad, no se logra apreciar indicaciones o detalles de diseño sobre las conexiones especiales o no convencionales, es por ello que estos métodos de unión que no están cubiertos en la norma o manual de diseño solo pueden ser utilizados mediante pruebas experimentales y así cubrir los requerimientos de diseño para cada unión no convencional a realizar. En general, solo se podrán utilizar las juntas especiales mediante diseño asistido por ensayos.



4 DESARROLLO TEÓRICO – EXPERIMENTAL

En esta sección se abarca dos temas importantes que es el análisis teórico y experimental, se desarrolla un modelo conceptual tomando como punto de partida las pruebas experimentales, los cuales servirán para contrastar con lo determinado en la simulación numérica. Asimismo, en la parte experimental se detalla el perfil y la junta no convencional seleccionados, así como la máquina y equipo de medición usados en este acápite. Como también, se detallarán los resultados generales de todos los ensayos realizados.

4.1 PROPIEDADES ESTRUCTURALES DEL ALUMINIO

Las propiedades mecánicas del aluminio son aquellas que están relacionados netamente con su capacidad de poder transmitir, resistir fuerzas o deformaciones. Dentro de estas propiedades se tiene 3 fundamentales que son característicos de este material. En primer lugar, se tiene a la dureza que hace referencia a la resistencia que tiene un material al ser rayado o penetrado. Para el caso del material en estudio, sus valores de dureza Brinell se extienden desde HB=15 hasta casi HB=110. En segundo lugar, se tiene la resistencia al ensayo de tracción, este aumenta cuando está compuesto por más elementos de aleación. Ante ello, la máxima resistencia a la tracción es la máxima curva de tensión-deformación (tal como se muestra en la figura 4.1), en caso se mantenga la tensión hasta llegar al límite, se experimentará en el material un estrechamiento donde el área de la sección transversal se reducirá. La resistencia ultima de tracción depende significativamente del temple del material, normalmente para el aluminio su rango de resistencia va desde los 50 MPa. En tercer lugar, se tiene a la resistencia a temperaturas elevadas, en donde se menciona que si existe un aumento de temperatura habrá una disminución en la resistencia de tracción, el límite elástico y la dureza. En el caso del “proceso de fluencia este aumento podría ocasionar en el material deformaciones lentas bajo la acción de cargas en reposo, aumentando la velocidad en el cambio de forma con el incremento de la temperatura y de la tensión. Al mismo tiempo puede surgir tensiones por debajo de la resistencia a la tracción o del límite elástico 0.2%”[23]

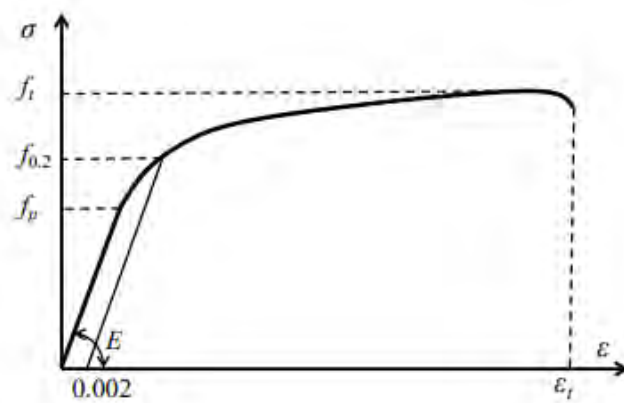


Figura 4.1: Curva de tensión - deformación. Fuente:[1]

En el diagrama presente en la figura 4.1, se muestra una porción elástica lineal hasta la tensión proporcional f_p , que generalmente corresponde a una deformación residual de 0.01%, seguida de una porción no lineal. Para el caso del material en estudio no es posible definir un límite elástico como para el acero, en este caso se supone una tensión límite elástica convencional que corresponde a un desplazamiento del 0.2% de la deformación tal como se muestra en la figura superior. Esta tensión, se utiliza normalmente en el diseño estructural del material en estudio, también es denominado resistencia de prueba del 0.2% o $f_{0.2\%}$.

Por otro lado, es importante tomar en cuenta las propiedades físicas a temperatura ambiente del material en estudio, esto se presentará en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Propiedades físicas del Aluminio. Fuente:[1]

	Aluminio	Acero
Densidad media [kg/m ³]	2700	7850
Punto de fusión [°C]	685	1450-1530
Coeficiente de dilatación térmica lineal [°C ⁻¹]	24*10 ⁻⁶	12*10 ⁻⁶
Calor específico [Cal/g]	0.225	0.12
Conductividad Térmica [cal cm ⁻¹ s ⁻¹ °C ⁻¹]	0.52	0.062
Resistividad eléctrica [μΩ cm]	2.84	15.5
Módulo de Young [N/mm ²]	68500	206000

En la tabla superior, se puede apreciar una breve comparación importante con su homónimo el acero, que es su más cercano competidor en el mercado actual. De esto, se puede verificar que el acero es más denso que el aluminio. Como

también, se puede constatar que el punto de fusión es muy inferior que del acero y posee una menor resistividad eléctrica.

4.2 PERFIL ESTRUCTURAL SELECCIONADO

El perfil para este trabajo de investigación es el Perfil V-Slot, esto porque son ideales para construir estructuras de máquinas CNC, impresoras 3D, robots cartesianos, cortadoras plasma, escáneres 3D, etc. Asimismo, estos perfiles permiten construir de forma sencilla y practica distintas estructuras mecánicas, soportes y mecanismos. Por otro lado, el nombre de V-Slot es por la forma e V que posee su canal y por donde se puede deslizar alguna junta y cuyas dimensiones es de 20x20mm.

El perfil V-Slot pertenece al grupo de aleaciones de la serie 6xxx, para ser más específicos pertenece a la aleación de aluminio 6063 – T5, este tipo de aleaciones son usados básicamente en perfiles y elementos arquitectónicos. Además, posee las siguientes propiedades mecánicas, tal como se muestra en la tabla 4.2.

Tabla 4. 2: Propiedades mecánicas V-Slot. Fuente:[24]

Material (Grado)	Esfuerzo de fluencia (Mpa)	Peso por metro lineal (Kg/m)	Momento de inercia (Ix=Iy) (m ⁴)	Módulo de elasticidad(E) (Mpa)
6063-T5	145	0.464	6.988*10 ⁽⁻⁹⁾	68900

4.3 JUNTA NO CONVENCIONAL SELECCIONADO

Se ha considerado realizar las pruebas de ensayo con las uniones tipo escuadra, esto dado que en la industria peruana se usa con mayor recurrencia en la fabricación de estructuras de soporte o mesas industriales, soporte para maquinaria 3D, etc. Las uniones tipo escuadra, son juntas que permite la sujeción de perfiles estructurales de aluminio(v-slot) en ángulos de 90 grados y permiten el manejo y desmontaje sencillo de toda estructura, facilitando al operario poder reutilizar el perfil y la junta para desarrollar otras estructuras. Asimismo, no se tiene que llegar a mecanizar el perfil en comparación a las otras uniones ya mencionadas en capítulo 2. En la figura 4.2, se puede apreciar la unión no convencional, que cuenta principalmente de tres componentes, el

primero es el bracket (material de aluminio) cuya dimensión seleccionada es de 20x20x17 mm, esto debido a las dimensiones del perfil v-slot elegida (serie 20x20 mm); el segundo es el tornillo Allen de bajo perfil M5x8mm (grado 6.8) y el tercero es la tuerca cabeza de martillo de acero recubiertas de zinc. Para el caso del perno y tuerca son solo 2 unidades por bracket utilizado.



Figura 4.2: Unión no convencional tipo Escuadra. Fuente:[25]

4.4 SISTEMAS DE MEDICIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATA

En esta parte se considera lo indispensable para poder realizar los ensayos y las mediciones respectivas para cada probeta. Para luego procesar la data posteriormente.

4.4.1 Máquina de ensayo

Para la prueba experimental se utilizará la máquina Zwick Roell Z050, con esta máquina se realizará todos los ensayos de resistencia estática, en especial ensayos a tracción, para evaluar el comportamiento y resistencia mecánica de los accesorios en las juntas no convencionales para los perfiles de aluminio. Esta máquina tiene una fuerza máxima de prueba de 50 KN. Asimismo, posee una tasa de prueba que va de 0 hasta 600mm/min. Esta máquina se puede visualizar en la figura 4.3.



Figura 4.3: Máquina de ensayos multipropósito Zwick/Roell Z050. Fuente: Propia.

4.4.2 Medición por medio de Transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT)

El transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT) es un dispositivo electromecánico utilizado para convertir el movimiento rectilíneo en señales eléctricas variables. Este mecanismo de accionamiento se utiliza principalmente en sistemas de control o como sensores de movimiento mecánico en el ámbito de las tecnologías de medición. El transductor que se usará para la medición es el que se muestra en la figura 4.4. “Está diseñado para medir desplazamientos que van desde -5 a 5mm y cuenta con una sensibilidad de 700mV/V. Además, puede ser alimentado por una fuente de 5V y posee un margen de error de +/- 0.5%. Asimismo, el rango de temperatura de operación va de -20 a 125 °C”[26].



Figura 4.4: Transductor de desplazamiento lineal variable DT006. Fuente: Propia.

4.4.3 DAQ

El sistema de adquisición de datos (DAQ), nos permitirá el acondicionamiento de las señales reales que se tomará por medio del sensor (LVDT) en forma de señales eléctrica y esto último pasará a un convertidos analógico-digital para que se puede procesar, analizar posteriormente con un ordenador. Este aparato se muestra en la figura 4.5.



Figura 4.5: DAQ National Instruments NI SCXI 1000. Fuente: Propia.

Este dispositivo permitirá determinar el torque de ajuste en los pernos de la junta no convencional. Con esta medida, se tendrá la relación de la precarga de los tornillos respecto a al torque medido. En la figura 4.6 se muestra en torquímetro que se usara. Este torquímetro tiene un rango de medida que va de 2.71 a 27.12 N.m, tiene una margen de error +/- 2%.



Figura 4.6: Torquimetro Snap-on TECH1 (Techwrench). Fuente: Propia.

4.5 DESARROLLO TEÓRICO

En este punto se tomarán en cuenta todas las fuerzas actuantes en la probeta y luego se definirá el modelo conceptual, donde se podrá obtener las reacciones, deflexiones, etc. Esto se deberá netamente al primer análisis experimental desarrollado.

4.5.1 Modelo conceptual

El modelo general que se presenta en la figura 4.7, se puede apreciar la probeta que consta del perfil seleccionado y la junta no convencional elegido. Como también de los elementos de sujeción inferiores y superiores que se acoplan a la plataforma y la a mordaza de la máquina de tracción respectivamente.

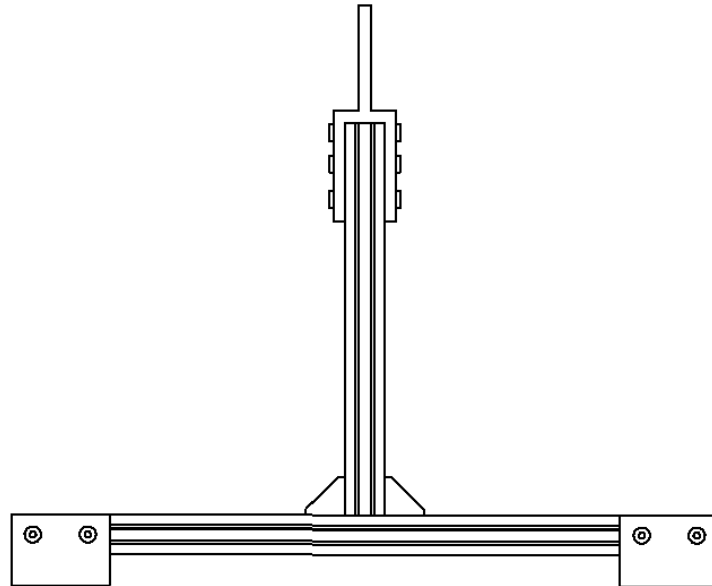


Figura 4.7: Modelo general de la probeta. Fuente: Propia.

Se ha considerado al perfil horizontal, dado que es la que se deflexa a consecuencia de la fuerza a tracción, en comparación al bracket que no se ve afectado por la carga ya mencionada (esto se puede comprobar en las pruebas experimentales iniciales). Se ha considerado el perfil como un elemento viga con

apoyos fijos, tal como se puede apreciar en la figura 4.5.b. Asimismo, se muestra el diagrama de cuerpo libre (a), esto con la principal razón para detallar las fuerzas actuantes en cada parte de la probeta y así poder obtener la fricción del bracket y los perfiles. La fricción esencial es la que se encuentra entre el perfil vertical y el bracket, esto para poder usarlo en la parte de la simulación numérica. Para ello se tiene la siguiente ecuación.

$$\frac{F_{\text{var}}}{2} = \mu_{12} * N_{12}$$

La fricción μ_{12} es la que se insertara en el tipo de contacto fricctional en la parte de la simulación numérica. Asimismo, F_{var} (fuerza de tracción) es la fuerza variable que ira incrementando hasta que venza la unión de la junta y la normal N_{12}, N_{23} que son las pretensiones calculadas del perno de la unión no convencional, esta se obtiene de la ecuación formulada en el acápite 4.5.2.

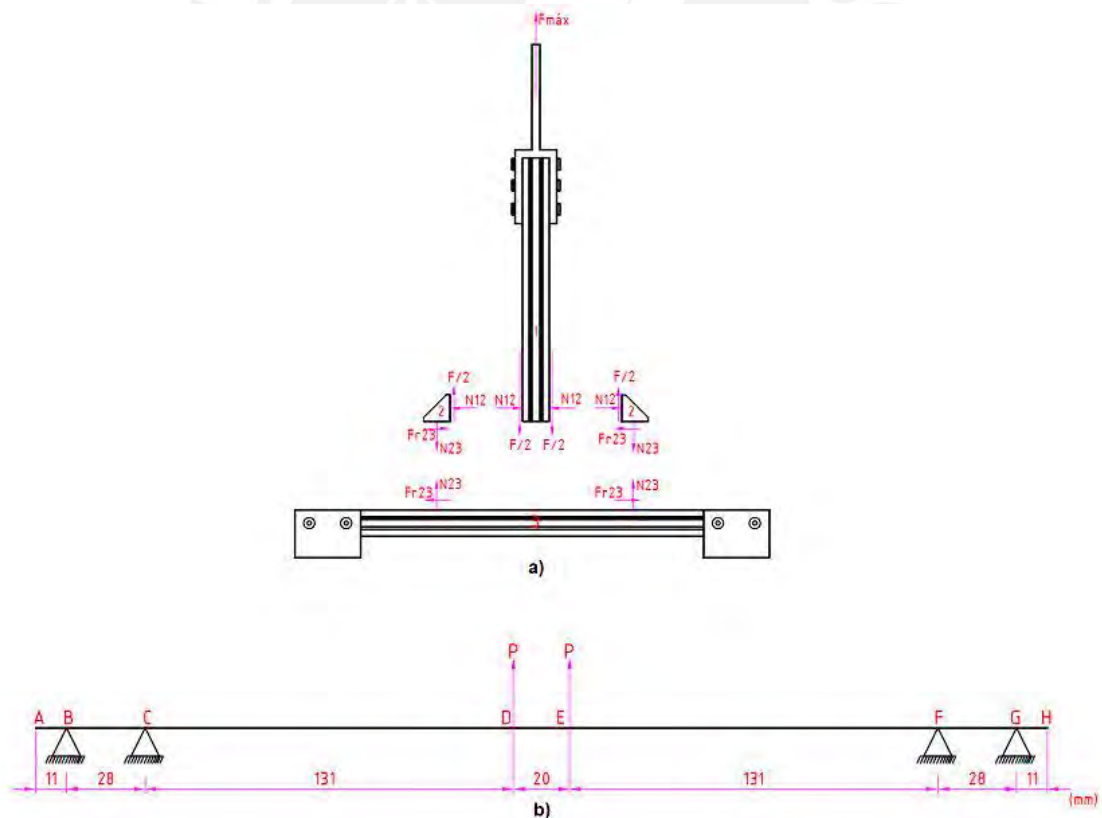


Figura 4.8: a) DCL general de la probeta. b) Modelo conceptual para determinar la deflexión. Fuente: Propio.

Del DCL general se verifica que la fuerza que se toma en cuenta para determina

la deflexión es la siguiente $P = \frac{F}{2}$.

El DCL del modelo conceptual se puede visualizar en la figura 4.9:

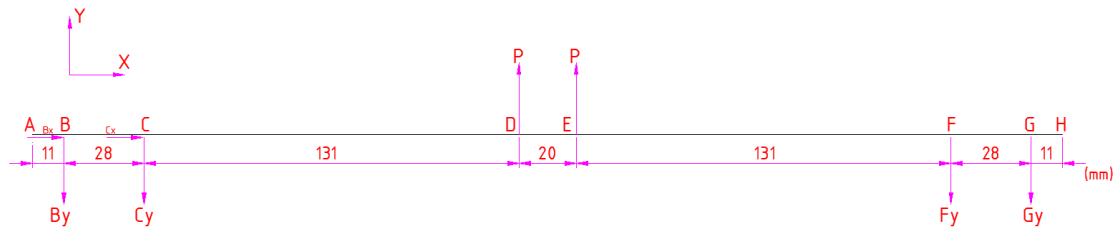


Figura 4.9: DCL general del modelo conceptual. Fuente: Propia.

Por simetría, las fuerzas en el eje X son iguales y se cancelan.

$$\sum F_Y = 0: B_Y + C_Y + F_Y + G_Y = 2P \quad (4.1)$$

$$\sum M_B = 0: 28 \cdot C_Y - 159 \cdot P - 179 \cdot P + 310 \cdot F_Y + 338 \cdot G_Y = 0 \quad (4.2)$$

De las ecuaciones anteriores (1), (2) se obtiene las reacciones y por medio de ello se desarrolla los diagramas de fuerzas cortantes y momento flector (ver figura 4.10). La longitud total es de $L=360$ mm.

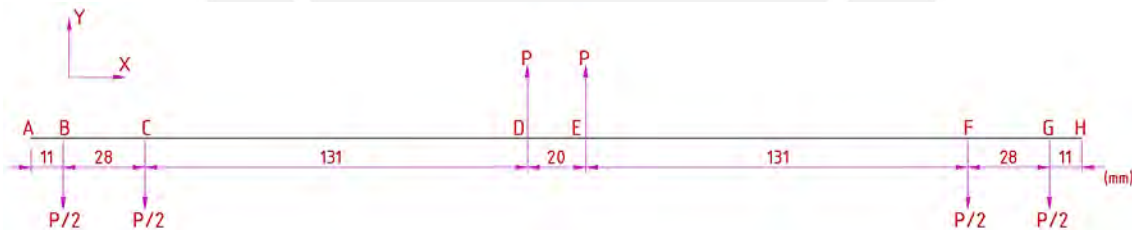


Figura 4.10: DCL del modelo conceptual simplificado. Fuente: Propia.

- Tramo AB: $0 \leq x < 11$

$$\sum F_Y = 0: V(x) = 0 \quad (4.3)$$

$$\sum M_o = 0: M(x) = 0 \quad (4.4)$$

- Tramo BC: $11 \leq x < 39$

$$\sum F_Y = 0: V(x) = -\frac{P}{2} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \sum M_o = 0: M(x) + \frac{F}{2} \cdot (x-11) &= 0 \\ \rightarrow M(x) &= -0.5Px + 5.5P \end{aligned} \quad (4.6)$$

- Tramo CD: $39 \leq x < 170$

$$\sum F_Y = 0: V(x) = -P \quad (4.7)$$

$$\sum M_o = 0: M(x) = -P \cdot x + 25 \cdot P \quad (4.8)$$

- Tramo DE: $170 \leq x < 190$

$$\sum F_Y = 0: V(x) = 0 \quad (4.9)$$

$$\sum M_o = 0: M(x) = -145P \quad (4.10)$$

- Tramo EF: $190 \leq x < 321$

$$\sum F_Y = 0: V(x) = P \quad (4.11)$$

$$\sum M_o = 0: M(x) = P \cdot x - 335 \cdot P \quad (4.12)$$

- Tramo FG: $321 \leq x < 349$

$$\sum F_Y = 0: V(x) = \frac{P}{2} \quad (4.13)$$

$$\sum M_o = 0: M(x) = 0.5 \cdot P \cdot x - 174.5 \cdot P \quad (4.14)$$

- Tramo FG: $349 \leq x < 360$

$$\sum F_Y = 0: V(x) = 0 \quad (4.15)$$

$$\sum M_o = 0: M(x) = 0 \quad (4.16)$$

Con las ecuaciones determinadas anteriormente (ecuaciones desde 4.3 hasta 4.16) se determinan los diagramas de fuerza cortante y momento flector. Asimismo, Para poder determinar las deflexiones, se tiene que utilizar la ecuación de la elástica en los momentos determinados anteriormente (determinados analíticamente). Este proceso es requerido, para poder hallar el desplazamiento en cada tramo y por ende la deflexión máxima. El diagrama de fuerzas cortantes (DFC) y momento flector (DMF) se muestra en la figura 4.11 y 4.12 respectivamente.

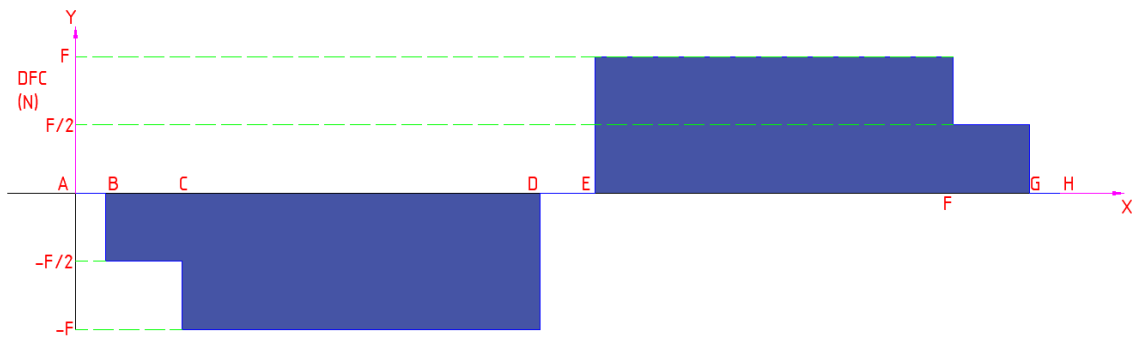


Figura 4.11: DFC del modelo conceptual.

