



Trabajo Fin de Grado

Grado de Ingeniería Mecánica
Universidad de Zaragoza: Escuela de
Ingeniería y Arquitectura

Análisis resistente de uniones mediante soldadura por puntos

Autor: Adrián Sánchez Sangros
Tutor del TFG: Javier Abad Blasco

Convocatoria Junio / Curso 2023/2024

Resumen

En este apartado voy a realizar una breve descripción del objetivo y alcance del proyecto.

Empezaremos realizando una memoria donde realizaremos una búsqueda de información para saber de qué trata la soldadura por puntos.

Una vez informado sobre el tema, en primer lugar, realizaremos un análisis de esfuerzos en los puntos de soldadura para dimensionar la unión. Para ello, examinaremos la soldadura en tres ubicaciones distintas, las láminas y el punto de soldadura y calcularemos los esfuerzos a partir de la ecuación general.

En segundo lugar, llevaremos a cabo diferentes ensayos de 2 tipos ensamblajes (Solape y Tracción) con distinta cantidad de puntos de soldadura para ver cómo se comporta la soldadura realizada y la resistencia de la unión.

Además de esto, simularemos mediante SolidWorks Simulation todos los ensayos realizados, ayudándonos de él para realizar los cálculos de los esfuerzos

En último lugar, analizaremos virtualmente en SolidWorks otro tipo de ensamblajes distintos a los realizados en los ensayos, donde, además de analizar los esfuerzos que soportan las uniones soldadas, realizaremos un estudio de frecuencia para comprobar la rigidez de nuestros ensamblajes en función del número de puntos de soldadura que contenga dicho ensamblaje.



ÍNDICE

1. Introducción a la Soldadura por Puntos.....	4
2. Parámetros de la Soldadura por Puntos.....	14
3. Control de Calidad y Normativas, ensayos.....	23
4. Análisis analítico de tensiones en puntos de soldadura ...	26
5. Ensayos realizados	27
6. Modelización con SolidWorks de uniones soldadas por puntos.....	36
7. Determinación de estado tensional en puntos de soldadura.....	51
8. Otras tipologías de unión simulados en SolidWorks.....	53
9. Resultados y conclusiones.....	73
Bibliografía.....	74
Anexos.....	76

1. Introducción a la Soldadura por Puntos

La soldadura por puntos es un proceso de unión utilizado ampliamente en la industria para unir piezas metálicas. Consiste en aplicar calor y presión en puntos específicos de contacto entre las superficies a unir. Este proceso crea una fusión localizada en esos puntos, formando una conexión sólida y duradera.

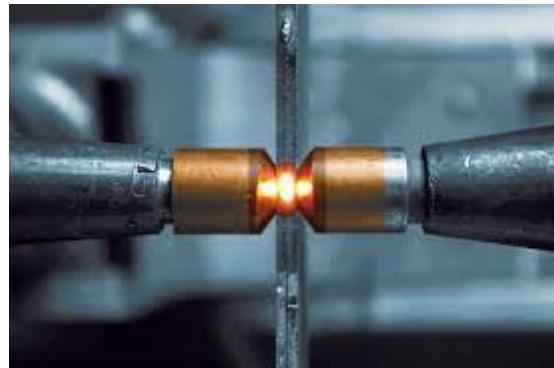


Figura 1: Soldadura por puntos

[6] [1]

La soldadura por puntos tiene sus raíces en los avances industriales del siglo XIX. Sin embargo, su popularización y refinamiento significativo se produjo a lo largo del siglo XX, en gran parte gracias a los avances tecnológicos y las demandas crecientes de la industria automotriz.

En sus inicios, la soldadura por puntos se realizaba principalmente de manera manual, con operadores utilizando herramientas simples para llevar a cabo el proceso. Con el tiempo, se desarrollaron máquinas más sofisticadas y automatizadas, lo que permitió una mayor precisión y velocidad en la producción.



Figura 2: Máquina de Soldar Tradicional

[17] [2]

Equipos y Herramientas

La soldadura por puntos requiere de equipos especializados para llevar a cabo el proceso de manera eficiente y precisa. Estos equipos varían en complejidad y se eligen según las necesidades específicas de la aplicación. Aquí se describen los tipos principales de máquinas de soldadura por puntos y se detallan sus características:

Máquinas Manuales:

Las máquinas manuales son las más básicas y son operadas directamente por un operador humano. Consisten en una prensa que puede ser accionada por palanca o pedal, y un electrodo. El operador alinea y sujetas las piezas a unir, luego activa la máquina para aplicar la corriente y la presión necesarias. Este tipo de máquina es adecuado para operaciones de baja producción o para tareas que requieren una gran precisión.



Figura 3: Soldador portátil

[18]

Máquinas Semiautomáticas:

Las máquinas semiautomáticas incorporan elementos de automatización, pero aún requieren la intervención de un operador. Estas máquinas a menudo cuentan con una interfaz de control que permite ajustar los parámetros de soldadura, como corriente, tiempo y presión. Son utilizadas en aplicaciones donde se busca una mayor productividad sin sacrificar el control manual.



Figura 4: Máquina Semiautomática

[42]

Máquinas Automáticas:

Las máquinas automáticas son completamente automatizadas y están diseñadas para operar de forma independiente una vez que se han configurado los parámetros. Pueden ser programadas para llevar a cabo una secuencia de soldaduras en diferentes puntos y en diferentes piezas. Son ideales para operaciones de alta producción donde se requiere una alta velocidad y consistencia en la calidad de las soldaduras.



Figura 5: Máquina automática

[23]

Electrodo:

El electrodo es una parte crítica de cualquier máquina de soldadura por puntos. Existen diversos tipos de electrodos, como los de punta plana, de punta cónica o de inserción. La elección del electrodo depende del tipo de material, el grosor y la forma de las piezas a unir.



Figura 6: Tipos de electrodos

[24]

Otros Accesorios:

Además de la máquina y el electrodo, pueden ser necesarios otros accesorios como dispositivos de sujeción para mantener las piezas en posición, sistemas de enfriamiento para prevenir el sobrecalentamiento y sistemas de control para monitorear y ajustar los parámetros de soldadura.



Figura 7: Herramienta de sujeción Grasshopper

[8]



Figura 8: Enfriador de agua CW-6000

[25]

Materiales Utilizados

La soldadura por puntos es una técnica versátil que puede utilizarse en una amplia variedad de materiales metálicos. La selección de los materiales es crucial para garantizar una unión fuerte y duradera. A continuación, se detallan los tipos de materiales más comunes utilizados en la soldadura por puntos:

Los **metales ferrosos**, como el acero al carbono y el acero inoxidable, son ampliamente utilizados en aplicaciones de soldadura por puntos. Son apreciados por su resistencia y durabilidad, lo que los hace ideales para aplicaciones en la industria automotriz, construcción y fabricación de maquinaria.

Los **metales no ferrosos**, como el aluminio, el cobre y sus aleaciones, también son compatibles con la soldadura por puntos. Estos materiales ofrecen ventajas como una mayor conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión, lo que los hace ideales para aplicaciones en la industria electrónica y aeroespacial.

Dependiendo de las necesidades específicas de la aplicación, se pueden utilizar **aleaciones especiales** que proporcionen propiedades únicas, como mayor resistencia a altas temperaturas o mayor resistencia a la corrosión. Un ejemplo común es el uso de aleaciones de níquel en aplicaciones aeroespaciales.

La soldadura por puntos es adecuada para una amplia gama de **grosores de material**, desde láminas delgadas hasta materiales más gruesos. Sin embargo, es importante seleccionar la configuración y la potencia adecuadas de la máquina para garantizar una fusión y penetración adecuadas en los materiales de diferentes espesores.

Al unir diferentes materiales mediante soldadura por puntos, es crucial considerar la **compatibilidad entre ellos**. Algunas combinaciones pueden ser más susceptibles a la formación de defectos o a la corrosión, por lo que se deben tomar precauciones adicionales.

Antes de realizar la soldadura por puntos, es importante **preparar adecuadamente las superficies** de las piezas a unir. Esto puede implicar la limpieza de la superficie para eliminar óxidos, grasas u otros contaminantes que puedan afectar la calidad de la soldadura.