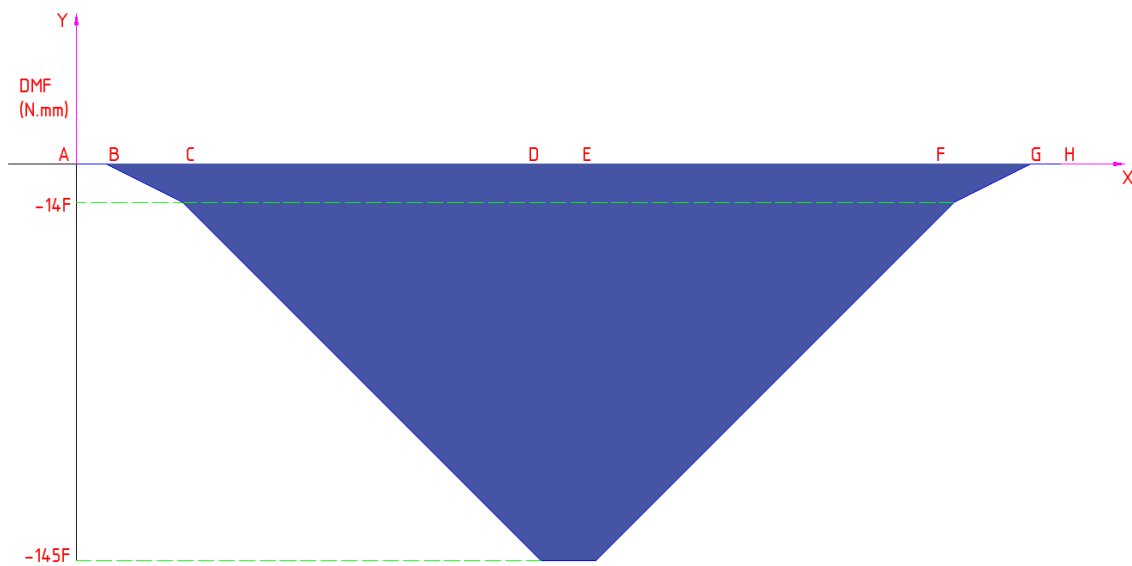


Figura 4.12: DMF del modelo conceptual.

En las ecuaciones anteriores se determinan los momentos flectores, con esto se procede a determinar los desplazamientos (deflexiones) para cada tramo de la viga. Asimismo, el flector obtenido en tramo AB y GH son nulos, para estos casos ya no sería necesario analizar la deflexión.

- Tramo BC:

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M_2(x) = -0.5 \cdot P \cdot x + 5.5 \cdot P, \text{ integrando}$$

$$EI\theta_2 = -0.25 \cdot P \cdot x^2 + 5.5 \cdot P \cdot x + C_1, \text{ integrando} \quad (4.17)$$

$$EIv_2 = -0.083 \cdot P \cdot x^3 + 2.75 \cdot P \cdot x^2 + 2.75 \cdot P \cdot x + C_1 \cdot x + C_2 \quad (4.18)$$

- Tramo CD:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M_3(x) = -P \cdot x + 25 \cdot P, \text{ integrando}$$

$$EI \theta_3 = -0.5 \cdot P \cdot x^2 + 25 \cdot P \cdot x + C_3, \text{ integrando} \quad (4.19)$$

$$EI v_3 = -0.167 \cdot P \cdot x^3 + 12.5 \cdot P \cdot x^2 + C_3 \cdot x + C_4 \quad (4.20)$$

- Tramo DE:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M_4(x) = -145 \cdot P, \text{ integrando}$$

$$EI \theta_4 = -145 \cdot P \cdot x + C_5, \text{ integrando} \quad (4.21)$$

$$EI v_4 = -72.5 \cdot P \cdot x^2 + C_5 \cdot x + C_6 \quad (4.22)$$

- Tramo EF:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M_5(x) = P \cdot x - 335 \cdot P, \text{ integrando}$$

$$EI \theta_5 = -0.5 \cdot P \cdot x^2 - 335 \cdot P \cdot x + C_7, \text{ integrando} \quad (4.23)$$

$$EI v_5 = 0.167 \cdot P \cdot x^3 - 167.5 \cdot P \cdot x^2 + C_7 \cdot x + C_8 \quad (4.24)$$

- Tramo FG:

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M_6(x) = 0.5 \cdot P \cdot x - 174.5 \cdot P, \text{ integrando}$$

$$EI \theta_6 = -0.25 \cdot P \cdot x^2 - 174.5 \cdot P \cdot x + C_9, \text{ integrando} \quad (4.25)$$

$$EI v_6 = 0.083 \cdot P \cdot x^3 - 87.25 \cdot P \cdot x^2 + C_9 \cdot x + C_{10} \quad (4.26)$$

Para poder determinar las constantes $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}$ se tiene que tener en cuenta las condiciones de borde, tal como se aprecia a continuación:

$$\begin{aligned}
 x = 11 & \rightarrow v_2 = 0 \\
 x = 39 \text{ mm} & \rightarrow v_3 = 0 \\
 x = 180 \text{ mm} & \rightarrow \theta_4 = 0 \text{ (max } v) \\
 x = 170 \text{ mm} & \rightarrow \theta_3 = \theta_4 \rightarrow v_3 = v_4 \\
 x = 190 \text{ mm} & \rightarrow \theta_4 = \theta_5 \rightarrow v_4 = v_5 \\
 x = 321 \text{ mm} & \rightarrow v_6 = 0 \\
 x = 335 \text{ mm} & \rightarrow \theta_6 = 0
 \end{aligned} \quad (4.27)$$

Con las ecuaciones determinadas anteriormente (4.17 al 4.26) en conjunto con las condiciones de borde (4.27), se obtienen las deflexiones por cada tramo. Para poder determinar la deflexión máxima solo es necesario determinar la ecuación de la deflexión en el tramo 4. Esto último, se puede mostrar en la ecuación 4.26.

$$v_4(x) = \frac{P}{EI}[-72.5 \cdot x^2 + 26100 \cdot x - 1083927.227] \quad (4.28)$$

La deflexión máxima se determinará por medio de la ecuación 4.28. Esta será reemplazando los datos que son importantes como la posición de $x = 180\text{mm}$ (ubicación de máxima deflexión) y en conjunto con las propiedades mecánicas, como el módulo de elasticidad y momento de inercia del perfil de aluminio se podrán determinar cuánto se deflecta el perfil horizontal.

4.5.2 Cálculo de la fuerza axial de montaje en los tornillos de la unión

Para poder determinar la fuerza axial (fuerza de ajuste placa-perno) de la unión atornillada presente en las uniones no convencionales y las que se encuentran en las mordazas tanto inferior y superior, se debe de tener en cuenta el momento torsor medido (se usa un torquímetro) en dichas uniones y por medio de la relación de fuerza axial y momento torsor desarrollados en la unión atornillada, se puede obtener la fuerza de montaje.

“El momento torsor total de ajuste (M_{Ajuste}), toma en cuenta la fuerza de interacción entre el tornillo y la tuerca ($M_{t.M}$) y la fuerza de fricción entre la tuerca y la placa con la cual está en contacto ($M_{fr.ta.p}$)”[9]. Entonces se tiene la siguiente relación.

$$M_{Ajuste} = M_{t.M} + M_{fr.ta.p} \quad (4.28)$$

$$M_{t.M} = F_M \operatorname{tg}(\varphi + \rho') \cdot \frac{d_2}{2} \quad (4.29)$$

$$M_{fr.ta.p} = \frac{\mu_f F_M D_{c.m}}{2} \quad (4.30)$$

Donde:

F_M : Fuerza de montaje.

φ : Ángulo de hélice.

d_2 : Diámetro de paso de flanco.

μ_f : Coeficiente de fricción entre la tuerca (cabeza de martillo) y la placa.

$D_{c.m.}$: Diámetro de contacto medio entre la tuerca (cabeza de martillo) y la placa.

De las ecuaciones (4.28), (4.29) y (4.30) lo que se determinara es la fuerza de montaje o de ajuste de los tornillos. Asimismo, él M_{Ajuste} se obtiene al medir el torque en cada perno de la unión no convencional y de los que este sujeto en las mordazas.

Para poder determinar el ángulo efectivo de fricción (ρ'), se toma en cuenta la siguiente ecuación:

$$tg\rho' = \mu \cdot \sqrt{1 + tg^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\mu}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \mu' \quad (4.31)$$

Donde:

μ' : Coeficiente de fricción efectivo.

α : 60° (ángulo de perfil en V).

Se calcula el diámetro de contacto medio de la siguiente manera:

$$D_{c.m} = \left(\frac{d_1 + d_{ag}}{2}\right) \quad (4.32)$$

d_1 : Diámetro de la circunferencia inscrita o externa de la cabeza del perno.

d_{ag} : Diámetro del agujero.

Para poder determinar el ángulo de hélice, se tiene en cuenta la siguiente relación:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{p}{\pi d_2} \quad (4.33)$$

Donde:

p : Paso

d_2 : Diámetro de paso.

Con las ecuaciones del (4.28) al (4.33), se determinará la fuerza axial de montaje o de ajuste (ecuación 4.34), con los valores de cada parámetro que son necesarios para poder determinar la pretensión.

$$F_M = \frac{2M_{\text{Ajuste}}}{[\operatorname{tg}(\varphi + \rho')d_2 + \mu_f D_{c.m}]} \quad (4.34)$$

Donde se toma los datos determinados y tomados de referencia.

$$d_1 = 4.134 \text{ mm}; d_{ag} = 5.0866 \text{ mm}; p = 0.8 \text{ mm}; d_2 = 4.48 \text{ mm}$$

$$\mu = 0.11; \mu_f = 0.61; \alpha = 60^\circ; \varphi = 3.25^\circ; \rho' = 7.238^\circ$$

Los valores obtenidos anteriormente se han obtenido de los datos técnicos del tornillo que se está trabajando, los cuales se han tomado en referencia de [27], [28].

4.6 ENSAYOS EXPERIMENTALES

Los ensayos experimentales se han realizado de dos formas. En primer lugar, se han realizado 5 pruebas, para poder verificar si existe alguna deformación presente en el bracket de la unión y observar si existen algunas deflexiones en los perfiles contiguos. En segundo lugar, se ha realizado las pruebas principales correspondientes para poder medir la deflexión que ocurre en el perfil horizontal.

4.6.1 Pruebas de verificación de deformación

En esta sección se mostrarán las pruebas previas con la finalidad de observar si existe alguna deformación en el bracket o si alguna componente de la junta se ve afectado por la carga axial. Asimismo, verificar si la carga influye directamente en la resistencia de los perfiles de aluminio o solo afecta a la junta.

4.6.1.1 Primera prueba

Para esta primera etapa, las uniones tipo escuadra (bracket de aluminio 90°) se ensayaron tal como han sido adquiridas, es decir con la pequeña capa de pintura revestida en su entorno total. Esto último, se menciona dado que las posteriores pruebas se darán en distintas configuraciones respecto a la unión. En la figura 4.13 se puede mostrar el ensamble general, en este se puede apreciar la plataforma de trabajo con los apoyos para la sujeción con la probeta y la mordaza superior de la máquina.



Figura 4.13: Ensamble de la probeta con la máquina de tracción Z050. Fuente: Propia

En la figura 4.14 se puede apreciar la gráfica de fuerza versus desplazamiento, en este se puede verificar que la fuerza máxima que soporta la unión antes de deslizar es 2.686KN. En este primer ensayo se puede observar que los perfiles de aluminio no presentan ninguna deformación y de igual forma sucede con el caso de la unión. Esto sucede debido a que antes de generar una leve

deformación en los distintos cuerpos, el perfil vertical por la acción de la fuerza de tracción empieza a deslizar respecto al bracket. El valor del par de apriete (pretensión) determinado teóricamente anteriormente es de 4.39 Nm, según[29] se ha considerado tomar el 70% del máximo valor hallado, para que el canal del perfil de aluminio no sufra alguna deformación. Para esta primera prueba se ha tomado 3.07Nm, esto último se ha realizado, mediante un torquímetro.

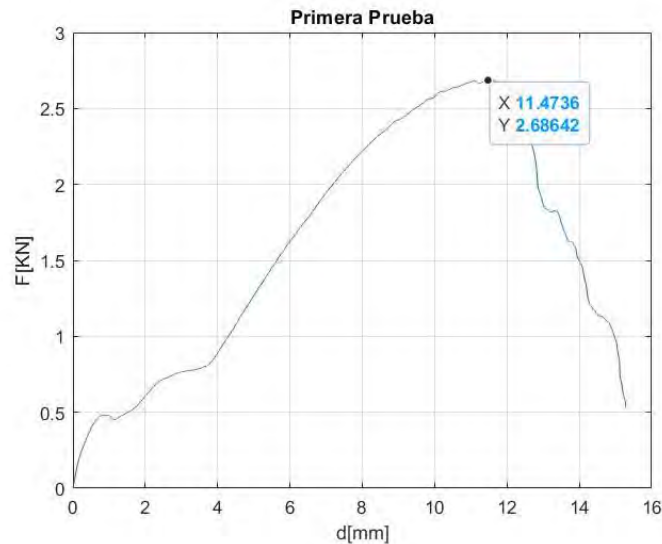


Figura 4.14: Fuerza vs Desplazamiento de la primera prueba. Fuente: Propia.

En la figura 4.15 se puede apreciar el deslizamiento del perfil vertical respecto a la unión. Asimismo, se pudo observar la zona afectada que se generó por la fricción entre las regiones de contacto del perfil y ambos Brackets.

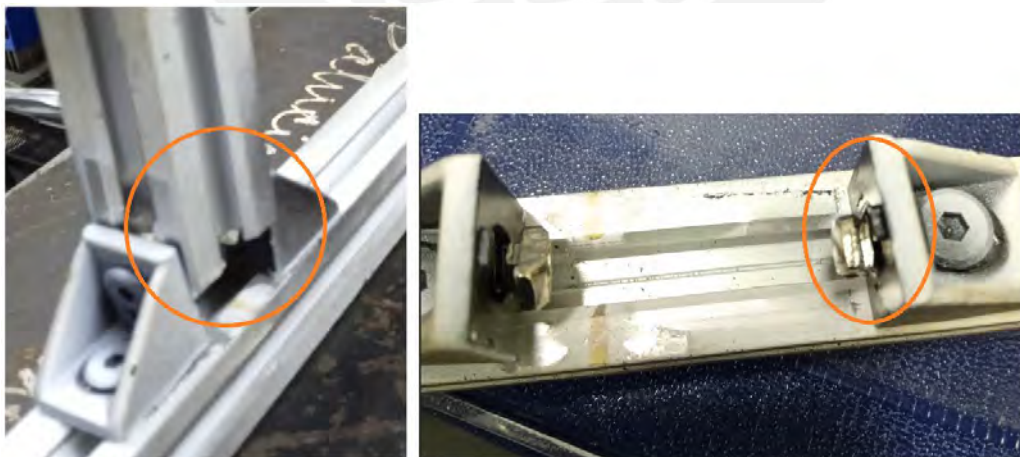


Figura 4.15: a) Zona donde se puede apreciar el deslizamiento. b) Zona de contacto del bracket con la capa de pintura. Fuente: Propia.

4.6.1.2 Segunda prueba

Para esta parte, se tuvo que lijar las caras de la unión (bracket) que estaban en contacto con los perfiles de aluminio, con la finalidad de poder quitar la capa de

pintura y así poder aumentar la fricción entre ambas zonas de contacto (perfiles-Brackets). Esto último, se ha desarrollado para poder verificar si existe alguna deformación en todo el conjunto.

En la figura 4.16 se puede observar que el perfil horizontal se deflecta (v), pero los brackets no sufren alguna deformación, sólo se logra percibir un pequeño desplazamiento de bracket izquierdo respecto al perfil inferior, tal como se muestra en dicha imagen.

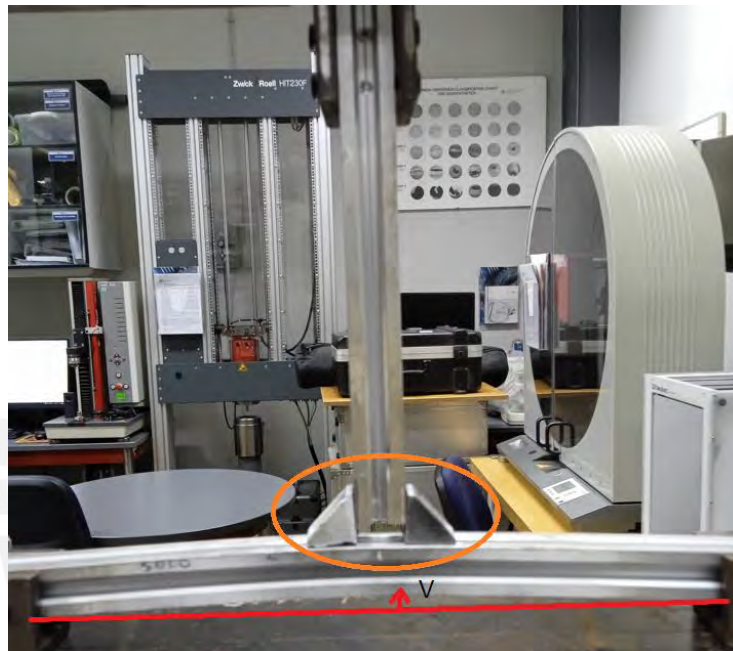


Figura 4.16: Deflexión observable de la segunda probeta. Fuente: Propia.

En la figura 4.17 se observa que se inicia el deslizamiento cuando se vence la fricción entre la tuerca y los pernos del bracket (caso del perfil vertical), esto sucede cuando la fuerza de tracción aplicada es de 2.72KN aproximado. Asimismo, esta fuerza aumenta, debido a que cuanto más presión exista en el área de contacto, habrá cierto desbaste de material que al acumularse presentarán una segunda oposición al deslizamiento; como también, los pernos inferiores (los que están acoplados al perfil horizontal) simultáneamente se traccionaran y luego generara la deflexión V , tal como se puede apreciar en la figura anterior. Este desplazamiento vertical aumentara a medida que la fuerza siga ascendiendo hasta alcanzar el valor pico (3.9KN-12.46mm) y empiece a decaer luego dicha fuerza, porque se libera del área de contacto. El apriete

determinado para esta prueba fue el máximo, es decir 4.39Nm, con la finalidad de poder observar alguna deformación en el bracket.

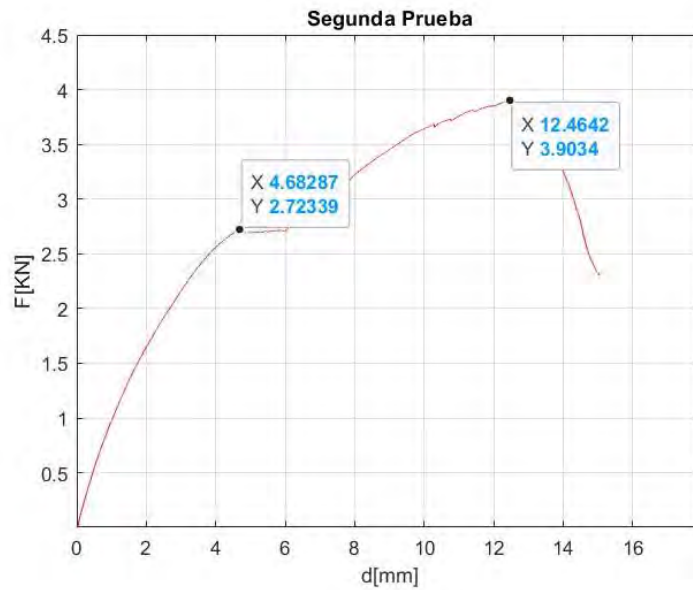


Figura 4.17: Fuerza vs desplazamiento de la segunda prueba. Fuente: Propia

4.6.1.3 Tercera prueba

Esta prueba cumple con las condiciones mencionadas en la segunda prueba. Asimismo, se tuvo que agregar un adhesivo epóxico (Pegatanke blanco), generando una unión mixta, tal como se detalla en una parte en el ítem 3.4. La finalidad principal de este complemento era aumentar la resistencia de la unión y así poder verificar alguna deformación en el bracket (elemento de color negro). Sin embargo, como se puede apreciar en la figura 4.18 no se percibe alguna deformación, esto debido a que posiblemente el área de contacto era muy pequeña para poder soportar la carga axial. Asimismo, en esta figura se logra percibir que solamente ha deslizado el perfil vertical y que ambos brackets se han mantenido en la posición horizontal.

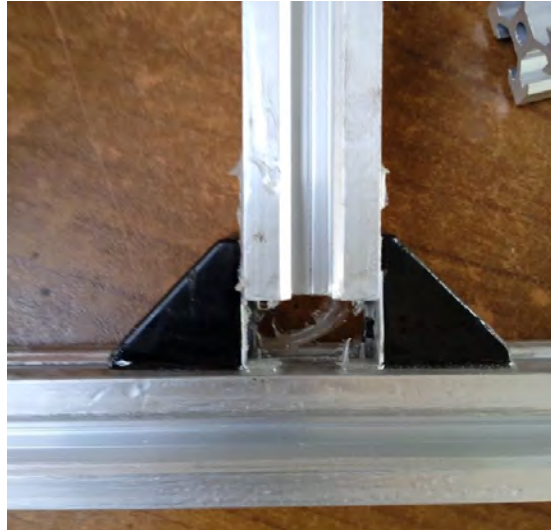


Figura 4.18: Unión mixta (Adhesivo-Brackets). Fuente: Propia.

En la figura 4.19, se logra percibir la fuerza máxima de tracción que logra soportar la unión mixta antes de deslizar. Este valor (2.52KN-3.1mm) tiende ser similar a las anteriores pruebas, pero la fuerza decae rápido y no logra mantenerse, esto quizás porque, a la hora de quebrar la resistencia del pegamento, se empezó a deslizar más fácilmente, porque presentó un coeficiente de fricción más pequeño, dado que el pegamento deja capas lisas en la superficie del perfil.

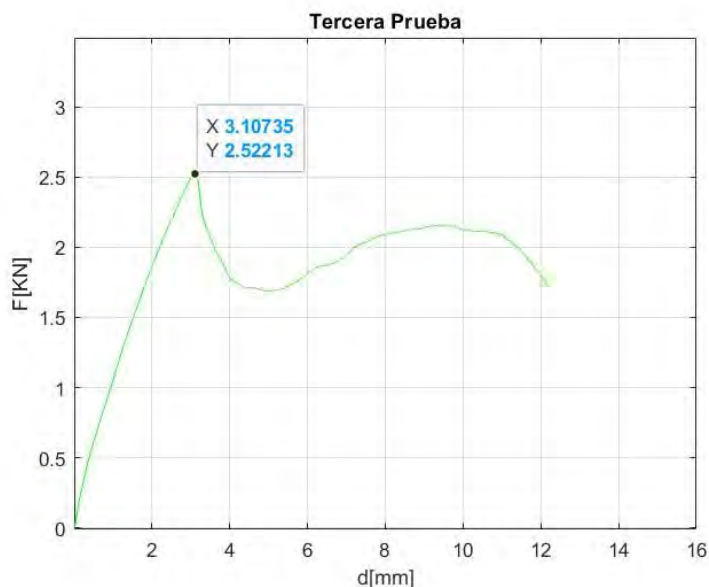


Figura 4.19: Fuerza vs desplazamiento (adhesivo + unión). Fuente: Propia.

4.6.1.4 Cuarta prueba

A diferencia con las otras pruebas, en esta parte se sobrepasó el límite máximo del par de apriete determinado anteriormente, este valor fue de 10,8 Nm en

promedio. Asimismo, se lijó las zonas en contacto, así como se ha venido desarrollando en los dos casos anteriores. En la figura 4.20 se puede verificar que los brackets no presentan alguna deformación, caso contrario es el caso del perfil horizontal, que deflecta (v) y los pernos cabeza de martillo fallan.

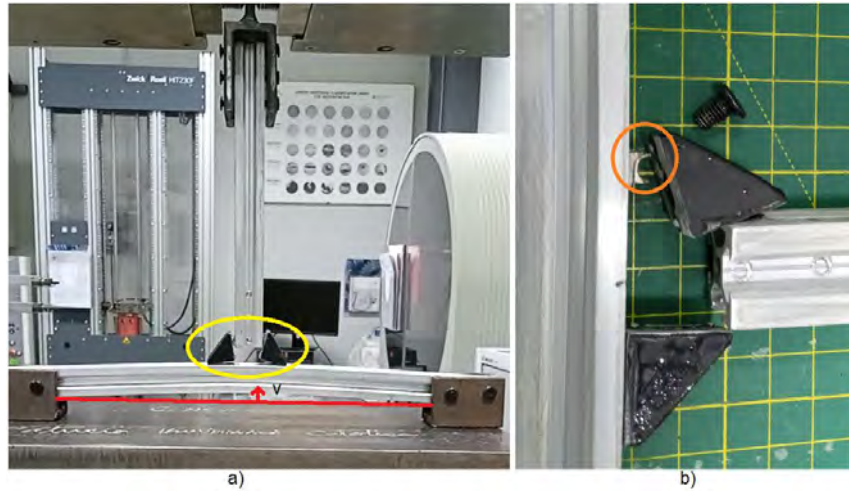


Figura 4.20: Deflexión del perfil horizontal (a) y falla de la tuerca cabeza de martillo (b). Fuente: Propia.

En la figura 4.21 se muestran las tuercas cabeza de martillo que fallaron (a), (c) y también se puede ver la deformación que se da en los canales del perfil vertical (b).

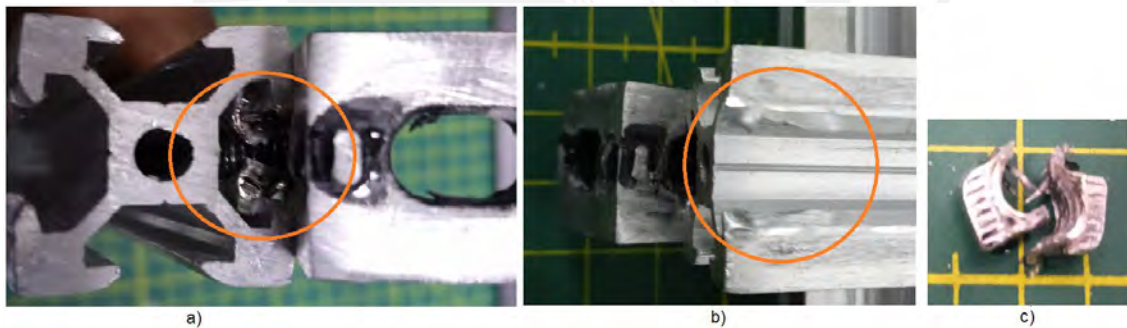


Figura 4.21: Componentes que fallaron durante la cuarta prueba. Fuente: Propia.

En la figura 4.22 se puede observar que la unión empieza a deslizarse a 2.57 KN un valor aproximado a los anteriores casos ya detallados. Asimismo, tal como el segundo caso presenta una recuperación de la fuerza de axial llegando hasta un máximo de 4.08KN (valor máximo que puede soportar la unión), hasta que las tuercas cabeza de martillo fallen y empiece el descenso de dicha fuerza.

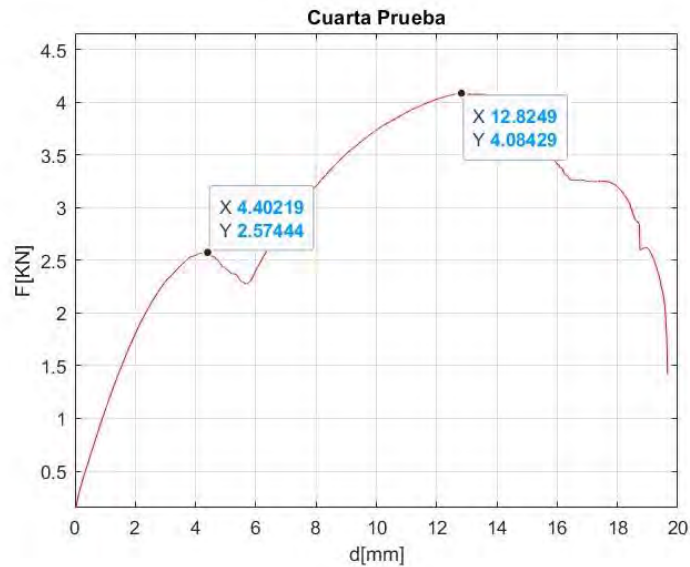


Figura 4.22: Fuerza vs desplazamiento de la unión con par de apriete 10.8Nm. Fuente: Propia.

4.6.1.5 Quinta Prueba

Para esta parte, se tuvo que hacer perforaciones en los perfiles, esto con la finalidad de usar tornillos pasantes y generar una mayor resistencia en la unión. Lo que se tuvo que reemplazar para este caso son los tornillos M5 en conjunto con las tuercas cabeza de martillo, tal como se puede apreciar en la figura 4.22.

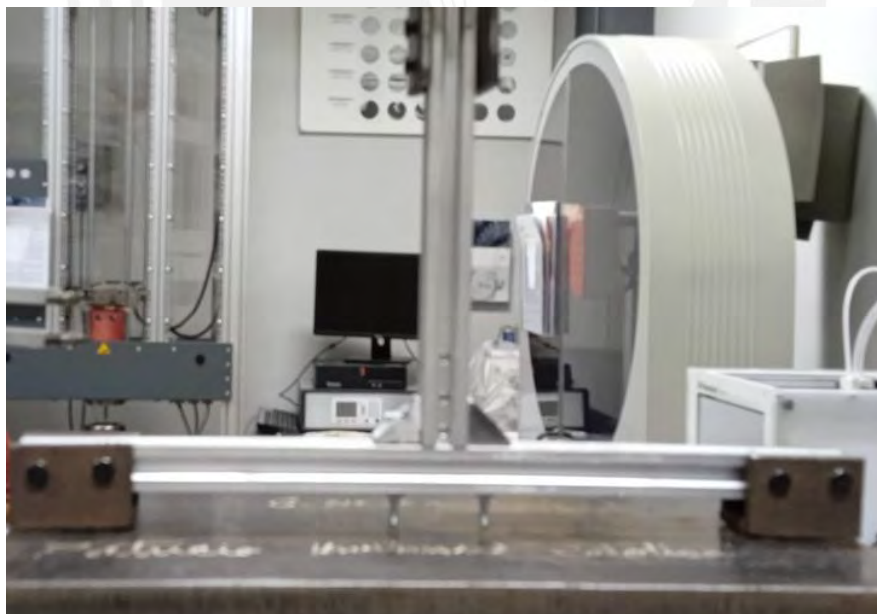


Figura 4.23: Ensamble de la quinta prueba con tornillos pasantes. Fuente: Propia.

En la figura 4.24, se pudo apreciar que a 2.92kN la cabeza del perno se cizallo y empezó la caída de dicha fuerza. Asimismo, como máximo se desplazó 7.17 mm. Como efecto sobre el bracket, no tuvo alguna deformación por la acción de

la fuerza de tracción, solo se presentó una deformación insignificante en el agujero del bracket por donde se inserta el perno.

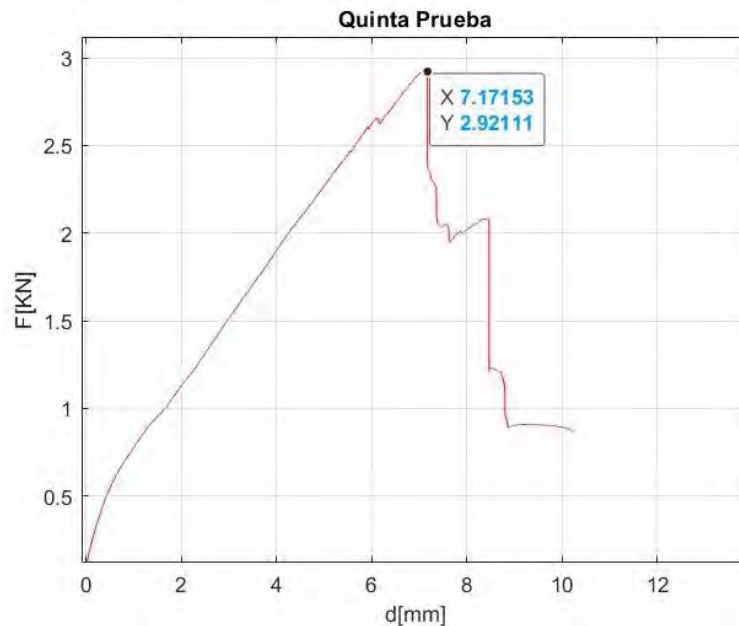


Figura 4.24: Fuerzas vs desplazamiento con tornillos pasantes.

4.6.1.6 Resumen de resultados primera parte

En la tabla 4.3, se puede verificar los resultados en general de cada prueba experimental realizada. Tanto en esta tabla y la figura 4.25 se puede apreciar que la fuerza máxima que puede soportar antes de deslizar es en promedio 2.685KN y sobrepasando ese límite se generara la deflexión en el perfil horizontal más el desplazamiento que se genera en el perfil vertical. Además, la junta soportara un promedio de 3.994KN como máximo antes que pueda fallar la tuerca cabeza de martillo. Asimismo, para la toma del promedio de las fuerzas máximas soportadas, se toma en cuenta el dato de la segunda y cuarta prueba, esto dado que poseen casi las mismas condiciones a excepción del torque de ajuste.

Tabla 4.3: Resumen de las fuerzas determinadas experimentalmente. Fuente: Propia.

Pruebas	Fuerza de deslizamiento(KN)	Fuerza maxima(KN)	Torque de Ajuste pernos(Nm)	¿Uso de lija?
Primera	2.686	-	2.56	NO
Segunda	2.723	3.903	4.39	SI
Tercera	2.522	-	4.39	SI
Cuarta	2.574	4.084	10.8	SI
Quinta	2.921	2.921	-	SI
Primeredio las cinco primera pruebas (KN)	2.685	Promedio (KN)	3.994	
Desviación estándar	0.094	Desviación estándar	0.128	

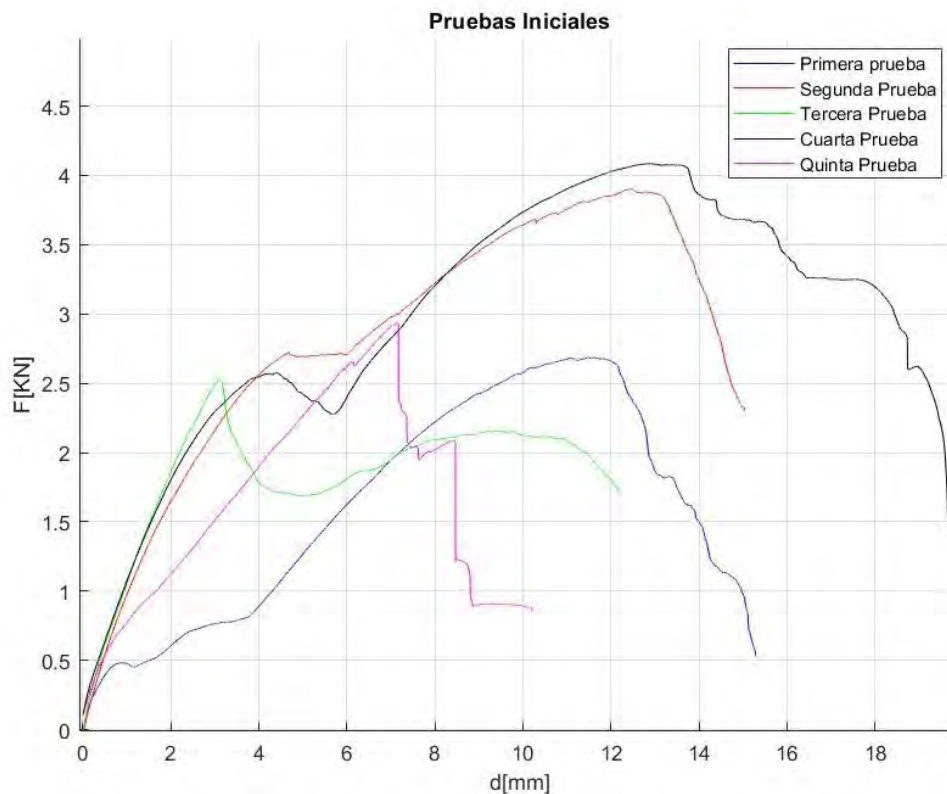


Figura 4.25: Pruebas iniciales. Fuente: Propia.

4.6.2 Pruebas experimentales principales

Para estas pruebas principales se tuvo en consideración las pruebas previas, mencionadas anteriormente, dado que en ello se pudo verificar que el bracket por sí solo no sufría alguna deformación, pero si se observó que las tuercas de cabeza de tornillo fallaban. Asimismo, el perfil horizontal se deflectaba a cierto

punto que tenía cierta recuperación elástica. Es por ello que el enfoque se orientó a medir la deflexión del perfil hasta que fallen las tuercas inferiores de la unión no convencional.

Como se mencionó en el párrafo anterior se midió la deflexión del perfil horizontal por el dispositivo de medición denominado transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT) y la data fue procesada por una DAQ (equipo de adquisición de data). Tal como se muestra en la figura 4.26.

En la figura debajo se puede observar en (a) que el dispositivo de medición de desplazamiento (LVDT) se conecta al DAQ para que la data analógica se pueda convertir a digital y luego se procesa posteriormente en un ordenador, es decir es un intermediario entre el sensor o transductor y el usuario. Asimismo, el transductor se acopla a las probetas en su conjunto (b), específicamente anclado al perfil horizontal y así poder medir la flecha o desplazamiento vertical.

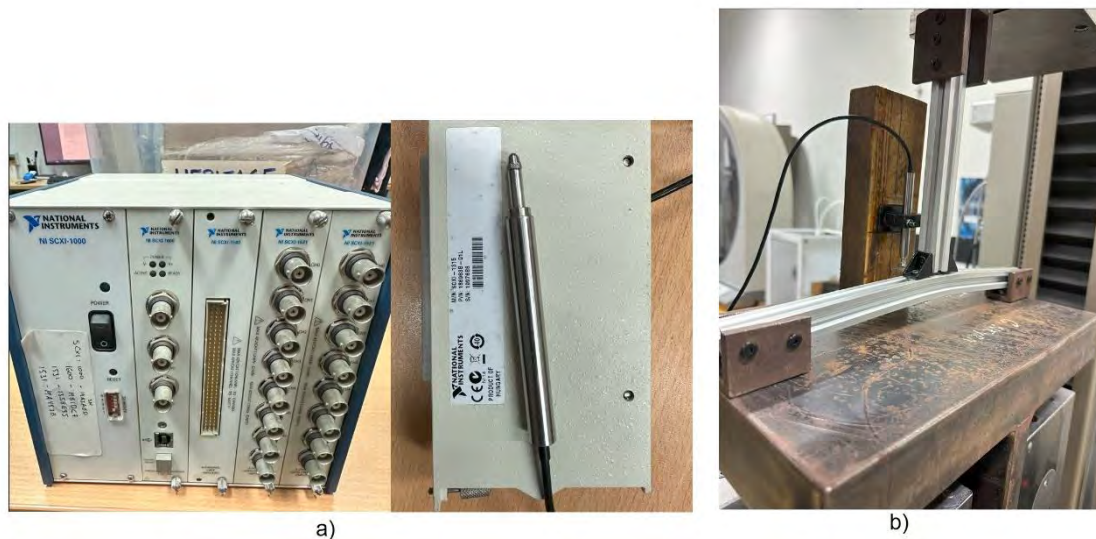


Figura 4.26: a) equipos de medición DAQ-LVDT, b) LVDT acoplado a la probeta. Fuente: propia.

Cabe resaltar que se obtienen dos gráficas, para cada prueba experimental realizada. La primera, se obtiene de la máquina de tracción y mide la fuerza máxima que soporta la junta no convencional y la deformación total (suma de la deflexión del perfil horizontal y el desplazamiento del perfil vertical). La segunda, se muestra la deflexión solamente del perfil horizontal versus el tiempo que tarda en llegar al punto máximo de desplazamiento. Asimismo, los resultados de estas pruebas experimentales se muestran en los incisos siguientes.

4.6.2.1 Resultados de las pruebas experimentales

Para esta primera parte de las pruebas se tiene los siguientes resultados, que se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Resultados de las pruebas principales.

Resultados pruebas principales			
Orden de Prueba	Fmáx(N)	dtotal(mm)	dmáx(mm)
Primera Prueba	4459	13.274	7.329
Segunda Prueba	3689	11.402	5.732
Tercera Prueba	3972	10.536	6.264
Cuarta prueba	4367	12.780	6.471
Quinta Prueba	4405	12.385	6.503
Sexta prueba	4327	10.290	5.292
Séptima prueba	4093	10.462	5.166
octava prueba	4134	9.098	5.025
Promedio	4180.75	11.278	5.973

De la tabla anterior, se puede mostrar que d_{total} , es el desplazamiento máximo que sufre la probeta, es decir, es la suma del desplazamiento del perfil vertical y la deflexión del perfil horizontal. En cambio, $d_{máx}$ solo es el desplazamiento(deflexión) del perfil horizontal y es lo que más importa en esta investigación. Asimismo, la fuerza máxima que soporta la unión no convencional es $F_{máx}$. En general, las gráficas de la primera prueba se muestran en la figura 4.27 y 4.28 (en modo representación) y las restantes se presentarán en el capítulo de ANEXOS.

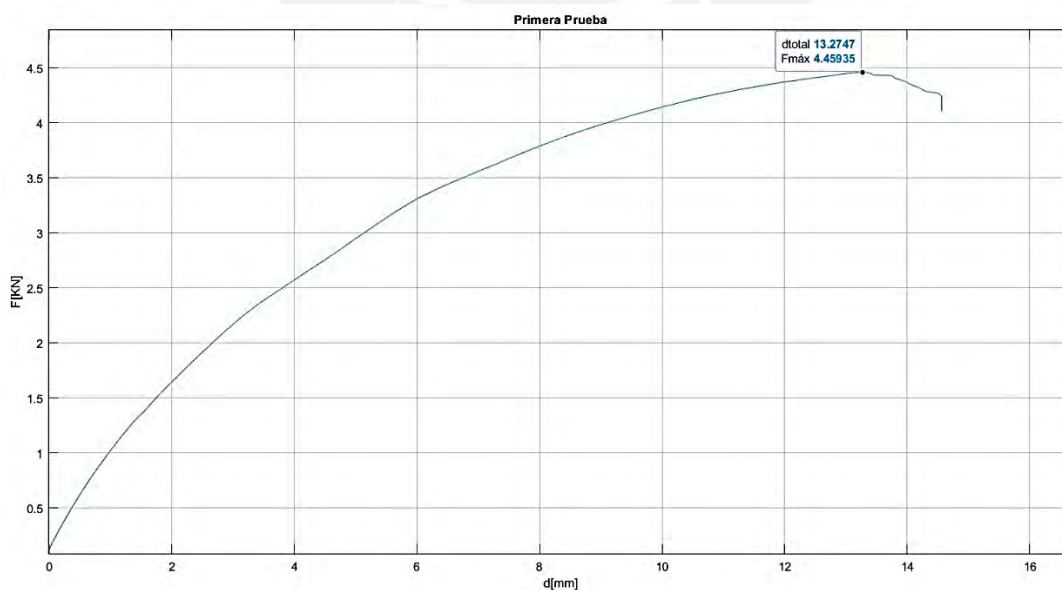


Figura 4.27: Fuerza vs Deformación(d_{total})-Primera prueba. Fuente: Propia.

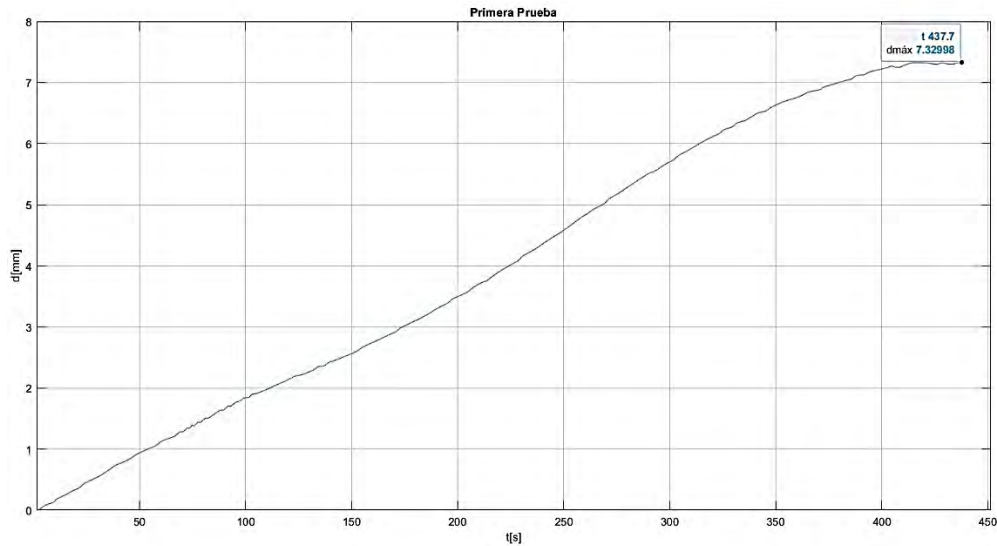


Figura 4. 28: Deformación ($dmáx$) vs tiempo(s)-Primera prueba. Fuente: Propia.