Ventajas y Desventajas

La soldadura por puntos es una técnica valiosa en la industria, pero como cualquier proceso de unión, tiene sus propias ventajas y desventajas que deben considerarse. A continuación, se detallan las principales ventajas y desventajas de la soldadura por puntos:

Ventajas:

- Alta Velocidad de Producción:

La soldadura por puntos es un proceso rápido y eficiente. Una vez que se configuran los parámetros adecuados, se pueden realizar múltiples puntos de soldadura en cuestión de segundos, lo que la hace ideal para la producción en masa.

- Alta Resistencia de la Unión:

Las soldaduras por puntos generan uniones fuertes y duraderas. La fusión localizada de los materiales crea una conexión sólida que es capaz de soportar cargas significativas.

- Ausencia de Material de Relleno:

A diferencia de otros procesos de soldadura que requieren el uso de material de relleno, la soldadura por puntos no lo necesita. Esto puede reducir costos y simplificar el proceso.

- Bajo Impacto en la Estética de las Superficies:

Dado que la soldadura por puntos crea fusiones locales pequeñas y discretas, puede ser una opción preferida en aplicaciones donde la estética de las superficies es importante.

- Menor Distorsión de las Piezas:

La concentración de calor en los puntos de soldadura minimiza la deformación de las piezas, lo que puede ser crítico en aplicaciones donde la precisión dimensional es esencial.



Desventajas:

- Limitación en el Grosor de los Materiales:

La soldadura por puntos es más adecuada para materiales de espesor relativamente delgado. Para materiales muy gruesos, pueden ser necesarios procesos de soldadura alternativos.

- Acceso a Ambos Lados de la Unión:

Para realizar la soldadura por puntos, generalmente se requiere acceso a ambos lados de las piezas. Esto puede ser un desafío en algunas configuraciones y diseños.

- Condiciones de Superficie Cruciales:

La preparación adecuada de las superficies a unir es esencial para obtener soldaduras de alta calidad. Contaminantes como óxidos o grasas pueden afectar negativamente el proceso.

- Dificultad en la Reparación de la Soldadura:

Una vez realizada la soldadura por puntos, es difícil deshacerla o corregirla. Esto puede ser un factor a considerar en aplicaciones donde se requiere la posibilidad de desmontaje.

Aplicaciones Industriales

La soldadura por puntos desempeña un papel fundamental en una amplia gama de industrias debido a su capacidad para crear uniones fuertes y duraderas en materiales metálicos. A continuación, se describen algunas de las aplicaciones industriales más comunes de la soldadura por puntos:

- Industria Automotriz:

La industria automotriz es uno de los principales sectores que utiliza ampliamente la soldadura por puntos. Se emplea para unir paneles de carrocería, componentes del chasis y otros elementos estructurales del vehículo.



Figura 9: Maquinaria utilizada en Industria automotriz

[26]



Figura 10: Soldadura en carrocerías

[27]

En la fabricación de automóviles, la soldadura por puntos se utiliza extensamente para unir paneles de carrocería. Un ejemplo destacado es la unión de paneles de puertas y capó utilizando esta técnica, lo que proporciona una unión fuerte y ayuda a mantener la integridad estructural del vehículo.



Figura 11: Soldadura puertas de automóvil

[28]

- Industria Electrónica:

En la fabricación de productos electrónicos, la soldadura por puntos se utiliza para unir componentes, como circuitos impresos, terminales de baterías y componentes de cables.



Figura 12: Terminales de baterías

[29]

- Industria Aeroespacial:

En la industria aeroespacial, donde se requiere una combinación de resistencia y peso ligero, la soldadura por puntos se utiliza para ensamblar estructuras ligeras, como fuselajes y componentes de alas.

Un ejemplo de ello es la soldadura por puntos en materiales compuestos, que se utiliza en aplicaciones prácticas y críticas en la industria aeroespacial para fabricar componentes estructurales avanzados. La soldadura por puntos ofrece una forma eficiente y confiable de unir paneles de materiales compuestos, manteniendo la resistencia y la integridad estructural necesarias para aplicaciones exigentes como la aviación.

- Construcción Naval:

En la construcción de embarcaciones, la soldadura por puntos se aplica en la unión de paneles de casco y otros componentes estructurales. Esto contribuye a la integridad y resistencia de los barcos.



Figura 13: Soldadura de paneles

[30]

- Industria de Electrodomésticos:

En la fabricación de electrodomésticos como lavadoras, secadoras y refrigeradores, la soldadura por puntos se emplea para unir componentes de metal.

- Industria de la Energía:

En aplicaciones relacionadas con la generación y distribución de energía, como la fabricación de transformadores y equipos de distribución eléctrica, la soldadura por puntos se utiliza para unir componentes conductores.



Figura 14: Soldadura de componentes conductores

[31]

- Industria de la Electrónica de Potencia:

En la fabricación de componentes de electrónica de potencia, como inversores y rectificadores, la soldadura por puntos se utiliza para unir componentes de alta corriente.

- Fabricación de Muebles Metálicos:

En la producción de muebles metálicos, como sillas y mesas, la soldadura por puntos se utiliza para unir componentes estructurales.

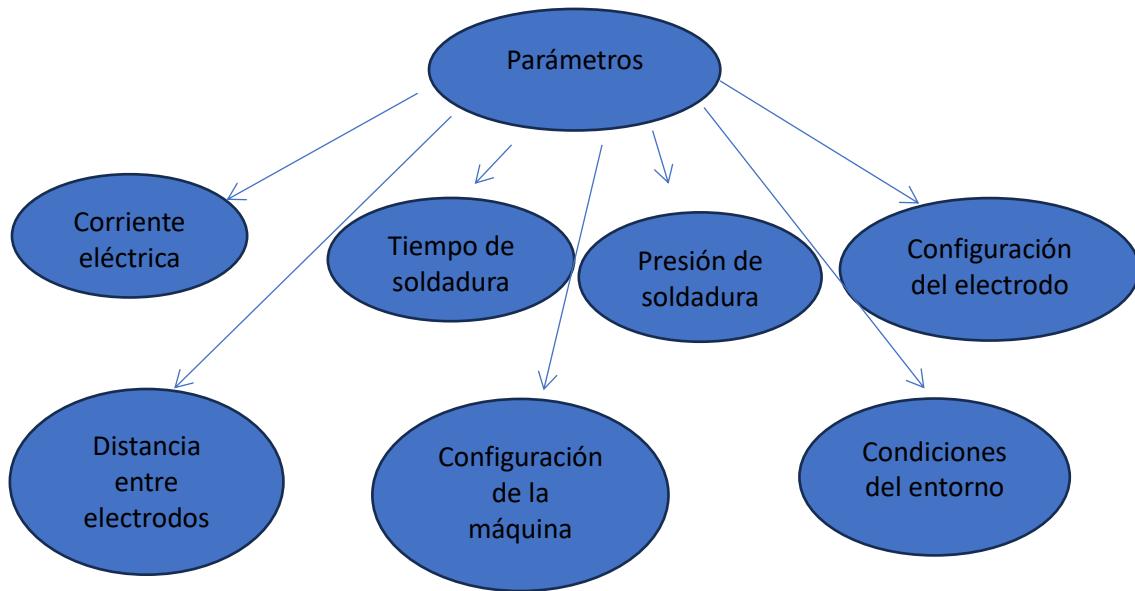


Figura 15: Soldadura de dos placas

[32]

2. Parámetros de la Soldadura por Puntos

Los parámetros de soldadura son variables controlables que afectan directamente la calidad y la resistencia de la unión en el proceso de soldadura por puntos. Ajustar adecuadamente estos parámetros es esencial para obtener resultados óptimos. A continuación, se detallan los parámetros clave y su influencia en el proceso:



Esquema 1: Parámetros de Soldadura

- La **corriente eléctrica** es uno de los parámetros más críticos. Determina la cantidad de calor generado durante la soldadura. Un ajuste incorrecto de la corriente puede resultar en una unión insuficiente o un exceso de fusión.
- El **tiempo** durante el cual se aplica la corriente eléctrica es otro parámetro crucial. Demasiado tiempo puede provocar una fusión excesiva, mientras que un tiempo insuficiente puede resultar en una unión débil.
- La **presión aplicada durante la soldadura** por puntos es importante para asegurar un contacto adecuado entre las piezas a unir. Una presión insuficiente puede resultar en una unión deficiente.
- La **forma, el tamaño y el material del electrodo** son factores que influyen en la calidad de la soldadura. Los electrodos deben ser seleccionados para garantizar un contacto uniforme y una distribución adecuada de la corriente.
- La **distancia entre los electrodos** influye en la resistencia eléctrica del circuito y, por lo tanto, en la cantidad de calor generado. Una distancia incorrecta puede afectar la calidad de la soldadura.
- La **configuración de la máquina** de soldadura, que incluye ajustes de corriente, tiempo y presión, debe ser calibrada y ajustada correctamente para adaptarse al tipo y grosor de los materiales a unir.
- Las condiciones ambientales, como la **temperatura ambiente** y la **humedad**, pueden influir en la conductividad eléctrica de los materiales y, por lo tanto, en los resultados de la soldadura.