En la figura 4.29 se muestra las curvas de fuerza vs deformación($dtotal$), que fue medido por la máquina de tracción Z050, de esto se puede verificar que la tendencia en todos los casos fue similar, dado que llegando al tope de fuerza promedio de 4200 N aproximado, la junta no convencional ya no cumplía su trabajo de mantener la conexión, por lo que la fuerza decaía drásticamente. Asimismo, el desplazamiento máximo ($dtotal$) que llegaba en promedio fue de 11.3 mm aproximado.

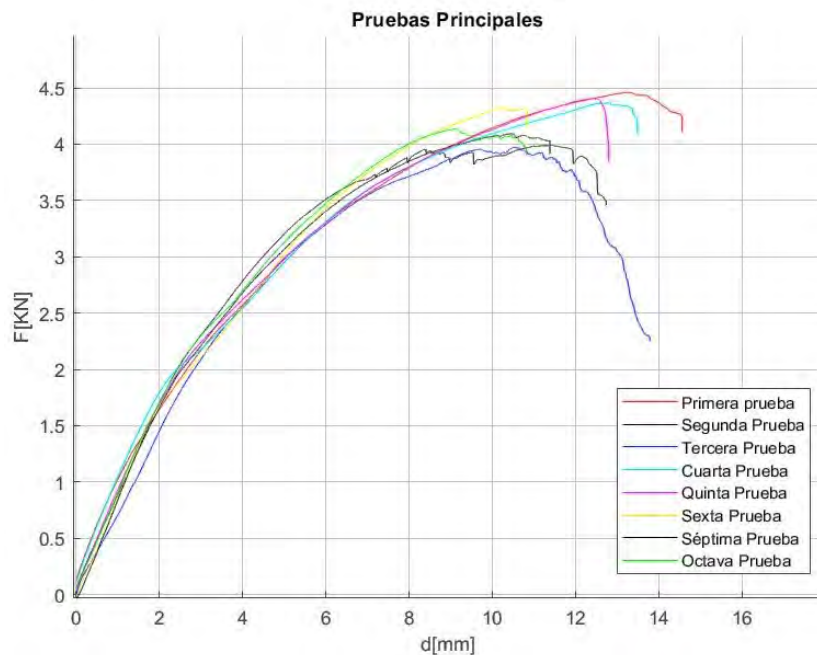


Figura 4.29: Fuerza vs deformación($dtotal$) de todas las pruebas principales. Fuente: Propia.

En la figura 4.30, se tiene las curvas de deformación vs tiempo, de ello se puede notar la deflexión ($d_{\text{máx}}$) promedio aproximado del perfil horizontal es de 6mm, el cual, al relacionar con la curva anterior, esta se llevaría a cabo por una fuerza máxima promedio de 4200N a un tiempo promedio de 337 s.

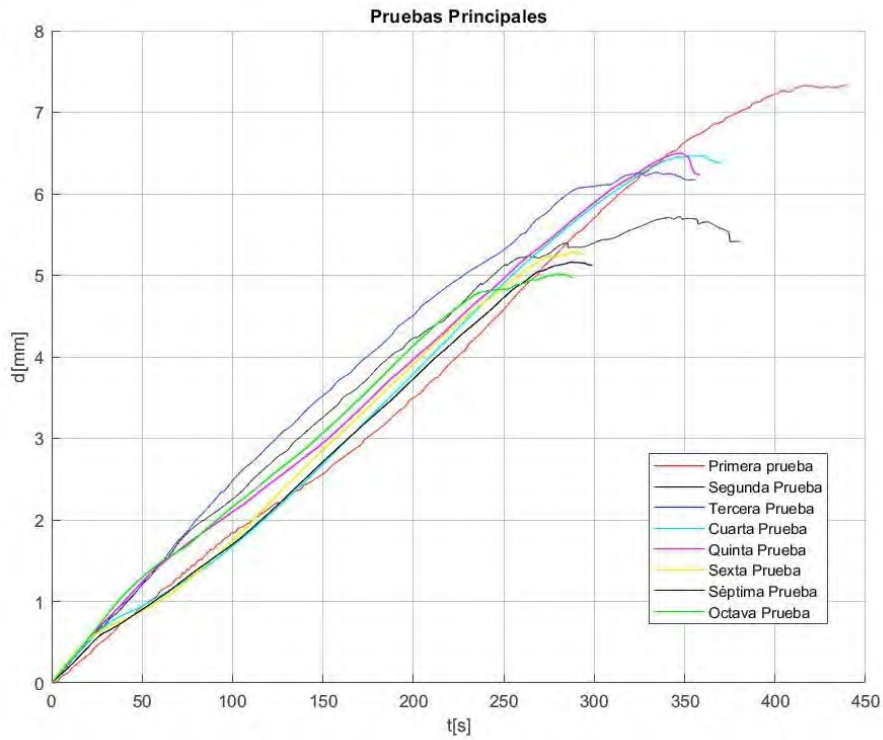


Figura 4.30: Deformación vs tiempo. Fuente: Propio.

5 SIMULACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

El desarrollo de un modelo numérico permite dar un mayor entendimiento sobre el comportamiento mecánico de las uniones no convencionales, por medio de modelos desarrollados por un computador que permitiría aproximar los detalles significativos de lo que está en estudio. Por ello, el análisis numérico realizado con métodos de elementos finitos puede caracterizar el comportamiento mecánico de sistemas complejos y puede ser sumamente útil cuando la teoría lineal de la elasticidad no pueda dar una interpretación precisa, es para casos donde existen distintas fuentes de no linealidad (caso plasticidad del material). “Los resultados del análisis numérico permiten investigar algunos parámetros que no pueden medirse o captarse mediante el proceso experimental, lo que permitiría obtener información adicional o complementaria al desarrollo experimental” [1].

5.1 GEOMETRÍA DE LA UNIÓN NO CONVENCIONAL

Existen diversas formas de unión como se ha explicado anteriormente, pero dentro de ello existen estos elementos que permiten unir perfiles de aluminio estructural de una forma más sencilla y fácil. Para ello, se han considerado tres criterios fundamentales para su posterior selección. Estos son la facilidad de montaje, bajo costo y sobre todo rigidez. Asimismo, se ha tomado en cuenta que la unión sea compacta y robusta, cuyo uso sea de gran utilidad en el mercado nacional. Ante lo mencionado, se han desarrollado el modelo representativo de unión que nos permitirá complementar a la parte experimental.

5.1.1 Unión Tipo Escuadra

Como se ha descrito anteriormente en la sección 3.2. Este tipo de unión (2) distribuye de forma uniforme las tensiones entre el perfil superior (1) y el alma del perfil inferior (3) con el fin de generar un mejor apriete. Asimismo, este tipo de junta permite una correcta posición durante el montaje y resistencia a la torsión y sobre todo no es necesario algún tipo de mecanizado para realizar el montaje. Lo mencionado se puede apreciar en la figura 5.1.

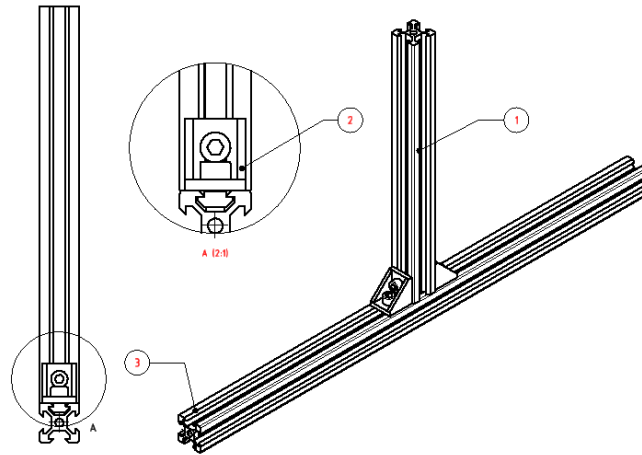


Figura 5.1: Ensamble del elemento de unión tipo escuadra. Fuente: Propia.

Los elementos de sujeción son instrumentos que permiten sujetar cualquier elemento, garantizando seguridad y precisión para el usuario. Para ello se propone dos tipos de sujetadores, tanto para la plataforma de trabajo (3) como para la superior (1) que está sujeto a la mordaza de la máquina. Estos sujetadores, permitirá conectar con firmeza el conjunto de perfiles de aluminio (2). Además, todo el conjunto mencionado se encuentra montado sobre la plataforma de ensayo (4). Asimismo, se consideró que para el diseño de estas (3) se tiene que sobredimensionar, para que no presenten alguna deformación en el ensayo mismo y generen resultados no deseados. La propuesta mencionada se puede apreciar en la figura 5.2.

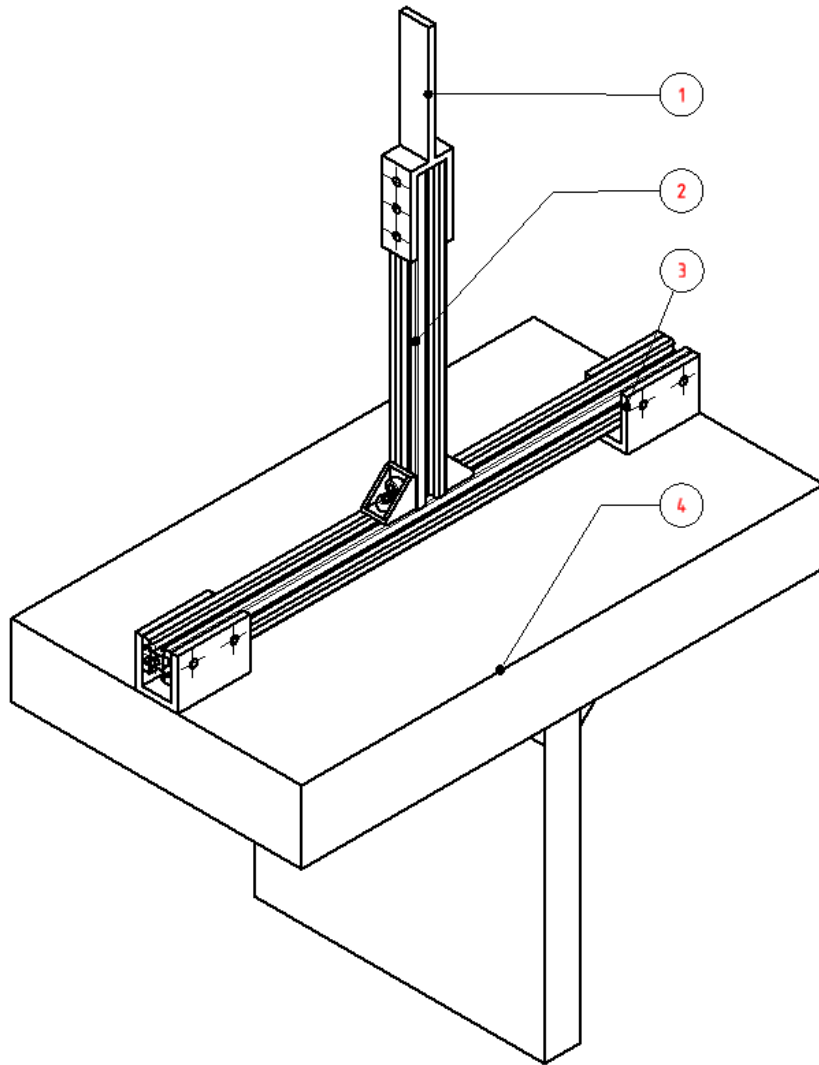


Figura 5. 2: Ensamble de la junta de perfiles y los elementos de sujeción máquina-plataforma de ensayo.
Fuente: Propia.

En la figura anterior se puede apreciar que el perfil inferior estará sujeto por abrazaderas en sus extremos (3), mediante pernos y tuercas cabeza de martillo M5 (8 unidades), que a su vez estará sujeta a la plataforma de trabajo, mediante uniones atornilladas (2 unidades por cada extremo). Asimismo, el perfil vertical estará sujeto al elemento de sujeción (1) por medio de pernos y tuercas cabeza de martillo M5 (6 unidades).

5.2 DESCRIPCIÓN Y TIPO DE MALLADO DEL MODELO COMPUTACIONAL

El modelo de unión no convencionales descritos anteriormente, se han implementado básicamente mediante tres partes fundamentales: Los perfiles de aluminio, la junta no convencional y los elementos de sujeción. Tal como se puede apreciar en la figura 5.2. Antes de desarrollar la simulación, se tiene en

cuenta el tipo de mallado que tendrá cada componente. Esto es muy importante para obtener resultados precisos en la simulación.

En todos los casos, cuanto mayor sea el número de elementos de la malla y menor sea el tamaño del objeto a trabajar, la solución obtenida será más precisa. Pero el tiempo de procesamiento se extenderá más. Por ello, el tipo de elemento a utilizar será los elementos 3D, esto porque dividen los diseños tridimensionales en elementos más pequeños que representarían esencialmente las formas geométricas. Estos diseños divididos, son comúnmente elementos de tipo hexaédricos y tetraédricos. En general, estos elementos son denominados como la estructura más alta en la jerarquía del mallado.

Para el mallado y la simulación se ha pensado utilizar ambos casos. Primero, se utilizará el elemento tetraédrico o elementos de cubierta de cuatro nodos (S4R) para la junta no convencional, esto porque estos elementos son muy adecuados para representar estructuras más complejas, tal como se puede precisar en este tipo de junta. Asimismo, para los perfiles, se trabajará con los elementos hexaédricos o elementos sólidos finitos de ocho nodos (C3D8R), estos pueden proporcionar resultados de simulación más precisos, pero no son adecuados para geometrías complicadas. En general, se utilizarán ambos elementos para la simulación de las uniones no convencionales mencionadas anteriormente.

5.2.1 Mallado de la Unión Tipo Escuadra

Como se ha definido anteriormente el tipo de malla a usar, se puede visualizar en la figura 5.3, el tipo de mallado de los diferentes elementos que componen este tipo de junta. Está constituido por elementos hexaédricos de 8 nodos, para el caso del perfil vertical (A) y el perfil horizontal (C). Asimismo, para la junta no convencional (B) y los elementos de sujeción (D), (E) se usaron elementos tetraédricos de 4 nodos.

Para poder desarrollar la simulación con un menor costo computacional se ha tomado en cuenta la simetría del modelo. Asimismo, se ha refinado la malla de las partes involucradas, con mayor énfasis en la unión, lo que nos permitirá obtener un resultado adecuado. Esto se muestra en la figura 5.4.

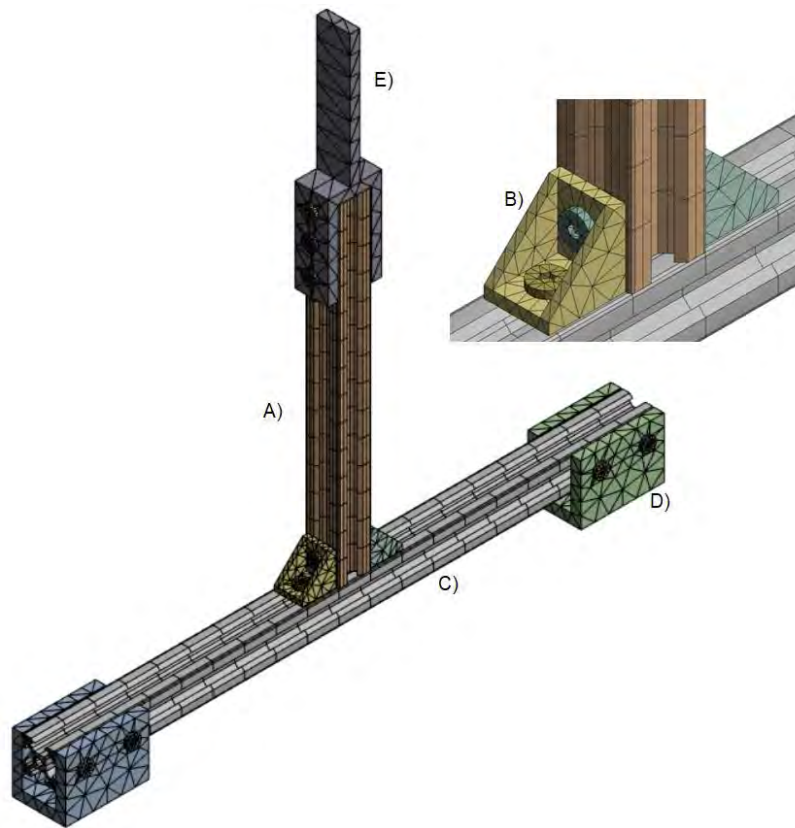


Figura 5.3: Mallado de la unión tipo escuadra. Fuente: Propia.

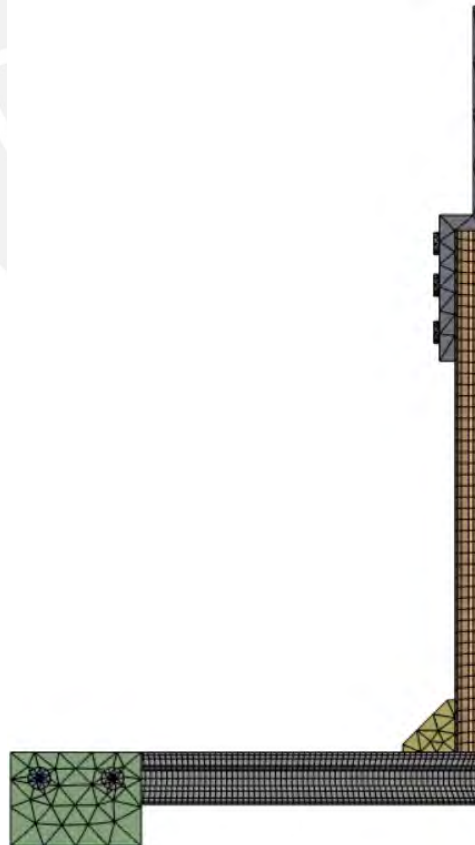


Figura 5. 4: Refinamiento del mallado con condición de simetría. Fuente: Propia.

5.2.2 Condiciones de contorno y contacto

Las condiciones de contorno se pueden visualizar en la figura 5.5, en los sujetadores inferiores, se ha asumido restringir la traslación de los 3 planos principales ($U_x=U_y=U_z=0$), como también las rotaciones en los ejes x, y e z ($U_{R_x}=U_{R_y}=U_{R_z}=0$). Además, el tipo de contacto que se ha definido entre el perfil horizontal y los sujetadores inferiores, son del tipo no separación, dado que posiblemente exista desplazamiento en la dirección del eje z ($U_x=U_y=0$). Como también, para los contactos entre el canal y las tuercas cabeza de martillo se ha definido como el contacto anterior. Por otro lado, el tipo de contacto entre la cabeza de la tuerca y el elemento de sujeción, se ha definido como un contacto fijo o tipo bonded. En la figura 5.6 se puede ver las algunas zonas de contacto entre el sujetador y el perfil de aluminio, tal como se ha expresado líneas arriba.

La condición de apoyo entre el perfil horizontal de aluminio y parte de la junta no convencional (bracket) se definió como un contacto de no separación, dado que existirá un posible deslizamiento en dirección horizontal, mas no una separación en la dirección normal. Asimismo, tanto para el perfil horizontal y vertical, se ha definido como contacto tipo Rough o áspero, dado que se ha considerado una interacción superficie-superficie y para este caso si existe una separación en la dirección normal, mas no deslizamiento. Dentro de ello se encuentran las tuercas cabeza de martillo que está en contacto con el canal del perfil, para ello se ha definido el tipo de contacto de no separación, es decir, que existirá un desplazamiento en la dirección tangencial (entre ambas superficies), mas no una separación en la dirección vertical o normal.

Por otra parte, se consideró el contacto entre el perfil vertical y el bracket como contacto de tipo frictional, debido a que al exceder el esfuerzo cortante que soporta, las dos geometrías deslizaran y es por ello que se necesita del coeficiente de fricción entre ambas superficies. Para ello, se calculó anteriormente (acápite 4.6.1) dichas constantes para poder insertar este valor en la simulación. Además, se consideró el tipo de contacto bonded entre la tuerca cabeza de martillo y el perno, dado que será una unión fija. Por último, el tipo de contacto usado para el sujetador superior se han considerado como No separación, dado que se considera el deslizamiento en dirección tangencial, mas no la separación en dirección normal.

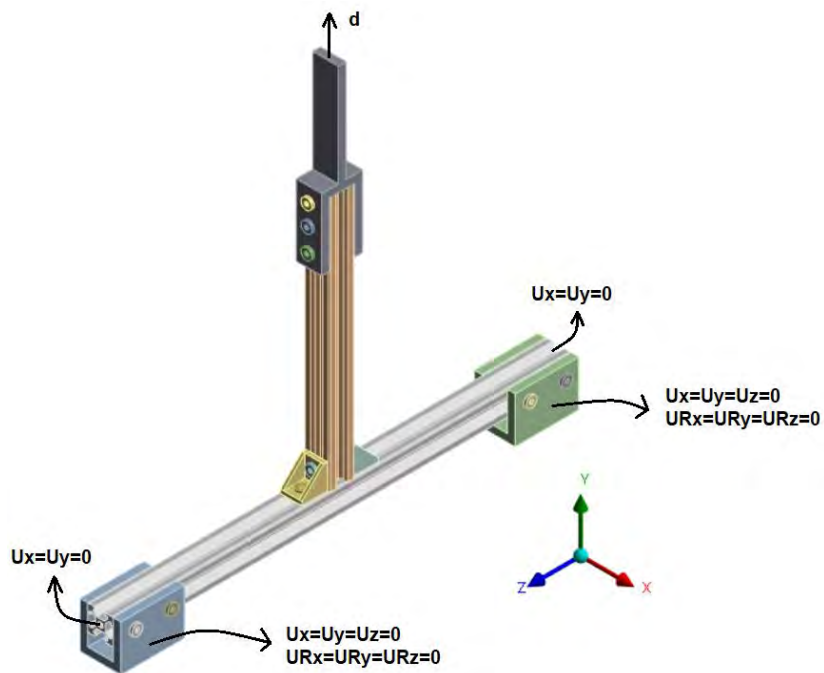


Figura 5.5: Condiciones de contorno. Fuente: Propia.

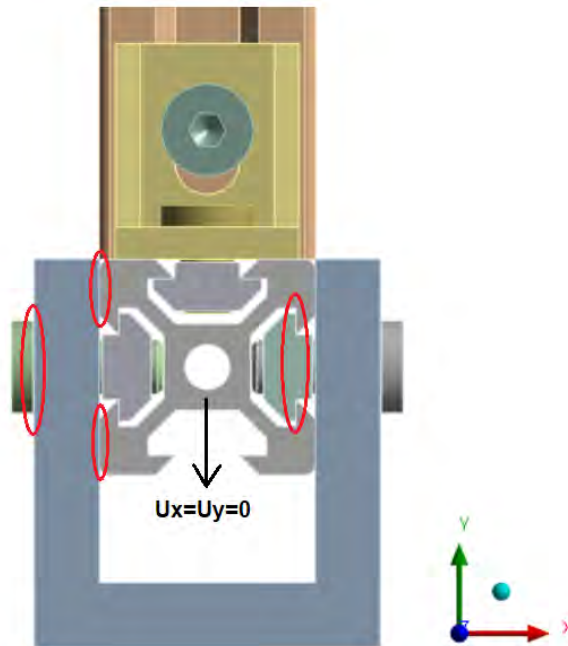


Figura 5.6: Elemento de sujeción inferior con algunas zonas de contacto. Fuente: Propia.

Por otro lado, en la figura 5.5 se puede apreciar que la carga (d) se aplicó en forma de desplazamiento uniforme a lo largo del eje Y [11]. Además, esta aplicado a la cara de la mordaza superior. Además, se ha puesto un desplazamiento para cada caso, tal como se muestra en la tabla 5.1, esto se muestra como d_{total} . Para poder apreciar la proporcionalidad de las deformación

o desplazamientos existentes en la unión respecto a la carga que ha sido traccionado.

5.3 PARÁMETROS IMPORTANTES Y RESULTADOS DEL MODELO COMPUTACIONAL

Para poder realizar la simulación se tuvo en cuenta la fuerza de montaje del tornillo (pretensión) que se obtiene a partir del momento medido por el torquímetro, para que luego poder determinar el coeficiente de fricción como se detalla en el inciso 4.6 (parte analítica). Como también, es fundamental e importante el d_{total} , dado que será la carga aplicada en la simulación. Estos valores se muestran en la tabla 5.1.

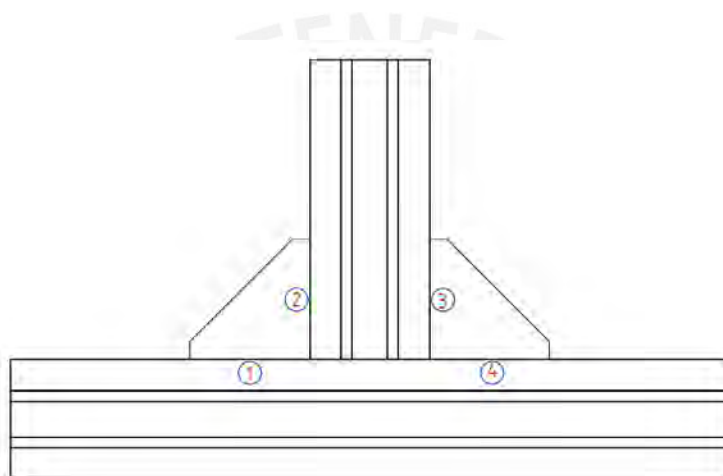


Figura 5.7: Disposición de los momentos medidos. Fuente: Propia.

En la figura 5.7 se puede apreciar el orden de cómo se han medido los momentos, tal como se muestra distribuido en la tabla debajo (tabla 5.1). Asimismo, todos los parámetros mencionados en el párrafo anterior con todos los valores determinados y obtenidos de las pruebas experimentales.

Tabla 5.1: Parámetros necesarios para el modelo. Fuente: Propia.

Orden de Ensayo	Fuerza máx de tracción (N)	$d_{total}(mm)$	Momento torsor de Ajuste medido(N.m)				Fuerza de montaje (N)				Fuerza Montaje-simetría (N)		Coeficiente de Fricción
			1	2	3	4	1	2	3	4	Promedio 1-4	Promedio 2-3	
Primera Prueba	4459	13.274	7.08	7.57	8.52	7.20	3888.37	4157.48	4679.22	3954.27	3921.32	4418.35	0.374
Segunda Prueba	3689	11.402	7.21	8.63	7.87	8.61	3959.76	4739.63	4322.24	4728.65	4344.21	4530.94	0.325
Tercera Prueba	3972	10.536	8.88	8.95	8.24	9.05	4876.94	4915.38	4525.44	4970.30	4923.62	4720.41	0.303
Cuarta Prueba	4367	12.780	9.46	7.95	8.94	10.01	5195.47	4366.17	4909.89	5497.54	5346.50	4638.03	0.332
Quinta Prueba	4405	12.385	6.95	8.18	7.94	9.49	3816.971	4492.49	4360.683	5211.95	4514.46	4426.59	0.342
Sexta Prueba	4327	10.290	9.46	8.39	8.51	9.64	5195.474	4607.82	4673.729	5294.33	5244.90	4640.78	0.310
Septima Prueba	4093	10.462	8.45	8.31	7.61	8.41	4640.777	4563.89	4179.445	4618.81	4629.79	4371.67	0.326
Octava Prueba	4134	9.098	7.98	8.43	8.48	8.75	4382.651	4629.79	4657.253	4805.54	4594.09	4643.52	0.290
Promedio	4180.75	11.278	8.18	8.30	8.26	8.90	4494.55	4559.08	4538.49	4885.17			

Para poder realizar el modelo de la probeta, así como de los elementos de sujeción se ha usado el software INVENTOR, que luego se exporto a el formato

compatible del software ANSYS y así poder realizar la simulación pertinente. De esto último, en la figura 5.8, se muestra los resultados de la primera prueba. En ello, podemos notar en a) se somete a la probeta(modelo) a una deformación ($d_{total}=13.27\text{mm}$) y como resultado se obtiene la deflexión en el perfil horizontal (b) que se detalla como d_{max} en la tabla 5.2. Por otro lado, el resto de resultados obtenidos de este capítulo se mostrarán en el ANEXO.

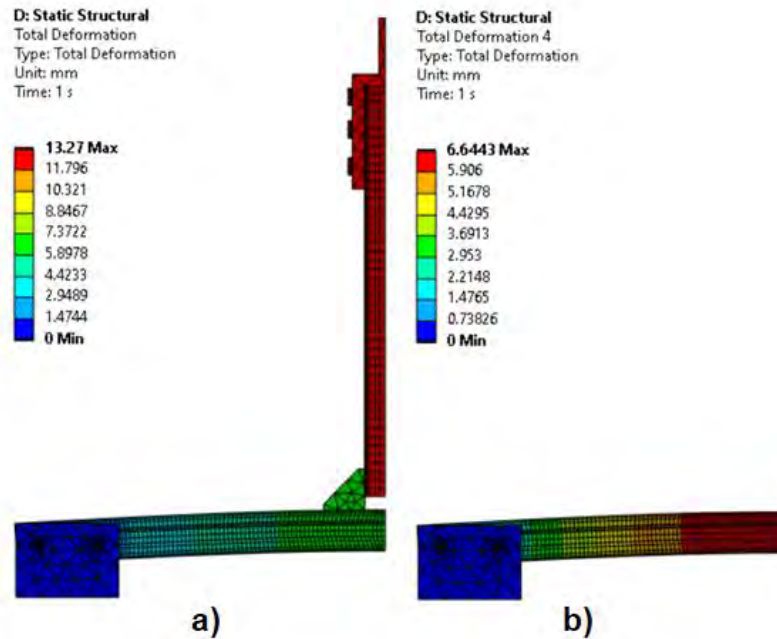


Figura 5. 8: Resultados de la primera prueba a) carga d_{total} , b) $d_{m\acute{a}x}$ determinada. Fuente: Propia.

Para poder validar si la carga aplicada como desplazamiento uniforme en la simulación es la misma obtenida por la máquina de tracción, se determinó computacionalmente la curva de fuerza vs deformación, tal como se muestra en la figura 5.9.

Los resultados que se pueden apreciar en la figura debajo, nos indica que las condiciones de borde, contacto que se usaron para el modelado y simulación computacional están aproximadas a los resultados obtenidos experimentalmente. Para la primera prueba, se usó como carga el desplazamiento (d_{total}) de 13.274, de esto se obtuvo como fuerza máxima de 4455.3 N, la cual se aproxima al obtenido al experimental que es de 4459.07 N.

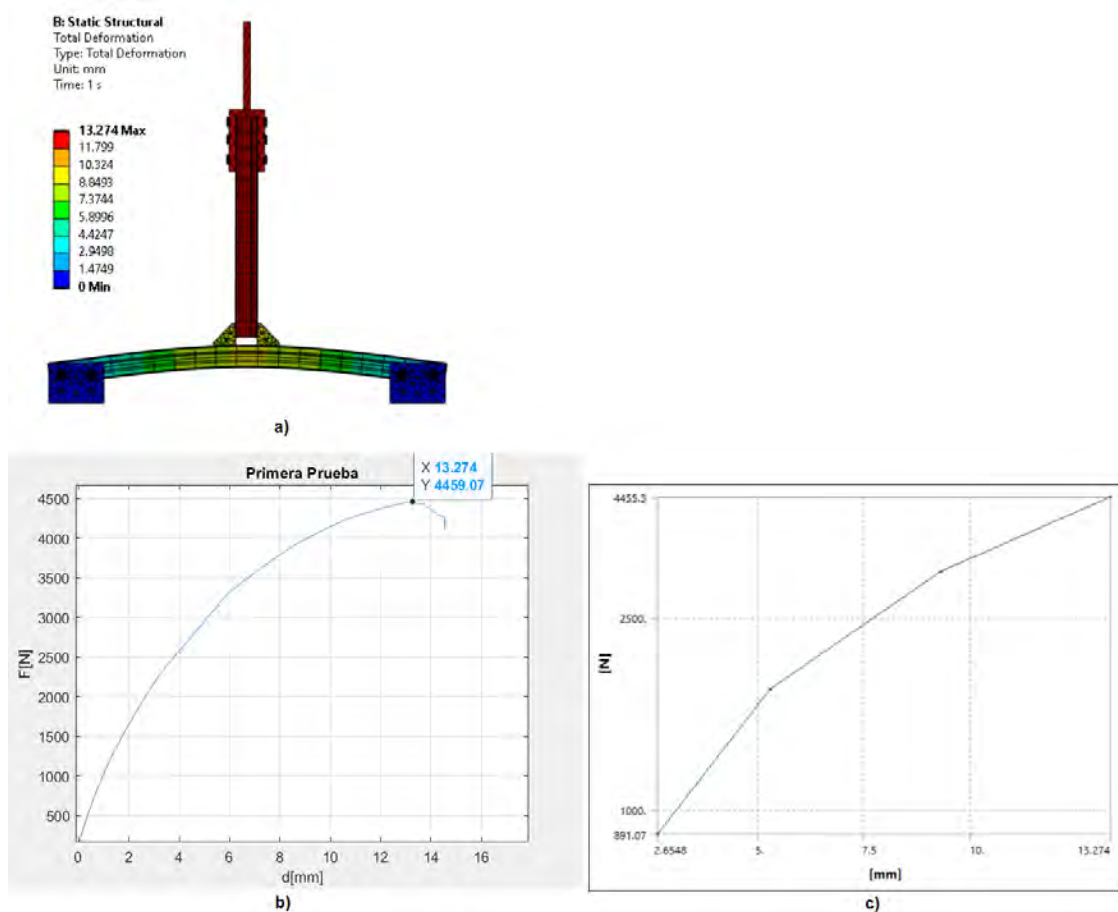


Figura 5.9: a) modelo computacional completo primera prueba, b) Curva de fuerza vs deformación (d_{total}) experimental, c) Curva de fuerza vs deformación (d_{total}) computacional.

Como se puede apreciar de la figura anterior, las curvas tanto el experimental (b) y computacional (c) (discretizado) poseen una tendencia similar. El margen de error respecto a la fuerza máxima para la deformación (d_{total}) es del 0.08%. En esta parte se está presentando los resultados de la primera prueba, pero en el capítulo de ANEXOS se mostrarán las restantes. Asimismo, todos los resultados se muestran en la tabla 5.3.

5.4 RESULTADOS ANALÍTICO VS EXPERIMENTAL VS COMPUTACIONAL.

En esta sección se detalla la comparativa entre los tres resultados obtenidos, ya sea el teórico, experimental y computacional que se detalla en la tabla 5.2. Asimismo, se muestra los márgenes de error obtenidos para los distintos casos. El primero, se detalla una comparativa entre los resultados obtenidos (experimental/simulación), esto se hizo con la finalidad de poder verificar el modelo computacional y la calibración de este, respecto al caso experimental (real), y poder verificar que tan próximo está el diseño del modelo respecto al

caso real. El segundo, se detalla el caso experimental/analítico, al igual que el caso anterior se toma como referencia los resultados experimentales, para poder tratar de comprobar u objetar las predicciones teóricas y como se puede apreciar en la tabla, presenta un mayor margen. Debido a que, el análisis teórico considera el comportamiento físico muy idealizado y por ende resulta un mayor error. El tercero, se aprecia el caso simulación/analítica para poder verificar que tan cercano está el modelo numérico respecto al caso ideal.

Tabla 5. 2: Resultados generales analítico, experimental y computacional. Fuente: Propia.

Orden de prueba	Fuerza Máx (N)	dtotal(mm)	Deformaciones (dmáx) (mm)			Margen de Error		
			Analítica	Experimental	Simulación	% Error (Experimental/Simulación)	% Error (Experimental/Analítica)	% Error (Simulación/Analítica)
Primera Prueba	4459	13.274	5.858	7.329	6.644	9%	20%	12%
Segunda Prueba	3989	11.402	5.241	5.732	5.921	-3%	9%	11%
Tercera Prueba	3972	10.536	5.218	6.264	5.752	8%	17%	9%
Cuarta prueba	4367	12.780	5.737	6.471	6.194	4%	11%	7%
Quinta Prueba	4405	12.385	5.787	6.503	6.088	6%	11%	5%
Sexta prueba	4327	10.290	5.685	5.292	5.787	-9%	-7%	2%
Séptima prueba	4093	10.462	5.377	5.166	5.626	-9%	-4%	4%
octava prueba	4134	9.098	5.441	5.025	5.411	-8%	-8%	-1%
Promedio	4218.25	11.278	5.543	5.973	5.928			

De la tabla anterior, los valores de la parte analítica se han calculado por medio de las ecuaciones obtenidas en el inciso 3.5. Para ello, se tomó en cuenta la longitud efectiva ($L_{ef} = 282 \text{ mm}$). De esto, se puede obtener una relación de la deflexión (valor experimental) y la longitud (L_{ef}), es decir se tendría una

relación aproximada de $\left(\frac{d_{máx}}{L_{ef}} \approx \frac{1}{47} \right)$, quiere decir que por cada 47 mm de

longitud efectiva se deflectara 1 mm de perfil de aluminio, sometido a una fuerza máxima aproximada de 4200N. Esta relación, es del 2%, quiere decir que, de una longitud efectiva de 282 mm, se va a deflectar aproximadamente 6mm el perfil horizontal.

El deslizamiento del perfil vertical es la diferencia entre dtotal y dmax(experimental), lo que sería aproximado en promedio 5.3mm. Por lo que se tendría una relación entre el deslizamiento perfil vertical y la deflexión de la viga

horizontal, es decir, se tiene $\left(\frac{d_{deslizamiento}}{d_{máx(deflexión)}} = \frac{5.305}{5.973} \approx \frac{1}{1.12} \right)$. De esto, se

podría tener una tendencia aproximada, donde por cada milímetro de deslizamiento se deflecta la viga 1.12 mm.

La relación entre la fuerza y los resultados experimentales en algunos casos no presenta una tendencia directa, debido a diversos factores, tal es el caso de la posición y ubicación del LVDT, las imperfecciones de fabricación de los sujetadores para la mordaza superior, la no uniformidad de lijado en los distintos Brackets, los defectos de fabricación de los perfiles y bracket, etc.

En la tabla 5.3 se tiene los valores de las fuerzas máximas obtenidas mediante la simulación, este nos permite validar que las fuerzas obtenidas por medio experimental tengan un valor aproximado al realizado en la simulación y por medio de esto poder comprobar que las condiciones computacionales para la simulación están desarrolladas correctamente. Asimismo, el margen de error está por debajo del 1% en general, lo que es indicativo que la condición tomada como carga al desplazamiento uniforme mostrada en la figura 5.5, esta correcta.

Tabla 5.3: Validación computacional de la fuerza máxima de tracción. Fuente: Propia.

dtotal(mm)	Fmáx(N) (experimental)	Fmáx(N) (simulación)	%Error
13.274	4459	4455.3	0.08%
11.402	3989	3988.4	0.02%
10.536	3972	3964.9	0.18%
12.780	4367	4361.1	0.14%
12.385	4405	4401.0	0.09%
10.290	4327	4318.6	0.19%
10.462	4093	4090.6	0.06%
9.098	4134	4107.2	0.65%

En la figura 5.10 se muestra la comparación entre los resultados experimental-computacional(simulación). En esta se puede verificar que la tendencia de la curva de la simulación respecto a la experimental es aceptable con un margen de error de $\pm 9\%$, tal como se muestra en la tabla 5.2. Este porcentaje, posiblemente se den a rasgos físicos que no se han considerado en el modelo, tal es el caso de imperfecciones de fabricación que tengan las tuercas cabeza de martillo, algunas imperfecciones (defectos en el proceso de extrusión) en los canales de los perfiles v-slot, la rugosidad no considerada entre la cara del perfil horizontal y el bracket.

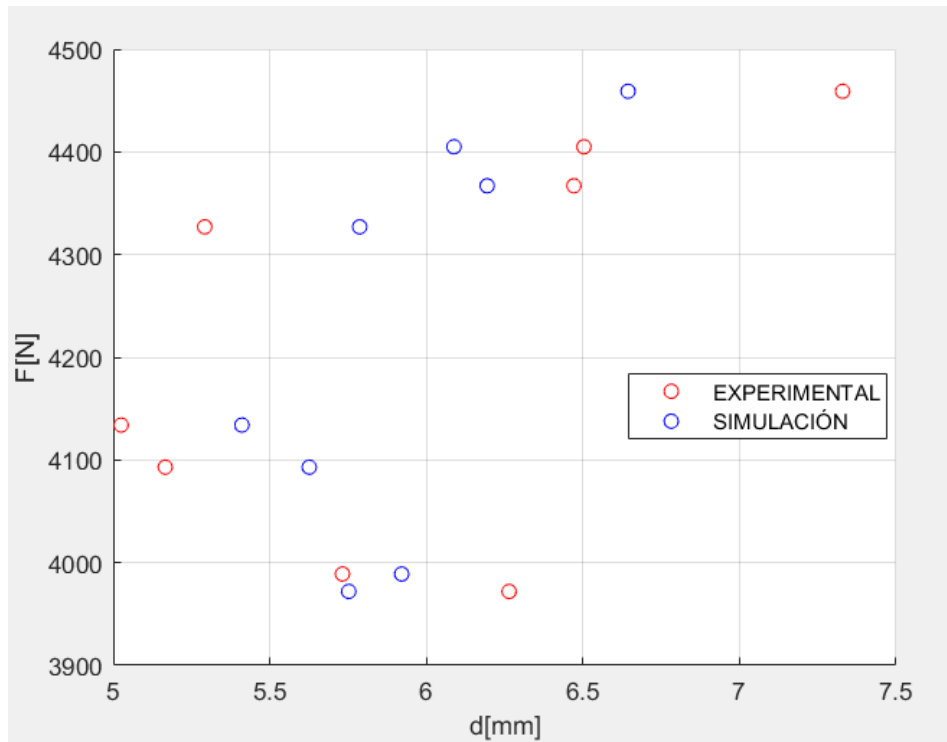


Figura 5.10: Resultado experimental vs Computacional (simulación) de las 8 pruebas principales. Fuente: Propia.

Según el catálogo del fabricante de los perfiles v-slot, la máxima carga que soporta las aletas del canal es como máximo 500N, tal como se puede apreciar en la figura 5.11, pero constando los valores obtenidos, tal como se muestra en la tabla 5.2. Sobrepasa dicho valor, en este caso se tomaría la mitad (2 pernos usados en la junta) de la fuerza máxima de tracción, que sería

$$(F_{resistencia} = \frac{F_{máxtracción}}{2} \approx 2090 N)$$

Es prácticamente 4 veces más resistente de lo que menciona el fabricante en los datos técnicos del perfil.

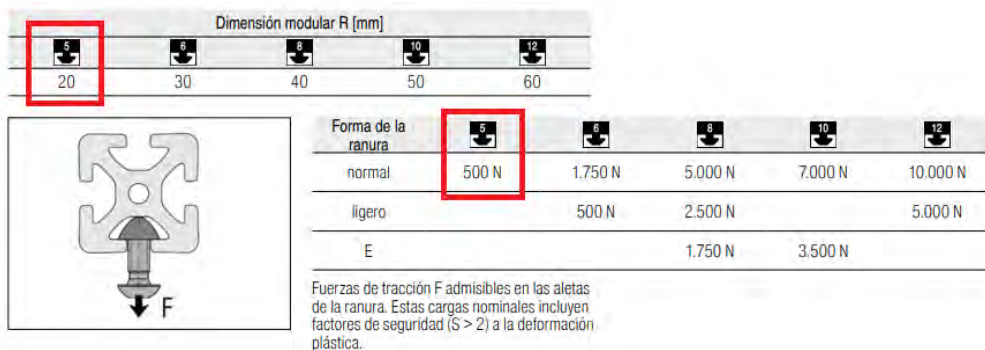


Figura 5.11: Datos técnicos del perfil v-slot. Fuente:[30]

En la figura 5.12 se puede observar la deflexión máxima ($d_{m\acute{a}x}$) que ocurre en el perfil horizontal de aluminio, esta se da cuando se llega a una fuerza máxima de tracción ($F_{m\acute{a}x}$). Sin embargo, cuando se deja de traccionar, el perfil tendera a recuperarse elásticamente (d_{rec}) hasta que queda llega a una deformación final sin recuperación (d_{final}). Este último parámetro es importante, dado que dependerá si el perfil pueda o no ser reusado para otras actividades. En la tabla, 5.4 se muestran los valores medidos de cada probeta utilizada.

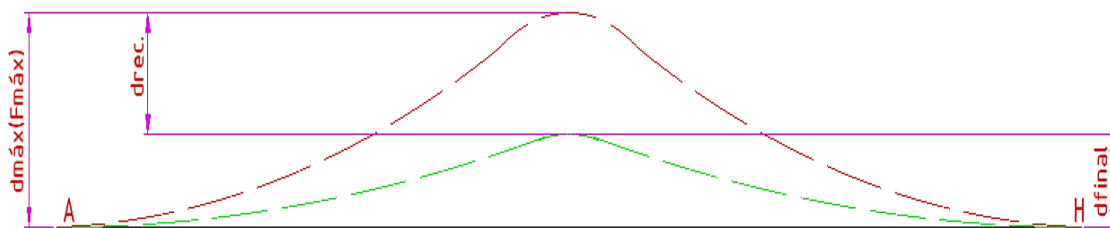


Figura 5. 12: Deformaciones en el perfil horizontal. Fuente: Propia.