Electrodos correctos

Desde los más sencillos a los automatizados, los electrodos se vuelven uno de los parámetros de Soldadura más importantes, debido a que la selección de su tipo, diámetro y geometría será esencial para poder llevar a cabo las diferentes tareas de soldadura a realizar.

En este caso, además de seguir las normas de aplicación de la A.W.S. y la A.S.M.E., estos siempre se elegirán dependiendo de su tipo de aleación incorporada, su material de aporte, y por supuesto, en función de la composición química y física de los materiales a soldar.

Por otro lado, siempre será necesario ponerle atención a su buen estado y correcto almacenamiento, manteniéndolos secos y bien conservados.



Figura 16: Tipos de electrodos

[33] [7]

Intensidad (Amperaje) y tiempo de Soldadura

El segundo de los parámetros de Soldadura es el factor más influyente para poder alcanzar la temperatura y el calentamiento necesarios para la unión final; teniendo una relación directa con el tiempo, pues a mayor intensidad se requerirá menor tiempo de soldeo, y viceversa.

Así mismo, y en relación con la intensidad, la regulación del amperaje en la máquina será también decisiva, pues a cada diámetro de electrodo le corresponde determinados parámetros (mínimos y máximos) de amperaje, mismos que deberán ser regulados hasta un punto de equilibrio que permita el máximo aprovechamiento del electrodo para cada tipo de material, pues de lo contrario pueden suceder 2 problemáticas esenciales:

- **Amperaje excesivo:** Provoca porosidades, cordones chatos, recalentamiento del electrodo y salpicaduras.
- **Amperaje insuficiente:** Produce abultamientos y mala penetración en el material, así como dificultades con el arco.

De ahí que se tenga la relación directa con el primero de los parámetros de Soldadura, pues el amperaje correcto dependerá de la selección adecuada del diámetro del electrodo.

Para realizar trabajos en chapas finas de 2, 1.5 o 1 mm, podemos usar electrodos de 1.5 mm o 2.0 mm regulando la máquina entre 35 y 50 amperios.

Diámetro	Básico	Rutilo
2,5	70	75
3,25	105	110
4	140	150
5	175	190

Tabla 1: Intensidad en función del diámetro

[9]

El tiempo de soldadura en la soldadura por puntos también es un parámetro crucial y dependerá de factores como el tipo de material, el amperaje utilizado y el diseño específico de la soldadura. Generalmente, en la soldadura por puntos, el tiempo de aplicación de la corriente es bastante corto, típicamente en el rango de milisegundos. El tiempo medio de soldadura por puntos es de sólo 0,01 a 0,63 segundos.

Para materiales comunes como acero, el tiempo de soldadura puede oscilar entre 5 y 20 milisegundos.

Presión de apriete

La soldadura por puntos de resistencia es una soldadura por forja, lo cual supone la existencia de una conformación en caliente, que se obtiene mediante la presión aplicada a través de los electrodos. A este parámetro no se le suele dar la importancia que merece, que se supone de manifiesto en dos acciones distintas: su influencia sobre la resistencia y su efecto de forja durante la solidificación del núcleo de metal fundido.

La aplicación de la presión tiene tres misiones distintas, que pueden parecer incluso contradictorias:

En el momento de comenzar la soldadura, la presión ha de ser baja para obtener una resistencia de contacto chapa-chapa elevada, que permita un calentamiento inicial con intensidad moderada.

A su vez, esta presión ha de ser suficiente para que las chapas a unir tengan un contacto adecuado y se acoplen entre sí perfectamente.

Una vez que se ha iniciado la fusión del punto, la resistencia de contacto queda reducida a la zona delimitada por los electrodos. En ese momento, la presión debe ser alta para expulsar los gases incluidos y llevar a cabo la forja del punto.

Existe un rango de presión particular para cada tipo de material; por ejemplo, la soldadura por puntos de aceros con bajo contenido de carbono requiere de 1.5 a 2 KN por mm de espesor de chapa. Para chapas de 2 mm, podrías empezar con presiones en el rango de 3000 a 4000 N por punto de soldadura.

Presiones excesivamente bajas producen:

- Forja deficiente, que implica puntos de baja calidad.
- Altas resistencias de contacto chapa-chapa y chapa-electrodo, que pueden dar lugar a proyecciones, salpicaduras, perforación de las chapas y cráteres y pegaduras en los electrodos, que ocasionan su degradación.
- Buena forja, pero, si la presión es excesiva, puede provocar la expulsión de metal fundido del núcleo del punto y disminuir su resistencia.
- Baja resistencia de contacto chapa-chapa y chapa-electrodo.
- Huellas profundas en las chapas.
- Partículas de cobre desprendidas de los electrodos, las cuales se adhieren a la chapa en la zona del punto.
- Deformaciones de los electrodos.

Resistencia eléctrica de la unión

La resistencia es el parámetro de Soldadura que influye de forma directa en la cantidad de calor generado durante el proceso, teniendo como factores esenciales los siguientes:

Temperatura: A mayor temperatura menor resistencia.

Fuerza aplicada a los electrodos: A mayor presión en las piezas a unir, menor la resistencia de contacto.

Estado superficial de las superficies a unir: A mayor limpieza y eliminación de rugosidades, menor resistencia.

Estado de conservación de los electrodos: A mayor desgaste y deterioro, mayor aumento en las resistencias de contacto.

Al inicio de la Soldadura la presión debe ser baja, con una resistencia alta y temperatura moderada, mientras que cuando se inicia la fusión, la presión debe de subir para expulsar los gases, reducir la resistencia y provocar el punto de unión; conformándose así la máxima de: a mayor conductividad eléctrica menor resistencia al paso de la corriente.

Avances y Tendencias en Soldadura por Puntos

La soldadura por puntos es un campo en constante evolución, y los avances tecnológicos continúan mejorando la eficiencia y la calidad de las uniones. Aquí se detallan algunos de los avances y tendencias recientes en soldadura por puntos:

- Soldadura por Puntos Asistida por Robots:

La automatización y la robótica están desempeñando un papel cada vez más importante en la soldadura por puntos. Los sistemas robóticos pueden realizar soldaduras de manera rápida y precisa, lo que aumenta la eficiencia en la producción.



Figura 17: Soldadura asistida por robots

- Soldadura por Puntos de Aluminio y Aleaciones Especiales:

Con el creciente interés en materiales ligeros en industrias como la automotriz y la aeroespacial, se están desarrollando técnicas y equipos específicos para la soldadura por puntos de aluminio y otras aleaciones especiales.



Figura 18: Soldador por puntos de aluminio

[40]

- Soldadura por Puntos en Materiales Compuestos:

La soldadura por puntos está siendo adaptada para su uso en materiales compuestos, como polímeros reforzados con fibra de carbono. Esto permite la unión de componentes de materiales mixtos.

Un ejemplo real de aplicación de soldadura por puntos en materiales compuestos se puede encontrar en la industria aeroespacial. En esta industria, los materiales compuestos se utilizan ampliamente en la fabricación de componentes estructurales de aeronaves debido a su alta resistencia y su peso ligero, lo que contribuye a mejorar la eficiencia del combustible y el rendimiento general de la aeronave.