Tabla 5. 4: Deflexiones presentes en el perfil horizontal. Fuente: Propia.

Orden de prueba	Fuerza Máx (N)	$d_{m\acute{a}x}$ (mm)	d_{rec} (mm)	d_{final} (mm)
Primera Prueba	4459	7.329	5.25	2.08
Segunda Prueba	3989	5.732	2.25	3.48
Tercera Prueba	3972	6.264	3.25	3.01
Cuarta prueba	4367	6.471	5.00	1.47
Quinta Prueba	4405	6.503	5.00	1.50
Sexta prueba	4327	5.292	3.25	2.04
Séptima prueba	4093	5.166	4.00	1.17
octava prueba	4134	5.025	3.50	1.53
Promedio	4218.25	5.973	3.938	2.035

Como se puede observar en la tabla 5.4, la deformación final (deflexión) sin recuperación elástica en promedio es de 2.035mm, esto quiere decir que el perfil de aluminio se encuentra deformado y no podría ser reusado posteriormente. Ante ello, para no llegar a este caso, el usuario/fabricante deberá someter al perfil a una carga máxima de 2780 N (aproximado), para que así el perfil pueda recuperarse en su totalidad luego de estar sometido a dicha carga, es decir el d_{final} deberá de ser 0 mm, después de quitar la carga(tracción).

6 CONCLUSIONES

Se ha realizado con éxito el análisis del comportamiento mecánico de la junta tipo escuadra, para ello se desarrolló el estudio teórico, computacional y experimental en las juntas no convencionales (unión tipo escuadra). De esto se llegó a identificar que antes de que falle la junta, se deflectaba el perfil horizontal y el bracket no sufría ningún daño. Caso contrario, quien luego fallaba por la acción de la fuerza de tracción eran las tuercas cabeza de martillo. Esto último, dio un giro para el análisis general de la junta, por que inicialmente se suponía quien fallaría sería el bracket, pero con las pruebas iniciales se pudo constatar que no ocurría este caso, por lo que el análisis se enfocó en el efecto que traía consigo la resistencia de la junta, que era la deflexión del perfil horizontal y la pronta falla de la tuerca.

El sustento analítico y computacional no hubieran sido suficiente para esta investigación sin un sustento real (experimental) y viceversa. Los primeros intentan dar una explicación aproximada del comportamiento mecánico, mas no toman en cuenta los factores reales. Consecuentemente, los modelos computacionales desarrollados para esta investigación, es de vital importancia porque están calibrados respecto a lo obtenido en la parte experimental, de modo que serviría para poder predecir si una junta pueda o no fallar por resistencia. Claro, teniendo en cuenta características similares de la junta y perfil seleccionados.

Una de las limitantes para que la tendencia entre las dos curvas experimental/simulación sea más fina, es la cantidad de ensayos, cuanto más grande sea el número de muestras, mayor será la aproximación entre ambos y el margen de error también disminuirá. Asimismo, existen limitantes del lado computacional, sobre todo en la cantidad de elementos tomados para el mallado, dado que se utiliza una versión educacional. En general, existen diversas situaciones que afectan los resultados, ya sea factores humanos, computacionales, cantidad de pruebas que estarán considerados dentro del margen de error.

La resistencia del canal de perfil de aluminio es mucho mayor a lo que se muestra en el catálogo del fabricante. Esto es indicativo de que falta aún estudios más

exhaustivos sobre estos tipos de perfiles, que a la larga solamente se podrían constatar o tener como referencia cuando se desarrollen pruebas experimentales.

El error de la simulación-experimental también se debe en gran medida, a que la precarga usada se usó el promedio, tal como se muestra en la tabla 5.1. Para poder implementar el modelo y usarla en las condiciones de simetría. Ese margen hubiera bajado, si el modelo se hubiera usado completamente, pero para reducir el costo computacional se tuvo que usar lo primero. Asimismo, la desigualdad de los valores de torque medido, se debe a que las cabezas internas (forma de allen) de los pernos se desgastaban (“robaba”) desigualmente y por ende se tenía un valor de torque diferente para cada probeta.

Se pudo validar lo propuesto en el modelo computacional, esto debido a que inicialmente la carga que se tomó como desplazamiento uniforme para cada ensayo, no se había verificado la carga real de tracción ($F_{m\acute{a}x}$). Por ello, se llevó a cabo la verificación por medio de la simulación y se llegó a verificar que la carga máxima traccionada (computacional) era coincidentemente similar a la carga traccionada obtenida experimentalmente ($F_{m\acute{a}x}$). Con ello, se llegó a concluir que lo realizado computacionalmente tiene concordancia a lo determinado experimentalmente.

La carga máxima que deberá someterse el perfil horizontal para que pueda reusarse es fundamental, dado que de ello dependerá que la unión no convencional no falle (tuercas cabeza de martillo), ya que estará por debajo de la $F_{m\acute{a}x}$ determinada experimentalmente. Asimismo, se puede verificar que aun teniendo en cuenta la carga para la recuperación del perfil, se encuentra por encima de lo que el fabricante detalla en el catálogo para estos perfiles de aluminio.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. Macillo, “Special Joint Systems for Aluminium Structures: Experimental Tests and Numerical Models,” *Universita degli Studi di Napoli Federico II*, 2013.
- [2] C. Zhang, G. Zhao, Z. Chen, H. Chen, and F. Kou, “Effect of extrusion stem speed on extrusion process for a hollow aluminum profile,” *ELSEVIER*, vol. 1, no. 19, p. 7, 2011, doi: 10.1016/j.mseb.2011.09.041.
- [3] Todolux, “EXTRUSIÓN DE ALUMINIO. PERFILES DESTINADOS AL SECTOR DE LA ILUMINACIÓN,” Todolux Company. [Online]. Available: <https://todo-lux.com/investigacion-y-desarrollo/extrusion-de-aluminio-perfiles-destinados-al-sector-de-la-iluminacion/>
- [4] A. Chondronasios, I. Popov, and I. Jordanov, “Feature selection for surface defect classification of extruded aluminum profiles,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 1, p. 9, 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7514-3.
- [5] F. M. Neuhauser, G. Bachmann, and P. Hora, “Surface defect classification and detection on extruded aluminum profiles using convolutional neural networks,” *International Journal of Material Forming*, vol. 1, p. 13, 2020, doi: 10.1007/s12289-019-01496-1.
- [6] C. A. Marmolejo Castro, “Manual de Diseño de Estructuras de Aluminio,” UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2014.
- [7] T. Dokšanović, I. Džeba, and D. Markulak, “Applications of aluminium alloys in civil engineering,” *Tehnicky vjesnik - Technical Gazette*, vol. 24, p. 10, 2017.
- [8] M. Olabode, P. Kah, and J. Martikainen, “Aluminium alloys welding processes: Challenges, joint types and process selection,” *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, vol. 227, no. 8, pp. 1129–1137, 2013, doi: 10.1177/0954405413484015.
- [9] K. Paulsen, *Uniones Atornilladas*, vol. 20. 2016.
- [10] V. Macillo, L. Fiorino, and F. M. Mazzolani, “Pull-out behaviour of aluminium screw port joints: experimental and numerical investigation,” *IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 281–296, 2014, doi: 10.1080/19373260.2014.951405.
- [11] L. Fiorino, V. Macillo, and F. M. Mazzolani, “Mechanical behaviour of bolt-channel joining technology for aluminium structures,” *Constr Build Mater*, vol. 73, pp. 76–88, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.086.
- [12] SAPA, *Design manual.*, 1st ed. UK, 2007. doi: 10.1061/9780784409633.ch01.

- [13] ALU-STOCK, "Uniones Internas," Lontana Group. [Online]. Available: <https://www.alu-stock.es/es/aluminio-industria/accesorios-aluskit/uniones-internas/>
- [14] Sinerges, "Como unir perfiles de aluminio." [Online]. Available: https://www.sinerges.com/archivos/10287#La_union_universal_para_uniones_resposicionables_y_minimo_mecanizado
- [15] RK ROSE KRIEGER, "Perfiles de aluminio para aplicaciones pesadas BLOCAN." [Online]. Available: <https://www.rk-rose-krieger.com/espanol/productos/sistemas-de-perfiles-blocanr/heavy-duty-profiles-perfiles-para-aplicaciones-pesadas/>
- [16] Sinerges, "Sistema de Construcción Modular MB," SINERGES SAC. [Online]. Available: https://www.sinerges.com/wp-content/uploads/pdf/item_MB_ES.pdf
- [17] Sinerges, "Cómo unir perfiles de aluminio," Sinerges tecmon. [Online]. Available: https://www.sinerges.com/archivos/10287#La_union_universal_para_uniones_resposicionables_y_minimo_mecanizado
- [18] C. C. Menzemer, J. Deliwala, and J. R. Kissell, "Pull-out strength of self tapping fasteners in aluminum screw slot connections," *Light Metal Age*, vol. 66, no. 5, pp. 22–26, 2008.
- [19] J. Holmberg, "Static and Dynamic Behaviour of Bolt-channel Joints in Aluminium Structures," University of Karlskrona, 1998.
- [20] European Committee for Standardization (CEN), *EN 1991-1-1 - Eurocode 9 - Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules*. Bruxelles, 2007.
- [21] European Committee for Standardization (CEN), *EN 1991-1-4 - Eurocode 9 - Design of aluminium structures - Part 1-4: Cold-formed structural sheeting*. Bruxelles, 2007.
- [22] Hydal, *Extrusion Design Manual*, 1st ed. Vetlanda, 2019.
- [23] Universidad Católica Argentina, "Aluminio y sus aleaciones," in *Estudio y ensayo de materiales*, vol. 56, no. n, 2008, p. 19.
- [24] Cimech3D, "Riel lineal / Perfil aluminio (V-slot) 20×20 ," <https://www.cimech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x20-plateado/>.
- [25] Cimech 3D, "Angulo de unión 90 grados." [Online]. Available: <https://www.cimech3d.cl/producto/angulo-de-union-90-perfil-2020/>
- [26] RDP, "D5 & D6 LVDT Displacement Transducer," <https://www.rdpe.com/ex/d5-d6.htm>.
- [27] Torrod, "Momentos de Apriete."

- [28] Valvias, "Rosca Métrica DIN 13." Accessed: Aug. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.valvias.com/prontuario-rosca-metrica-din-13.php?m=5>
- [29] Gerdau Corsa, "MANUAL DE DISEÑO DE CONEXIONES," 2022, [Online]. Available: https://www.gerdaucorsa.com.mx/sites/mx_gerdau/files/PDF/MANUAL_DISE%C3%91O%20DE%20CONEXIONES_0.pdf
- [30] Item, "Datos Técnicos perfiles de aluminio," 2022, Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: https://catalog.item24.com/images/medienelemente/DOK/DATA/DOK_DATA_profil-tech-daten__SES__AIN__V2.pdf



ANEXOS

ANEXO A: RESULTADOS EXPERIMENTAL, COMPUTACIONAL

A.1 Segunda prueba

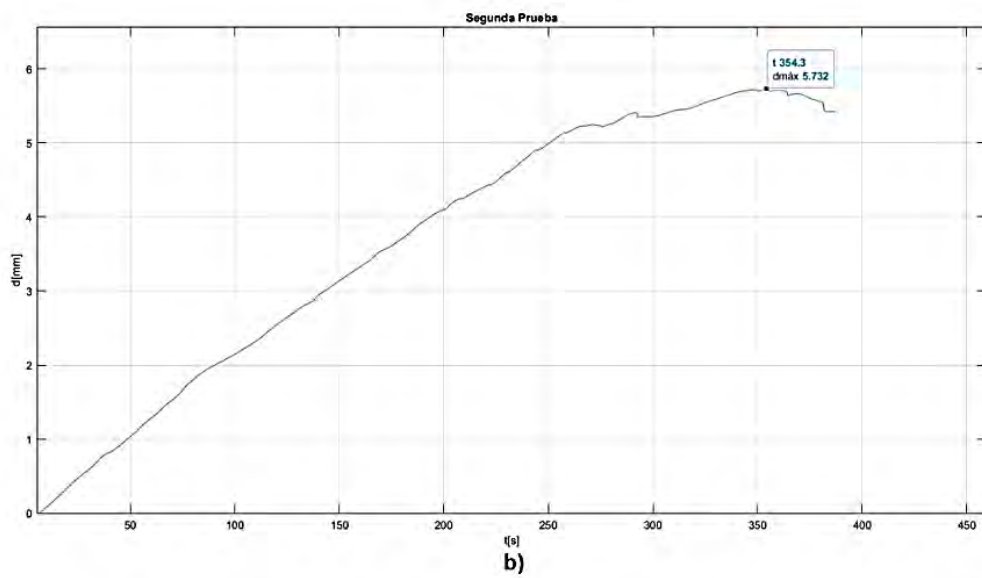
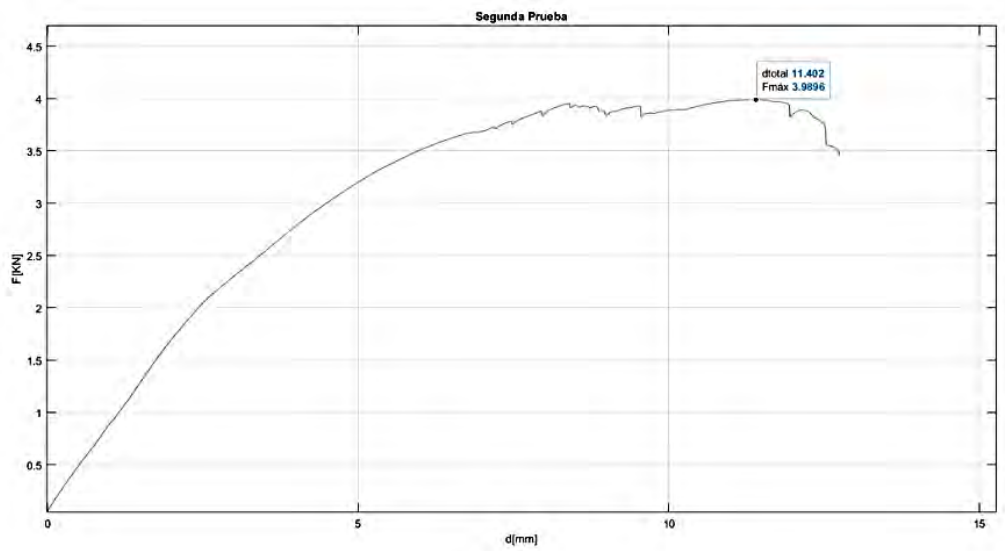


Figura A. 1:a) Curva de fuerza vs deformación (d_{total}), b) deformación ($d_{máx}$) vs tiempo(s) de la segunda prueba.

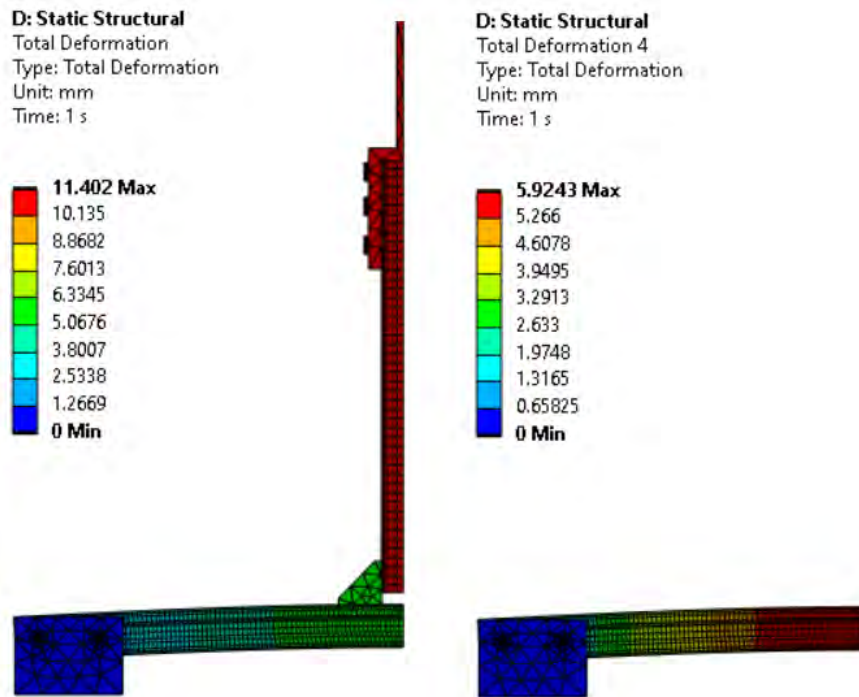


Figura A.2: Resultados de la segunda prueba a) carga dtotal, b) dmáx determinada.

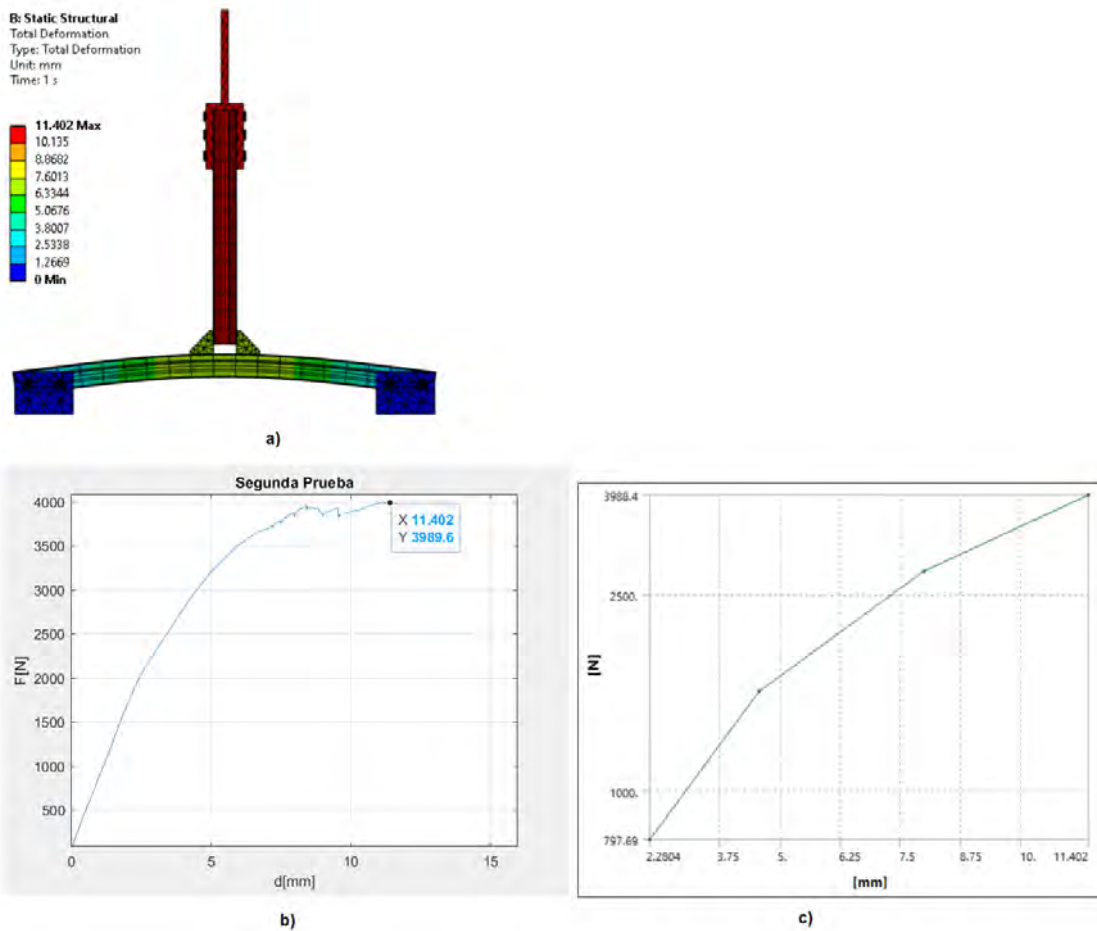


Figura A.3: a) modelo computacional completo segunda prueba, b) Curva de fuerza vs deformación (dtotal) experimental, c) Curva de fuerza vs deformación (dtotal) computacional.

A.2 Tercera prueba

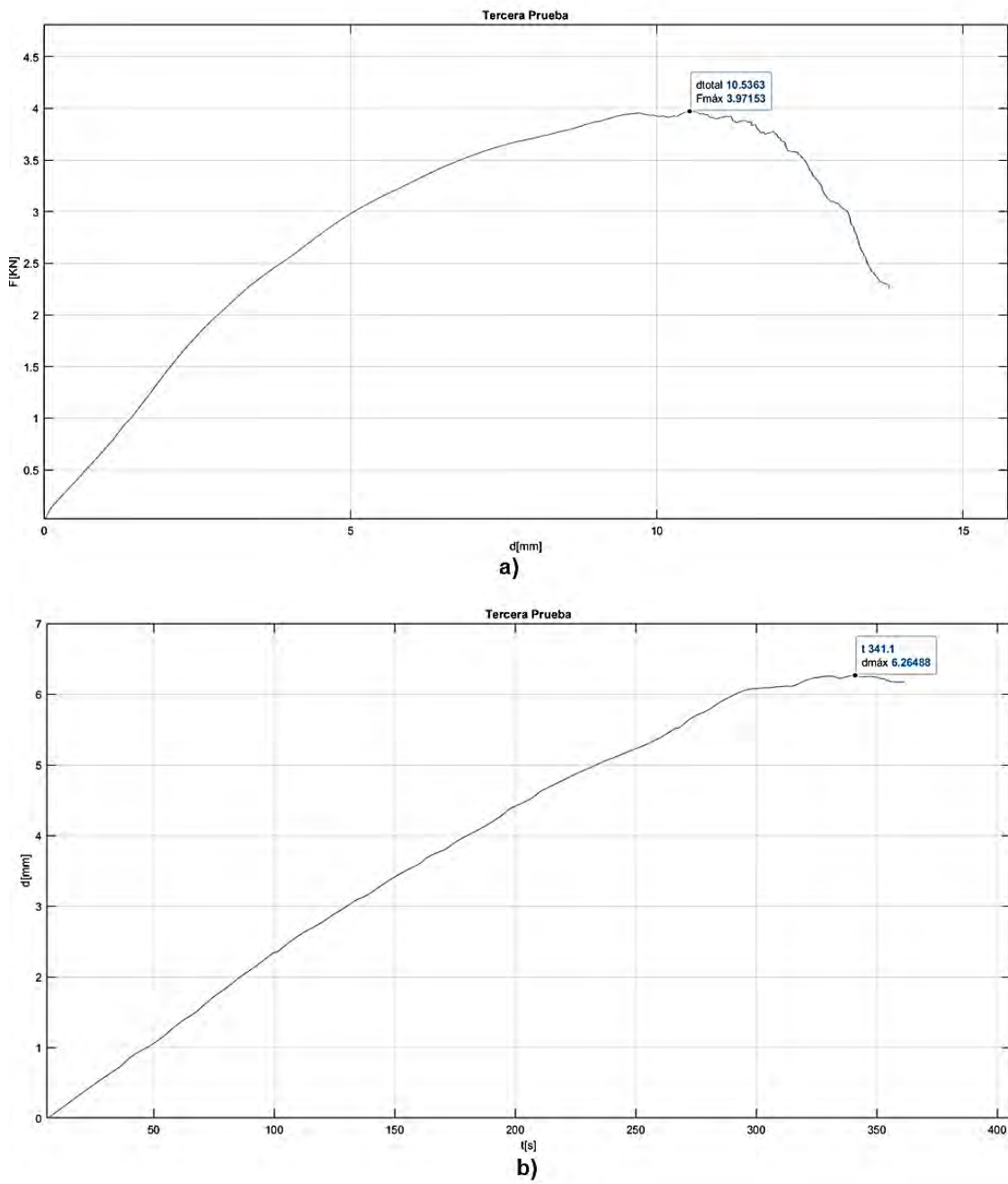
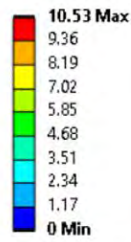


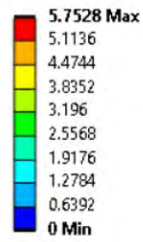
Figura A. 4: a) Curva de fuerza vs deformación (d_{total}), b) deformación ($d_{m\acute{a}x}$) vs tiempo(s) de la tercera prueba.

D: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



a)

D: Static Structural
Total Deformation 4
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



b)

Figura A.5: Resultados de la tercera prueba a) carga dtotal, b) dmáx determinada.

B: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s

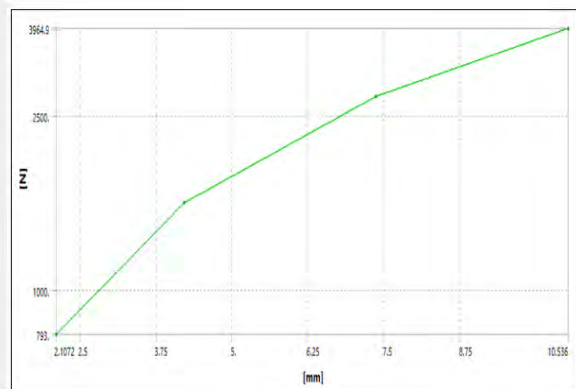
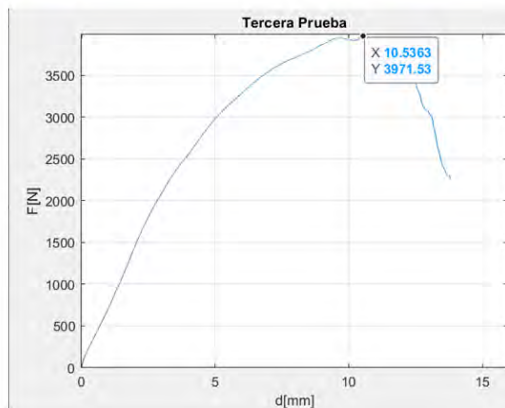
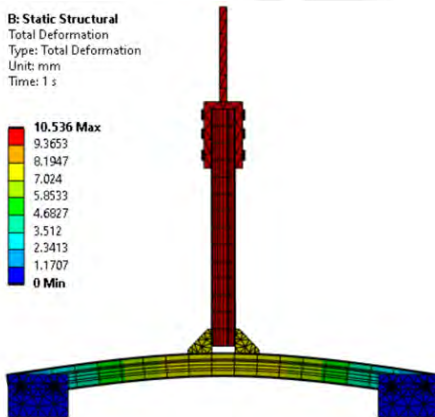
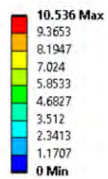


Figura A.6: a) modelo computacional completo tercera prueba, b) Curva de fuerza vs deformación (dtotal) experimental, c) Curva de fuerza vs deformación (dtotal) computacional.

A.3 Cuarta prueba

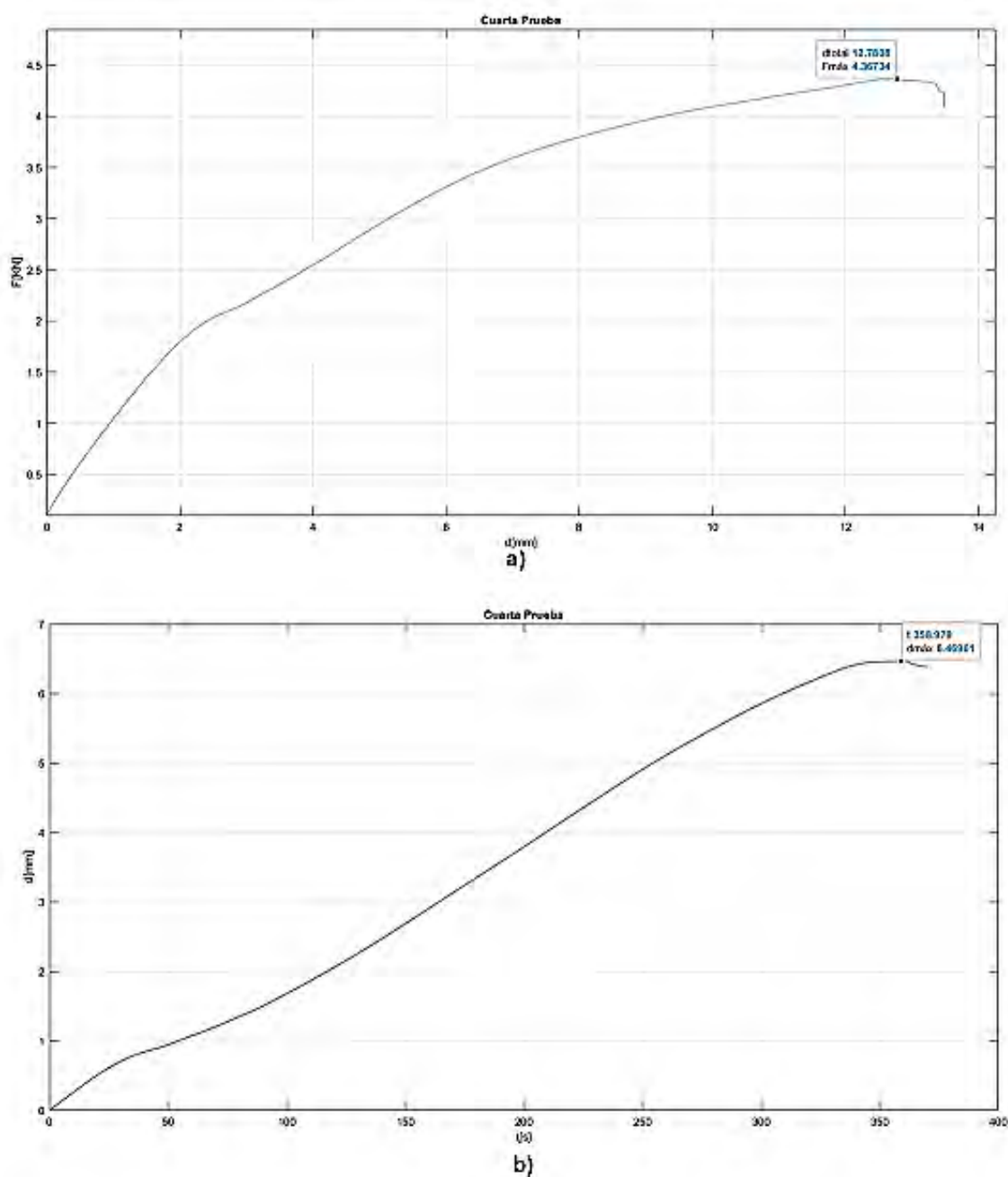


Figura A.7:a) Curva de fuerza vs deformación (d_{total}), b) deformación ($d_{m\acute{a}x}$) vs tiempo(s) de la cuarta prueba.

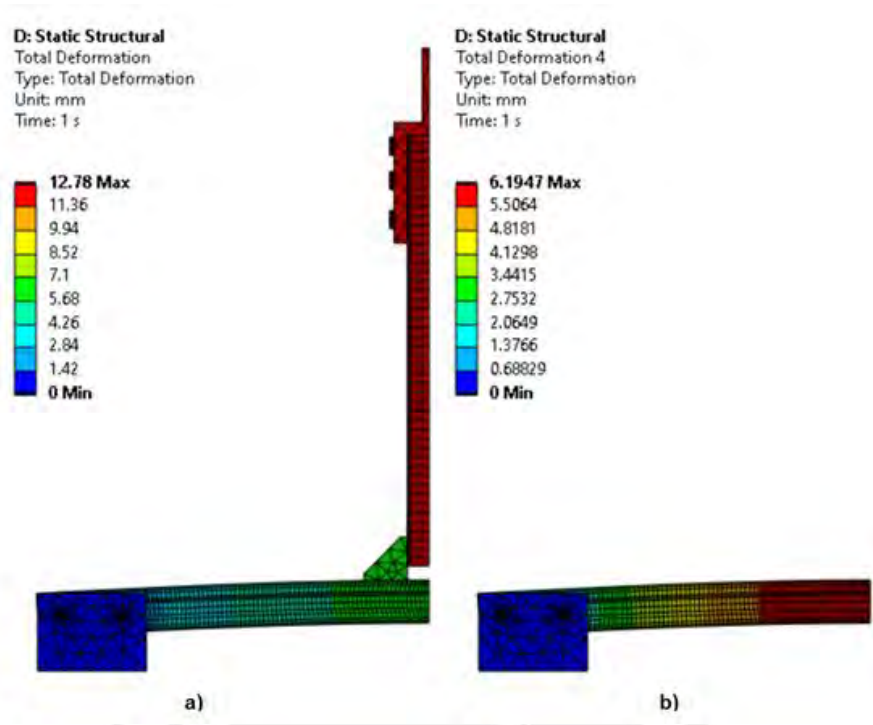


Figura A.8: Resultados de la cuarta prueba a) carga dtotal, b) dmáx determinada.

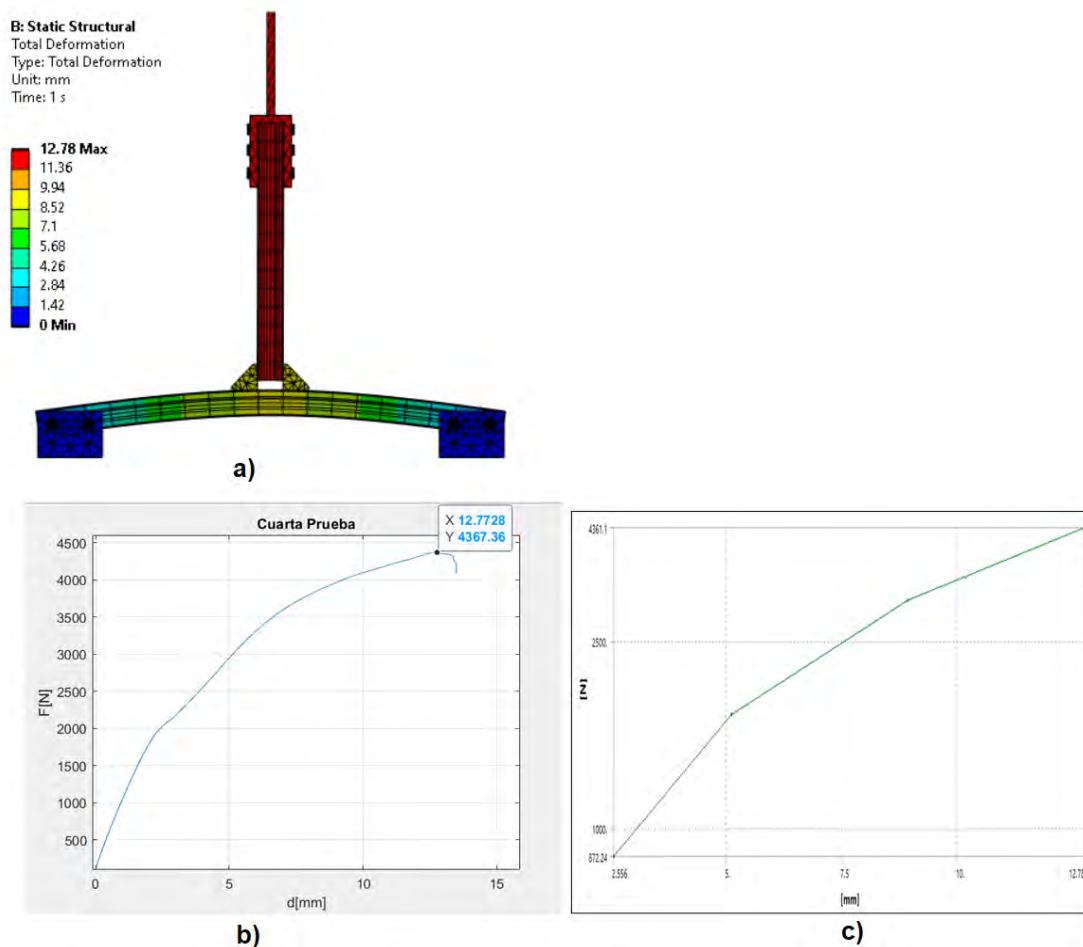


Figura A.9: a) modelo computacional completo cuarta prueba, b) Curva de fuerza vs deformación (dtotal) experimental, c) Curva de fuerza vs deformación (dtotal) computacional.

A.4 Quinta prueba

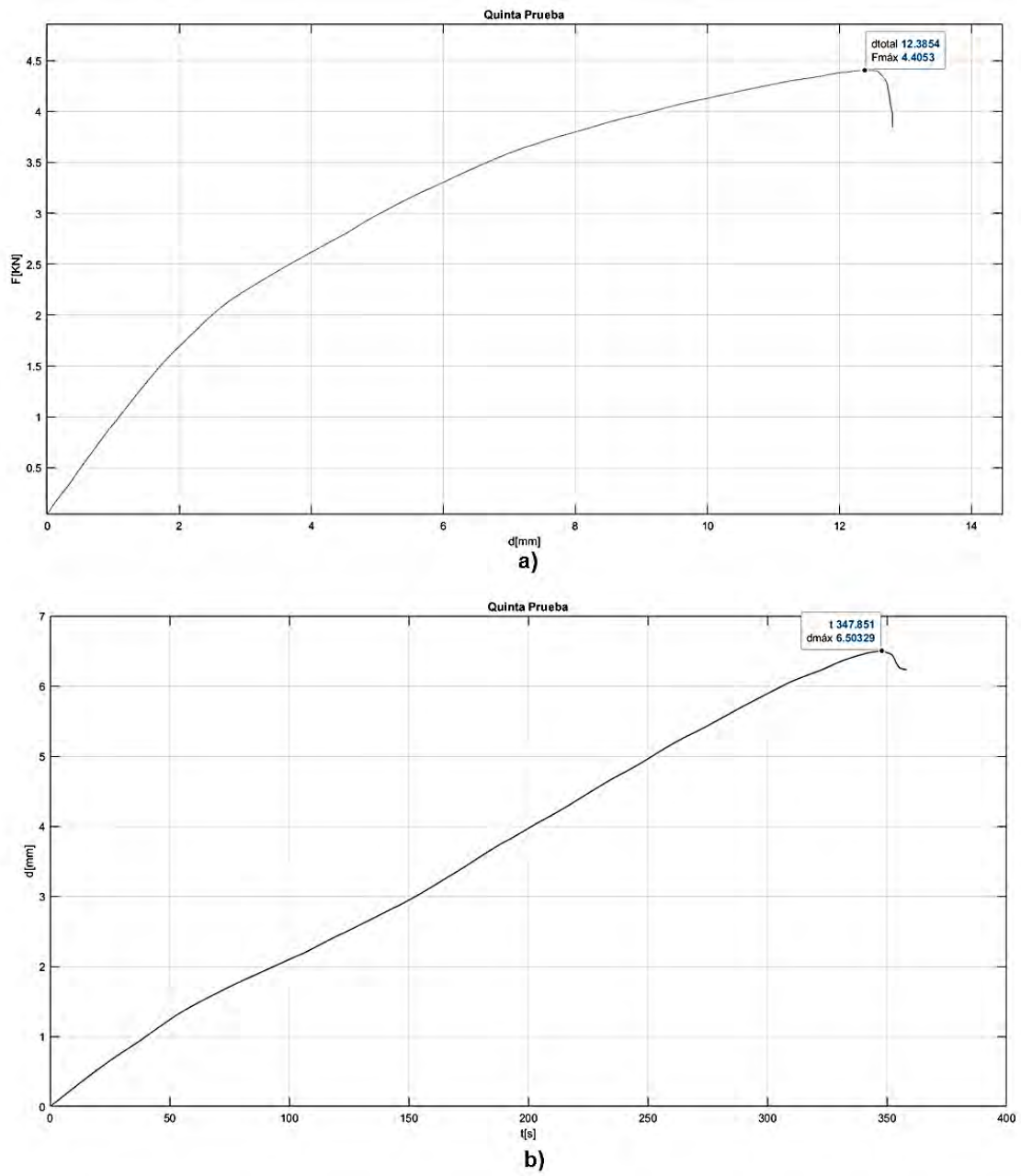


Figura A.10: a) Curva de fuerza vs deformación (d_{total}), b) deformación ($d_{m\acute{a}x}$) vs tiempo(s) de la quinta prueba.

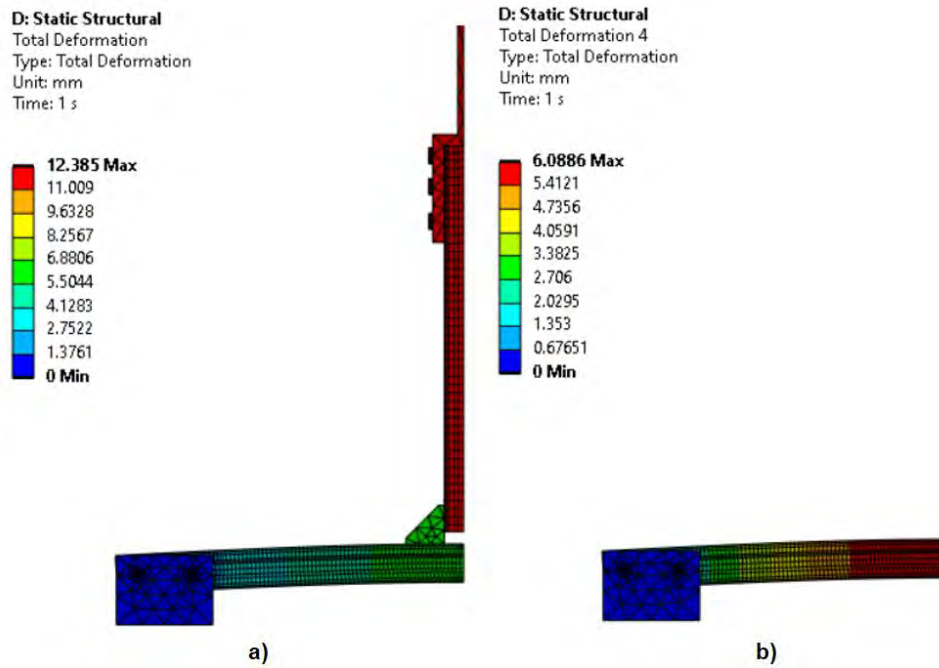


Figura A.11: Resultados de la quinta prueba a) carga dtotal, b) dmáx determinada.

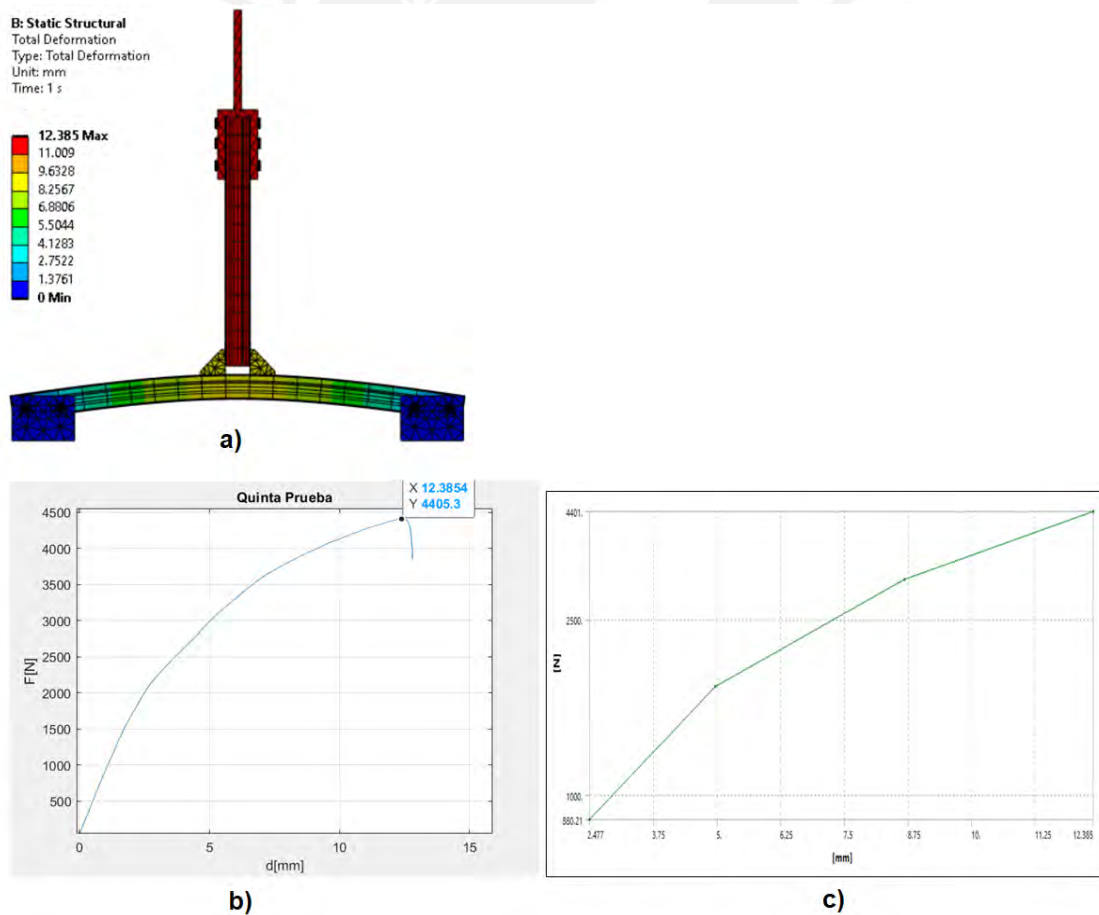


Figura A.12: a) modelo computacional completo quinta prueba, b) Curva de fuerza vs deformación (dtotal) experimental, c) Curva de fuerza vs deformación (dtotal) computacional.