Uno de los componentes donde se emplea la soldadura por puntos en materiales compuestos es en la unión de paneles estructurales, como los paneles de fuselaje o las superficies de control. Por ejemplo, supongamos que se está fabricando un ala compuesta para una aeronave. En esta aplicación, se pueden utilizar múltiples técnicas de unión, y la soldadura por puntos puede ser una opción para unir paneles de fibra de carbono.



Figura 19: Soldadura por puntos: sustitución de la soldadura por resistencia

[20]

- Control Avanzado de Procesos:

Los sistemas de control avanzados permiten una mayor precisión en la configuración de parámetros de soldadura, lo que resulta en uniones más consistentes y de mayor calidad.



Figura 20: Sistema avanzado para soldadura

[21]

Consideraciones Ambientales y Seguridad en la Soldadura por Puntos

La soldadura por puntos no solo implica aspectos técnicos, sino también consideraciones importantes en cuanto a seguridad y medio ambiente. A continuación, se detallan las principales consideraciones en estos aspectos:

- Ventilación y Extracción de Humos:

Durante el proceso de soldadura por puntos, se generan humos y gases que pueden ser perjudiciales si se inhalan. Es esencial contar con un sistema de ventilación adecuado y, en algunos casos, una campana de extracción para garantizar un ambiente de trabajo seguro.



Figura 21: Sistema de ventilación

[35]

- **Protección Personal:**

Los operadores de soldadura por puntos deben utilizar equipo de protección personal (EPP) que incluye cascos con visor oscuro, gafas de seguridad, guantes resistentes al calor y ropa ignífuga. Esto ayuda a prevenir lesiones y proteger contra la exposición a radiación y chispas.



Figura 22: EPIS

[22]

- **Prevención de Incendios:**

La soldadura por puntos implica la generación de calor intenso. Por lo tanto, es crucial mantener áreas de trabajo libres de materiales inflamables y contar con sistemas de extinción de incendios en caso de emergencia.

- **Manipulación Segura de Equipos y Herramientas:**

Los operadores deben recibir capacitación adecuada sobre la manipulación segura de equipos de soldadura, incluidas las máquinas y los electrodos. Esto incluye procedimientos de encendido y apagado, así como el manejo seguro de herramientas.

- Gestión de Residuos:

La soldadura por puntos puede generar residuos como escoria y recortes de material. Estos deben ser gestionados adecuadamente y, si es necesario, reciclados de acuerdo con las regulaciones locales.

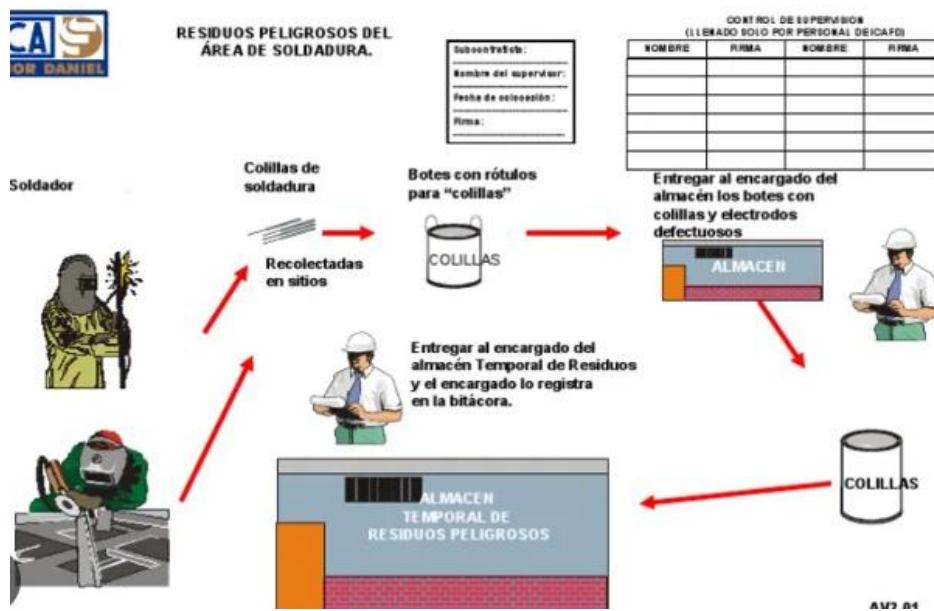


Figura 23: Gestión de Residuos

[37]

- Cumplimiento de Normativas Ambientales:

Es esencial cumplir con las normativas ambientales locales y nacionales relacionadas con la soldadura. Esto puede incluir regulaciones sobre emisiones de gases y sustancias peligrosas.

- Evaluación de Riesgos y Planificación de Emergencias:

Se debe realizar una evaluación de riesgos para identificar posibles peligros asociados con la soldadura por puntos y se debe establecer un plan de acción en caso de emergencia.

Además, deben recibir capacitación en seguridad y estar conscientes de los riesgos asociados con este tipo de trabajo.

3. Control de Calidad y Normativas, Ensayos

El control de calidad es un aspecto crítico en el proceso de soldadura por puntos para garantizar la integridad y la resistencia de las uniones. Además, existen normativas y estándares que establecen los criterios y requisitos que deben cumplirse en la industria. A continuación, se detallan los principales aspectos relacionados con el control de calidad y las normativas en la soldadura por puntos:

Inspección Visual:

La inspección visual es una de las formas más básicas de control de calidad. En la inspección visual, el operador utiliza las características de la superficie de la soldadura para determinar la calidad de la soldadura.



Figura 24: Inspección visual

[16]

Ensayos No Destructivos (END):

Los ensayos no destructivos, como radiografías, ultrasonidos y partículas magnéticas, permiten evaluar la calidad de las soldaduras sin dañar la pieza. Estos métodos pueden detectar defectos internos que no serían visibles en una inspección visual.



Figura 25: Detector de defectos por ultrasonidos

[41]

Prueba de tracción y corte

El ensayo de cizallamiento por tracción para soldaduras por puntos es el método más utilizado para determinar la resistencia de las soldaduras por puntos de resistencia. La prueba también se usa ampliamente para soldaduras de proyección y está estandarizada por ISO 14272.

El espécimen de prueba utilizado es como se muestra en la figura siguiente. Se fabrica superponiendo cupones (tiras) de tamaño adecuado y realizando una soldadura por puntos en el centro del área superpuesta. Se utiliza una máquina de prueba de tracción para llevar a cabo la prueba.

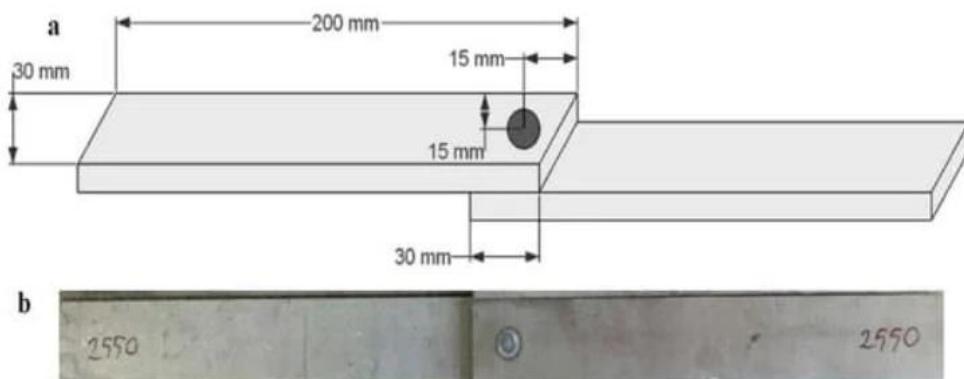


Figura 26: Probeta

[38]

Las soldaduras por puntos de buena calidad mostrarán la progresión hacia el fallo como se muestra en la figura 27, donde se puede observar el fallo en la interfaz de la pepita. Las diferencias en los resultados de la carga hasta el fallo de los ensayos de Tensión por solapamiento proporcionan una clara detección de la calidad de la soldadura, como se muestra en la figura 28.

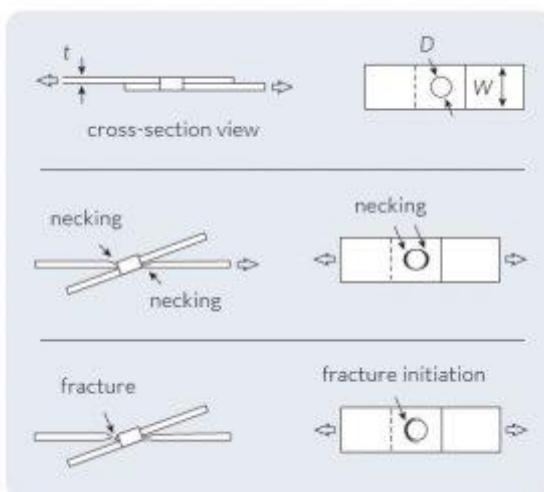


Figura 27: Progresión hacia el fallo de la soldadura

[39]

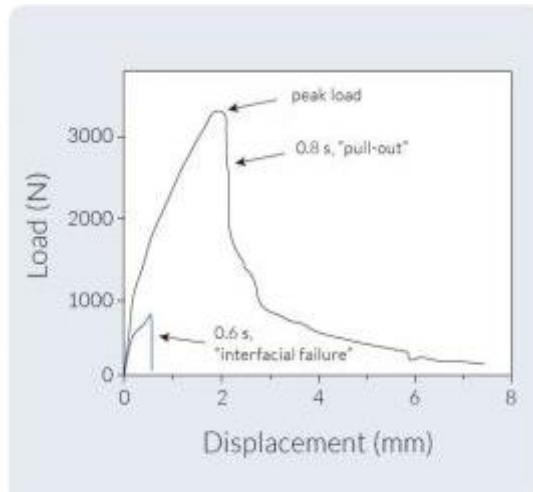


Figura 28: Detección de la calidad de la soldadura

[39]

Prueba de Cizallamiento de Tensión Cruzada

El ensayo de cizallamiento por tensión cruzada se define en la norma ISO 14272. Esta norma especifica los requisitos para la prueba de corte, las dimensiones del espécimen de prueba y el procedimiento de prueba para soldaduras de proyección y soldaduras por puntos.

Cuando esta prueba de corte se utiliza en combinación con la prueba de tensión cruzada, la relación resistencia a la tensión cruzada/resistencia a la tensión-corte se denomina medida de ductilidad.

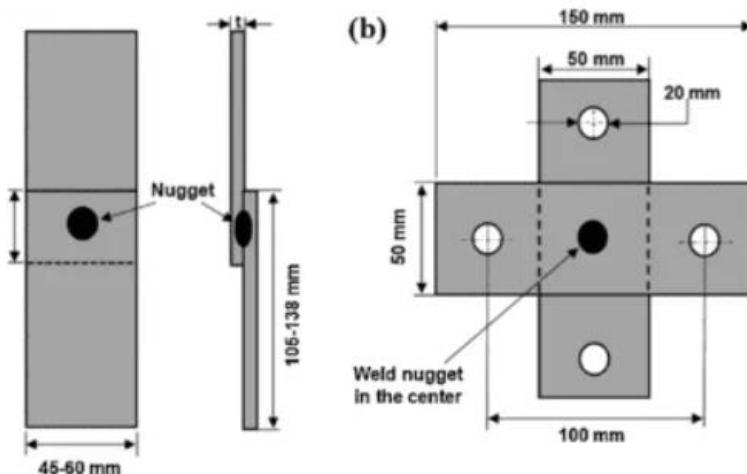


Figura 29: Probetas para tensión cruzada

[38]

Normativas y Estándares:

En la industria de la soldadura, existen normativas y estándares internacionales que establecen los criterios de calidad y los procedimientos a seguir. Por ejemplo, las especificaciones de la American Welding Society (AWS) son ampliamente reconocidas.

Certificaciones y Calificaciones de Soldadores:

Los soldadores pueden obtener certificaciones que acreditan su competencia para realizar soldaduras de alta calidad. Estas certificaciones suelen estar en línea con los estándares y normativas de la industria.

Procedimientos de Soldadura Calificados (PSQ):

Los procedimientos de soldadura deben estar documentados y calificados para garantizar la repetibilidad y la consistencia de las soldaduras. Esto implica la especificación detallada de los parámetros de soldadura a utilizar.

Cumplimiento de Requisitos Específicos del Cliente:

En muchos casos, los productos soldados deben cumplir con requisitos específicos establecidos por el cliente. Esto puede incluir criterios adicionales de calidad y pruebas específicas.

4. Análisis analítico de tensiones en puntos de soldadura

El análisis de tensiones para soldaduras por puntos implica examinar la soldadura en tres ubicaciones distintas, las láminas y el punto de soldadura (pepita). Las fuerzas y momentos de la sección transversal en la ubicación de la pepita se determinan y se utilizan para calcular las tensiones correspondientes en las láminas y la pepita.

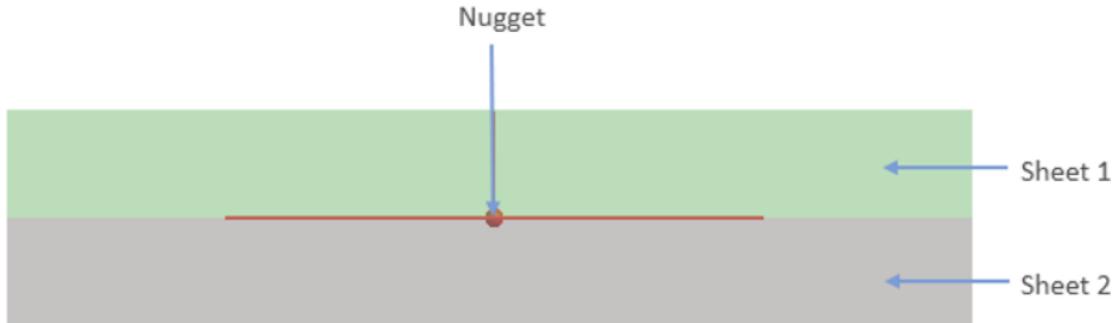


Figura 30: Boceto de dos láminas soldadas por puntos

Los puntos de soldadura pueden estar sometidos tanto a esfuerzos cortantes como axiales, además de los esfuerzos correspondientes a los momentos de flexión y torsión.

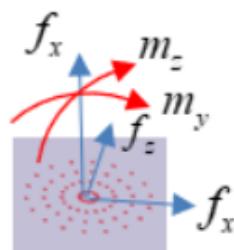


Figura 31: Fuerzas y Momentos en el punto de soldadura

Para calcular estos esfuerzos, nos serviremos de la ecuación general:

$$\sigma(\theta) = \sigma(f_x) + \sigma_{\max}(m_y) * \sin\theta - \sigma_{\max}(m_z) * \cos\theta ;$$

Donde,

$$\sigma(f_x) = \frac{4*F_x}{\pi*D^2} ;$$

Siendo “F_x” el valor de la Fuerza Máxima registrada en los ensayos realizados y “D” el diámetro del punto de la soldadura correspondiente.

$$\sigma(m_y) = \frac{32*m_y}{\pi*D^3} ;$$

$$\sigma(m_z) = \frac{32*m_z}{\pi*D^3} ;$$

Siendo “m_y, m_z” el valor del Momento que ha sufrido ese punto de soldadura y “D” el diámetro del punto de la soldadura correspondiente.

5. Ensayos realizados

Equipo empleado para realizar los puntos de soldadura

Antes de realizar los ensayos fue necesario realizar las diferentes soldaduras para ensamblar las diferentes piezas. Para ello utilizamos una máquina de soldadura por puntos manual de la marca TECNA que se encuentra en la Nave del Dpto. de Fabricación Ing. Mecánica, edif. Betancourt de la EINA.

En las siguientes imágenes podemos ver de qué máquina se trata exactamente, en la propia máquina nos indica, en función de los espesores que tiene nuestra pieza, el tiempo que tenemos que ajustar en el “TIMER”.

En la segunda imagen se puede ver que hemos empleado un tiempo de 0,6 segundos, que es el apropiado para nuestro caso según nos indica en la máquina para espesores de 1 + 1 mm.