A.5 Sexta prueba

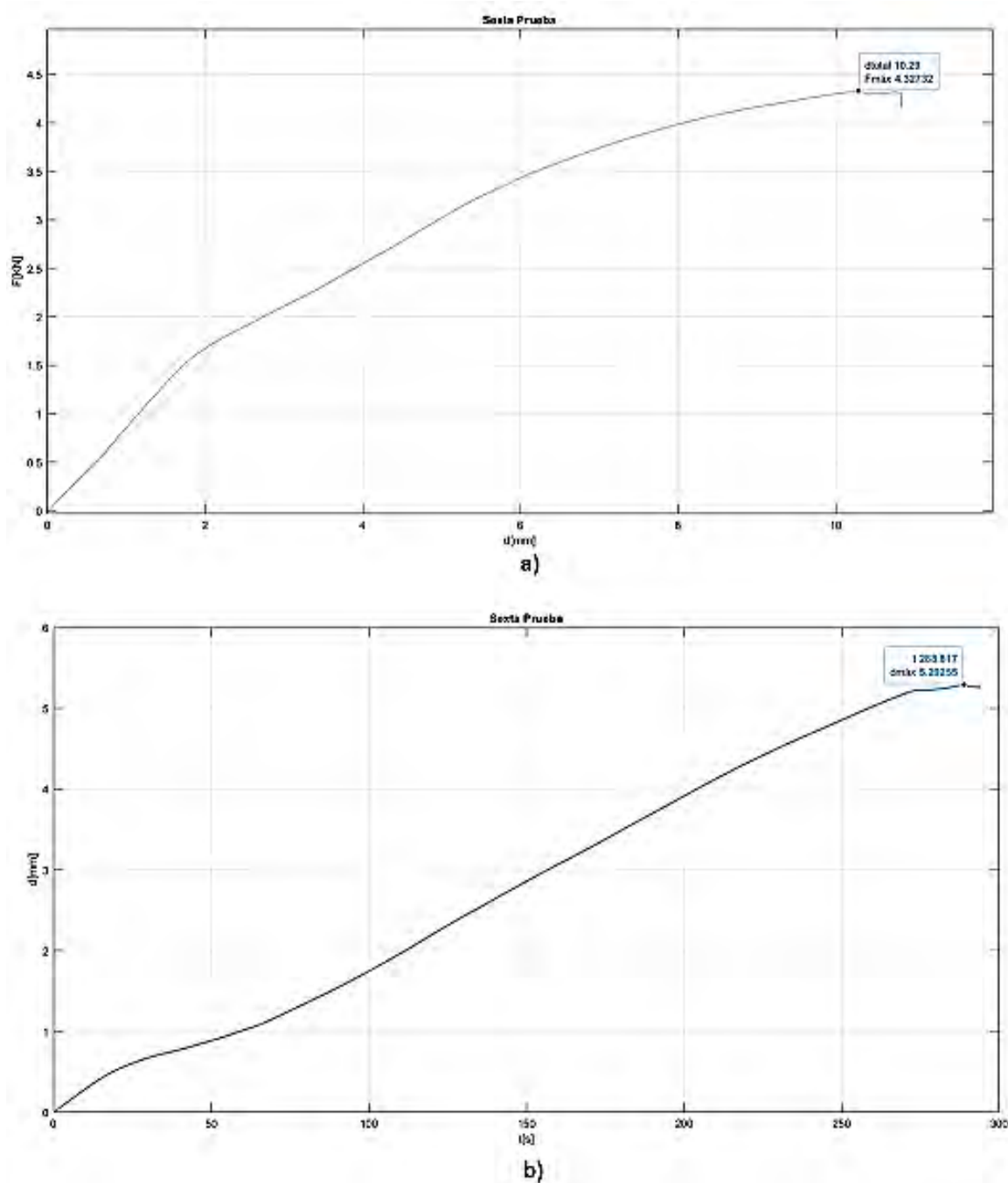
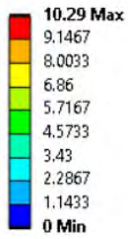


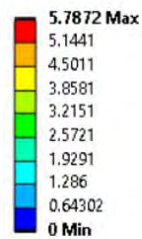
Figura A. 13:a) Curva de fuerza vs deformación (d_{total}), b) deformación ($d_{máx}$) vs tiempo(s) de la sexta prueba.

D: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



a)

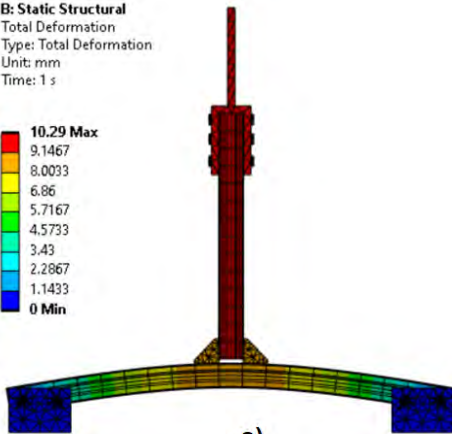
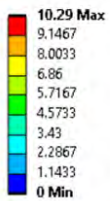
D: Static Structural
Total Deformation 4
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



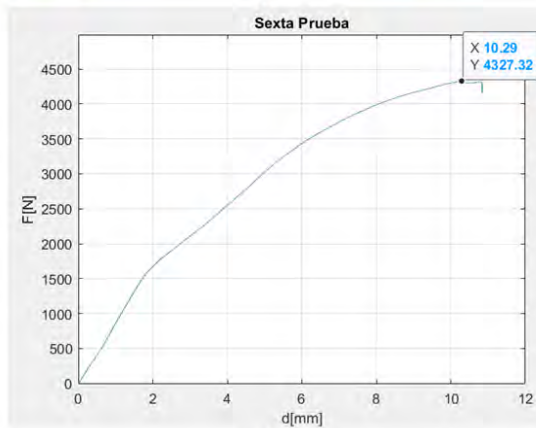
b)

Figura A.14: Resultados de la sexta prueba a) carga dtotal, b) dmáx determinada.

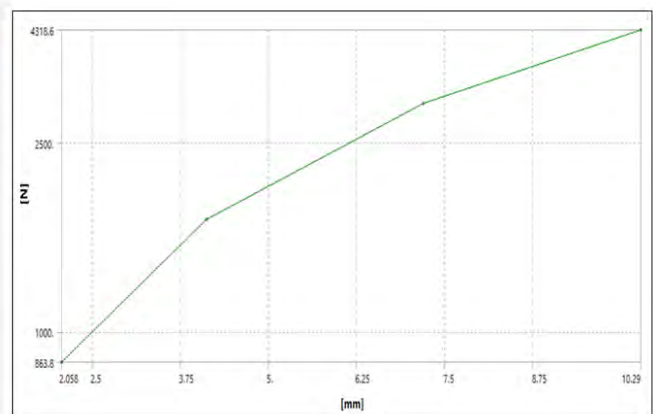
B: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



a)



b)



c)

Figura A.15: a) modelo computacional completo sexta prueba, b) Curva de fuerza vs deformación (dtotal) experimental, c) Curva de fuerza vs deformación (dtotal) computacional.

A.6 Séptima prueba

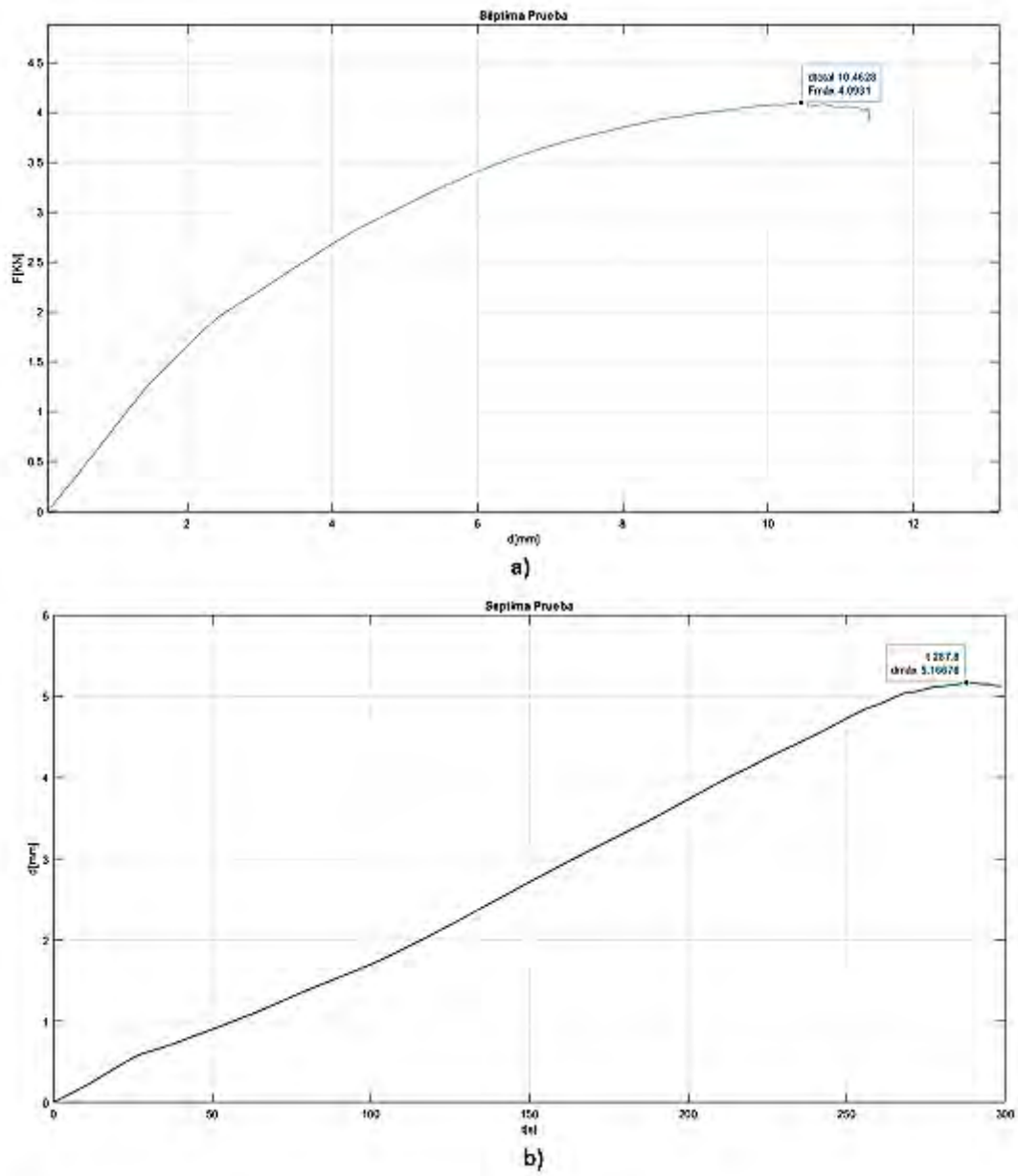
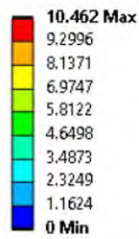


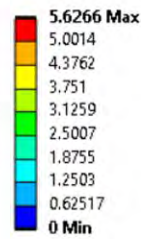
Figura A.16:a) Curva de fuerza vs deformación (d_{total}), b) deformación ($d_{máx}$) vs tiempo(s) de la séptima prueba.

D: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



a)

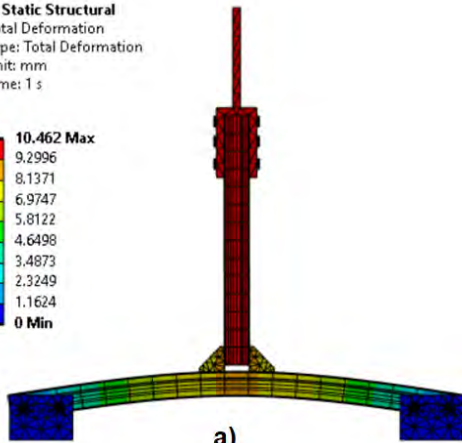
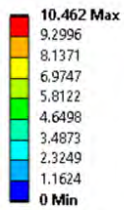
D: Static Structural
Total Deformation 4
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



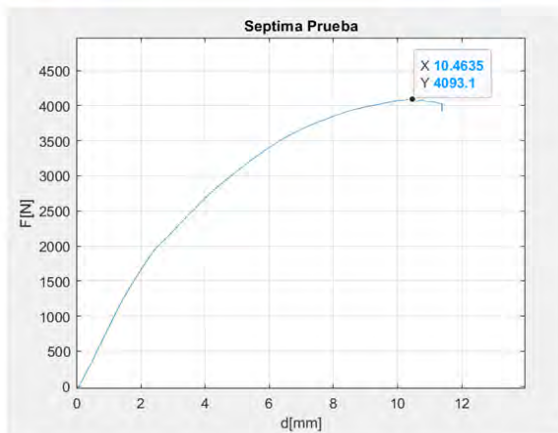
b)

Figura A.17: Resultados de la séptima prueba a) carga dtotal, b) dmáx determinada.

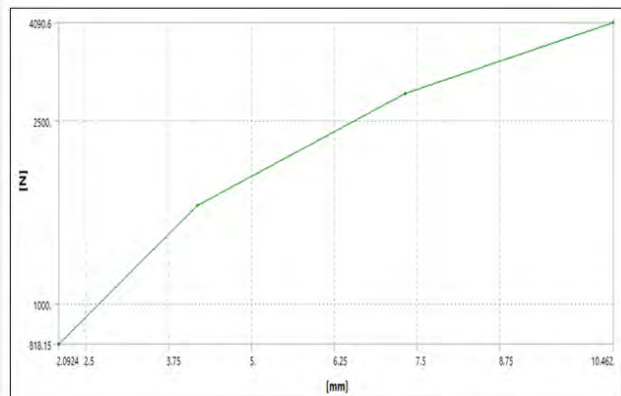
B: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s



a)



b)



c)

Figura A.18: a) modelo computacional completa sexta prueba, b) Curva de fuerza vs deformación (dtotal) experimental, c) Curva de fuerza vs deformación (dtotal) computacional.

A.7 Octava prueba

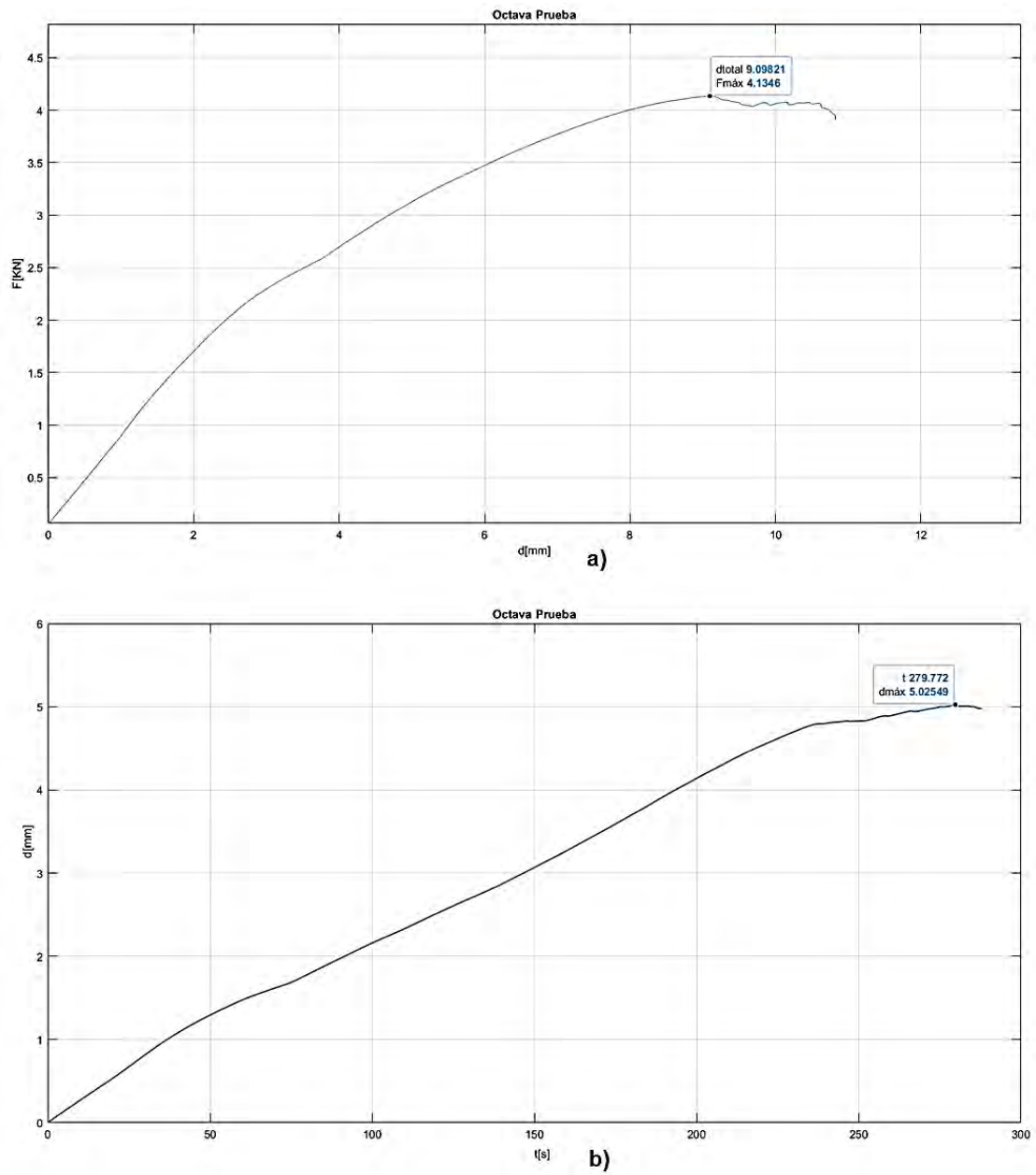
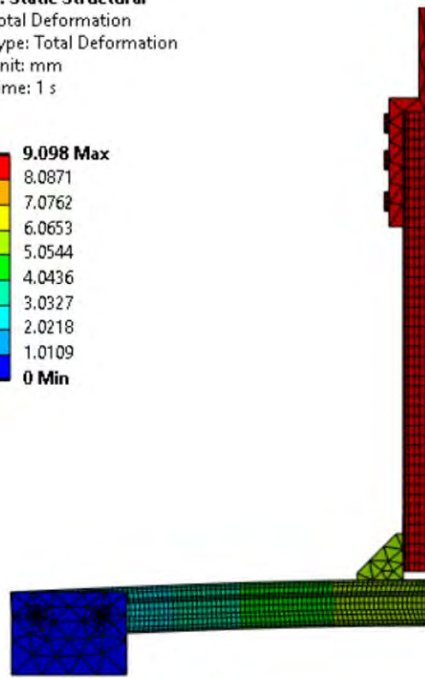
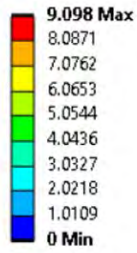


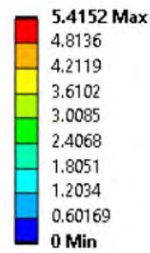
Figura A.19:a) Curva de fuerza vs deformaci3n (d_{total}), b) deformaci3n ($d_{m\acute{a}x}$) vs tiempo(s) de la octava prueba.

D: Static Structural
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1 s



a)

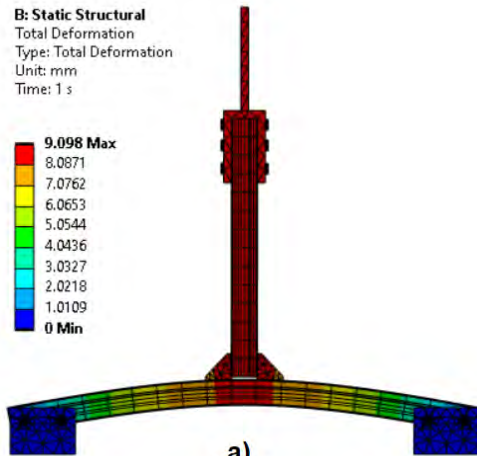
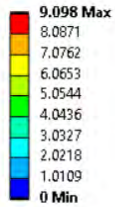
D: Static Structural
 Total Deformation 4
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1 s



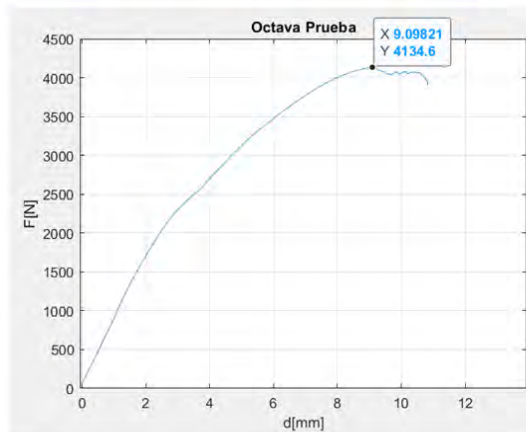
b)

Figura A.20: Resultados de la octava prueba a) carga dtotal, b) dmáx determinada.

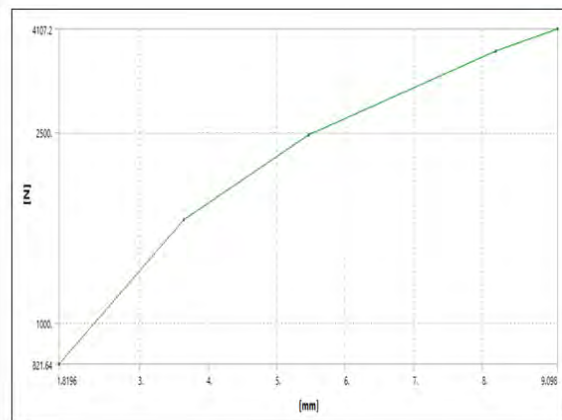
B: Static Structural
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1 s



a)



b)



c)

Figura A.21: a) modelo computacional completa sexta prueba, b) Curva de fuerza vs deformación (dtotal) experimental, c) Curva de fuerza vs deformación (dtotal) computacional.