De esta manera realizaremos el “Ensamblaje a solape” y el “Ensamblaje a tracción” con 1, 2, y 3 puntos de soldadura y, posteriormente, realizaremos los ensayos para ver cómo se comportan las diferentes uniones soldadas.



Figura 32: Máquina de soldadura manual TECNA



Figura 33: TIMER



Figura 34: Ejemplos de soldadura

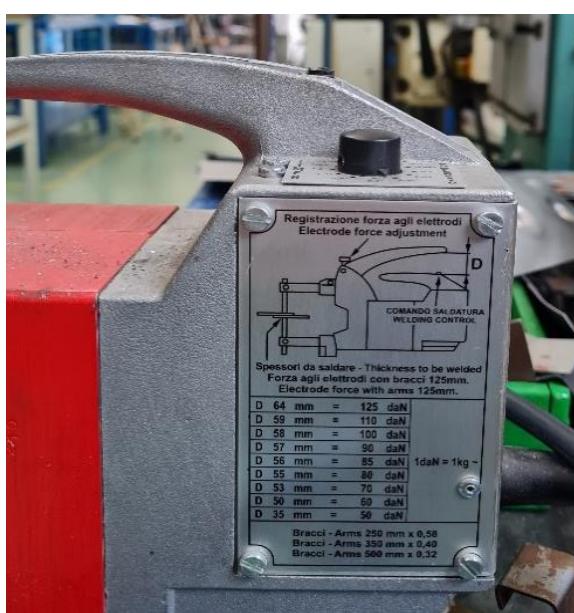


Figura 35: Ajuste de la fuerza del electrodo

Máquina de ensayos empleada

Una vez ensamblada las piezas con sus uniones soldadas correspondientes procedemos a realizar los ensayos.

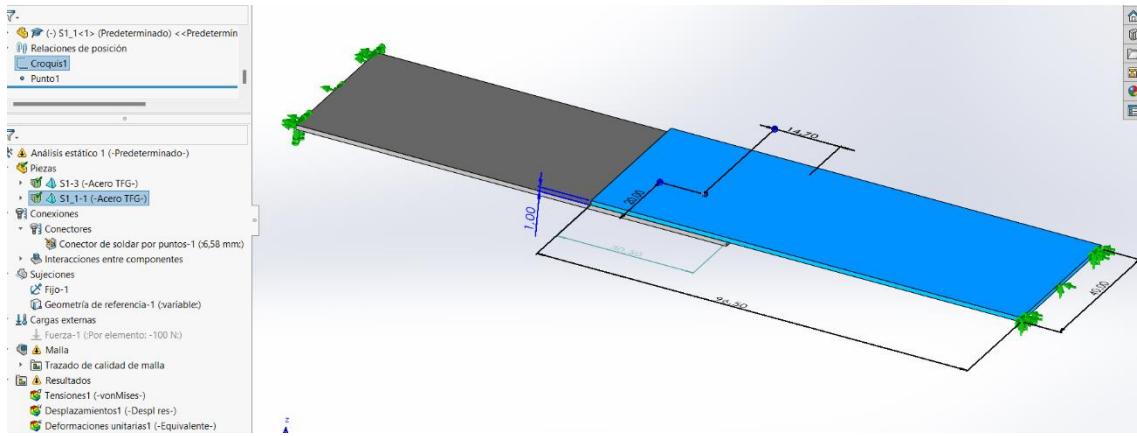
Para ello utilizamos la máquina universal de ensayos INSTRON Modelo 8032 disponible en el taller de la universidad que se encuentra en la Nave del Dpto. de Fabricación de Ing. Mecánica, edif. Betancourt de la EINA.



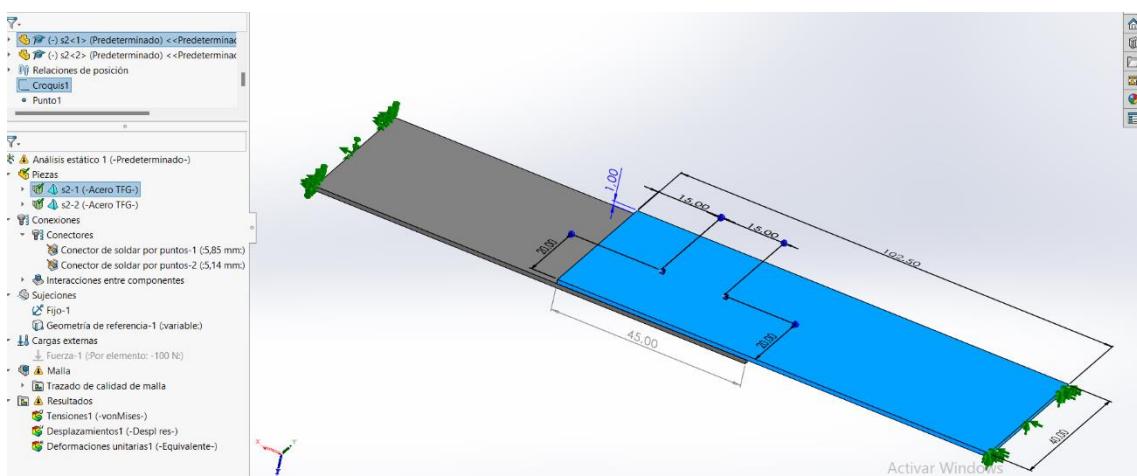
Figura 36: Máquina de ensayos

Geometría de probetas y uniones ensayadas

S1



S2



S3

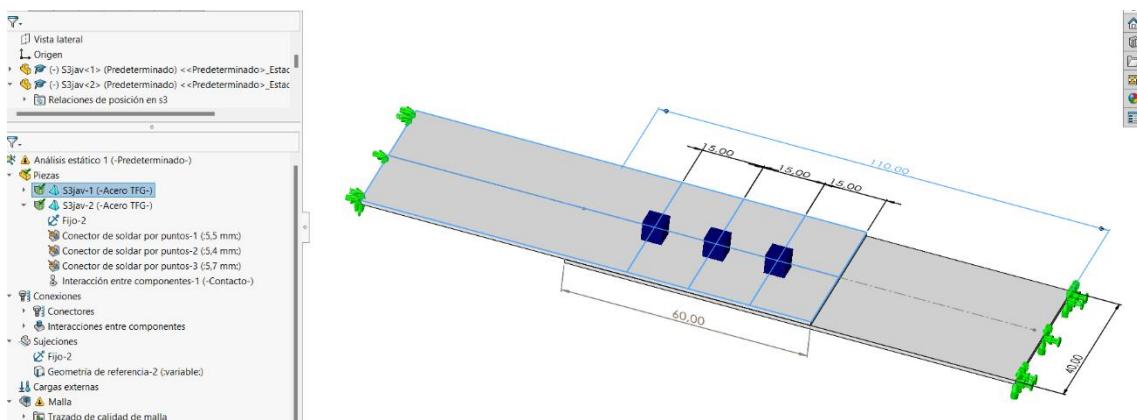
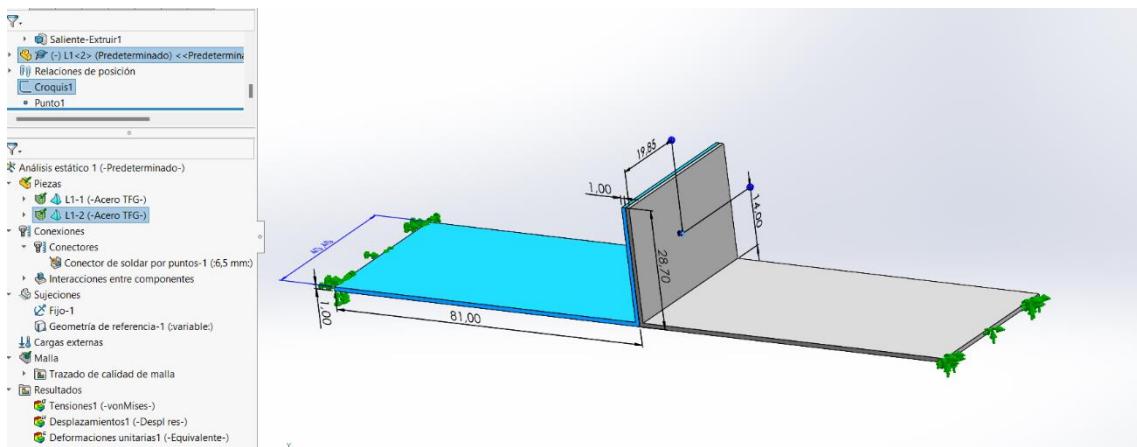
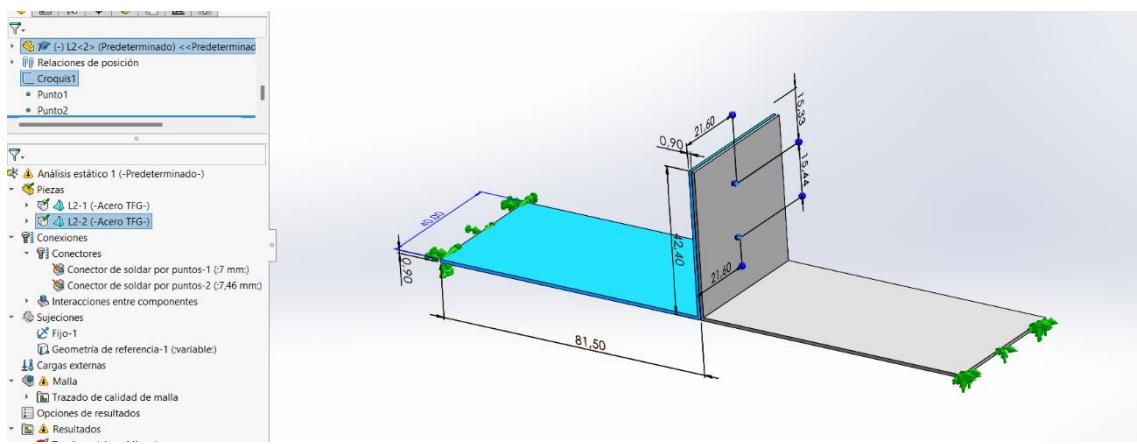


Figura 37: Geometría ensamblajes a solape

L1



L2



L3

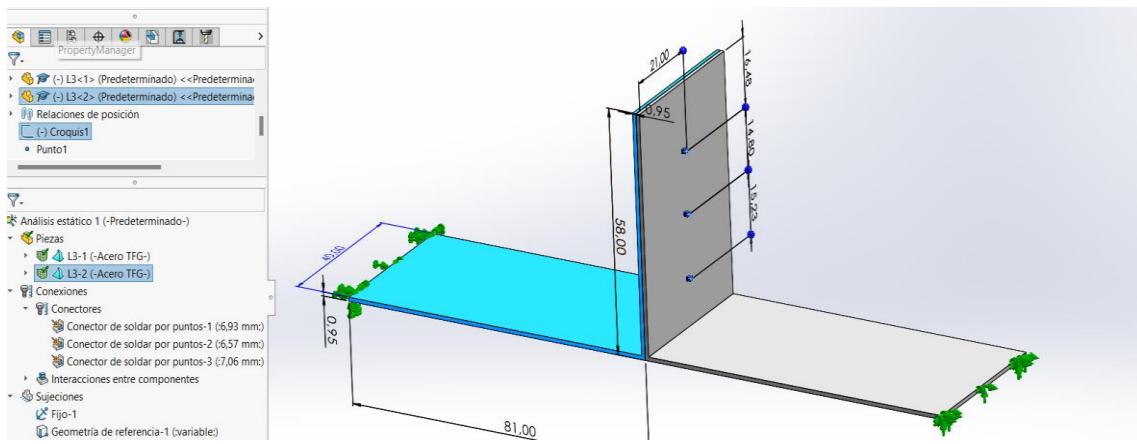


Figura 38: Geometría ensamblajes a tracción

Descripción del ensayo

El ensayo de las muestras se realiza montando las muestras entre abrazaderas o «mordazas» en la máquina de prueba universal estándar que hemos visto anteriormente. Una vez montada entre las mordazas, se tira de la muestra en tensión a un ritmo de carga constante y la fuerza resultante aplicada al cupón de cizallamiento se mide utilizando un transductor de fuerza en línea.

Además, utilizamos un extensómetro para saber cuánto se deformaba y, de esta manera, saber con exactitud con qué material estamos trabajando.

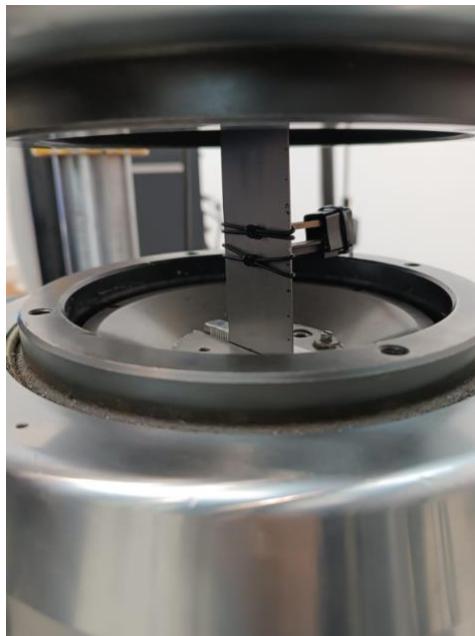


Figura 39: Aplicación del extensómetro



Figura 40: Mordazas

[39]

Primero realizamos un ensayo de prueba con una muestra que teníamos para saber que ritmo de carga era el más adecuado, comenzamos con una velocidad de 1,5 mm/min y observamos que, para el primer ensayo, tendríamos que subir esa velocidad.

En función del ensayo y del número de puntos de soldadura íbamos subiendo o bajando el ritmo de carga, primero comenzamos con una velocidad de 3 mm/min para el ensayo a tracción con 1 punto de soldadura. Para los ensayos de dos y tres puntos de soldadura aumentamos ese ritmo a 5 mm/min y 7 mm/min.

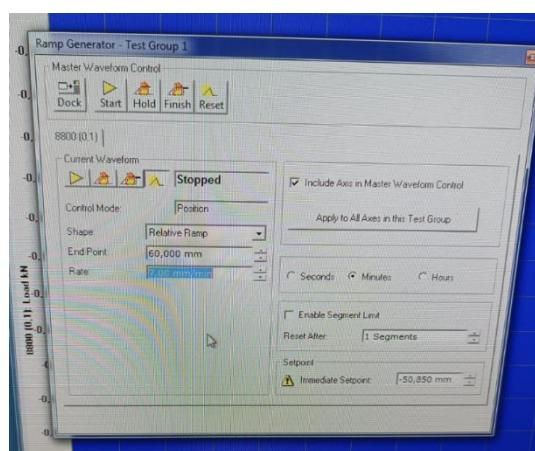


Figura 41: Aplicación ritmo de carga

Resultados

Módulo de Young

A partir de los datos registrados y su tratamiento, según se indica en el ANEXO 1, los resultados obtenidos son $E_1 = 217251$ MPa y $E_2 = 184873$ MPa de los cuales utilizaremos el valor medio entre ellos: **201000 MPa**.

Tensión de Fluencia

En este caso, calculamos la tensión de fluencia fijándonos en la gráfica, viendo donde empieza ese cambio de tendencia en la curva donde la relación entre la tensión y la deformación ya no es lineal, en ese punto encontramos esa tensión de fluencia.

A partir de estos datos y según se indica en el ANEXO 2, los resultados son: para P1, una tensión de 159,31 MPa y para P2, una tensión de 150,78 MPa.

De la misma manera, utilizaremos el valor medio entre ellos siendo de **155 MPa**, con lo que nos encontramos con un acero DC-06.

Datos del fabricante

Se trata de un acero DC-06:

$$\sigma_F < 170 \text{ MPa}$$

$$\sigma_U = 270-330 \text{ MPa}$$

$$\tau_U = 135-165 \text{ MPa}$$

Resistencia de uniones soldadas

En este apartado se muestran los resultados de los ensayos a los que se han sometido las diferentes probetas, tanto a solape como a tracción, estos resultados los presentamos por medio de graficas en la que se muestra la fuerza frente al desplazamiento. De estas gráficas, extraeremos el valor máximo de Fuerza que soporta la unión.

Hemos ensayado dos uniones de cada tipo. A continuación, se muestra el resultado de una de las probetas de cada tipo sabiendo que el resto de las gráficas y fotos se encuentran en el ANEXO 6.

Ensayo a Solape

S1

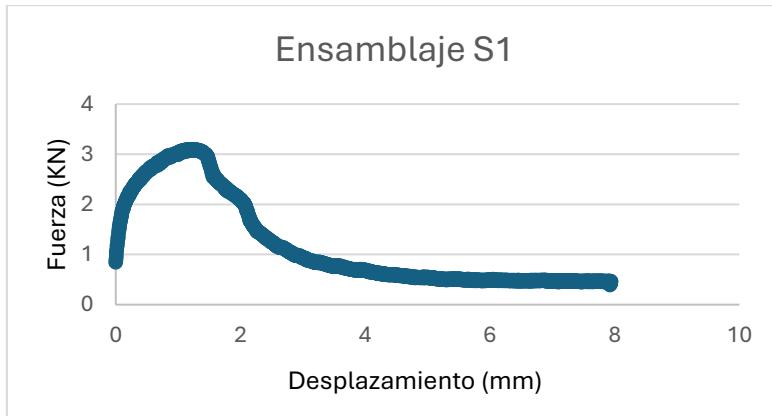


Figura 43: Ensamblaje S1

Figura 42: Ensayo a Solape S1

$F_{MAX}= 3,5 \text{ KN}$

S2

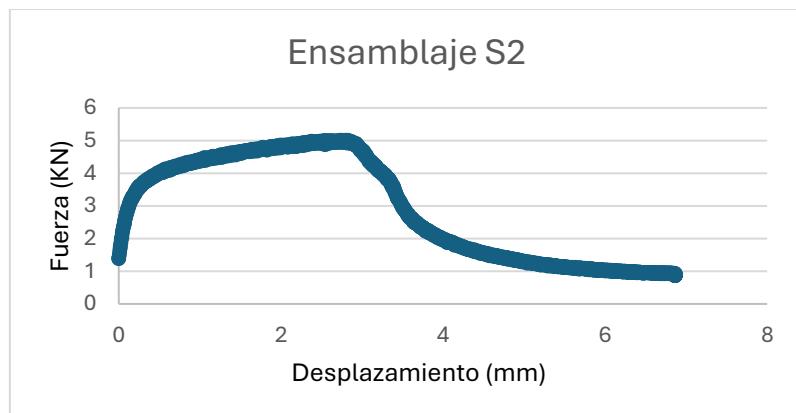


Figura 44: Ensayo a Solape S2

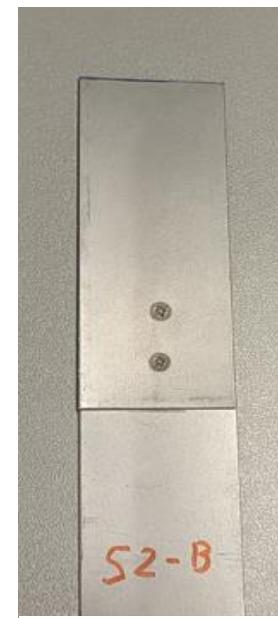


Figura 45: Ensamblaje S2

$F_{MAX}= 5 \text{ KN}$

S3

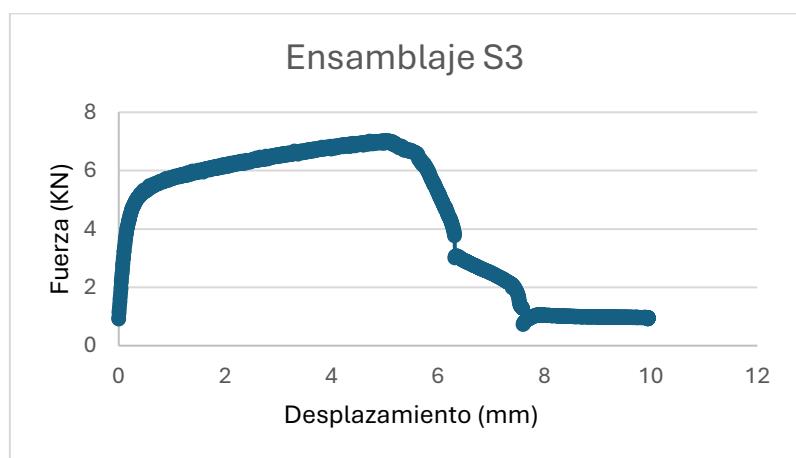


Figura 46: Ensayo a Solape S3



Figura 47: Ensamblaje S3

$F_{MAX}= 7 \text{ KN}$

L1

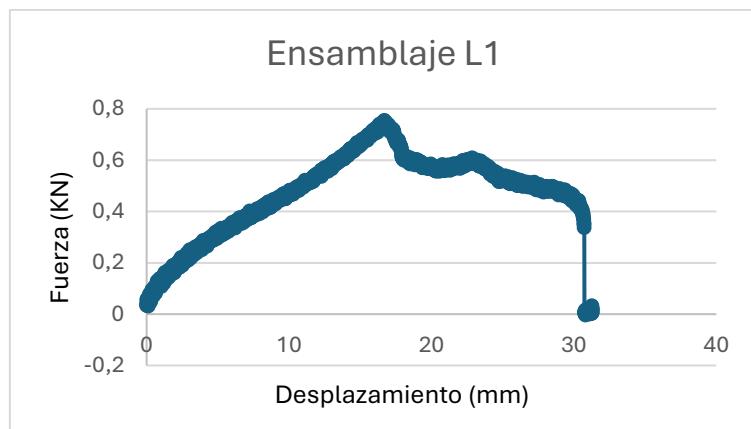


Figura 48: Ensayo a Tracción L1

$F_{MAX}= 754 \text{ N}$



Figura 49: Ensamblaje L1

L2

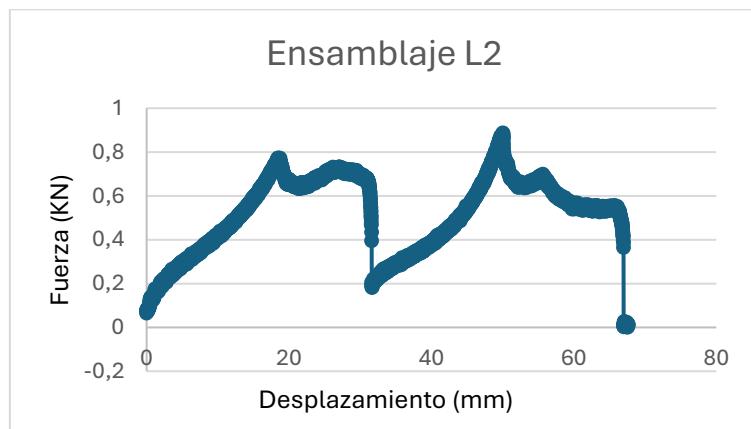


Figura 50: Ensayo a Tracción L2

$F_{MAX}= 906 \text{ N}$



Figura 51: Ensamblaje L2

L3

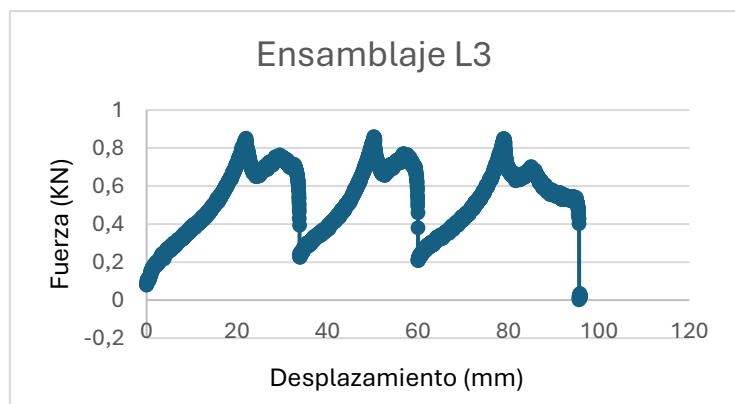


Figura 52: Ensayo a Tracción L3

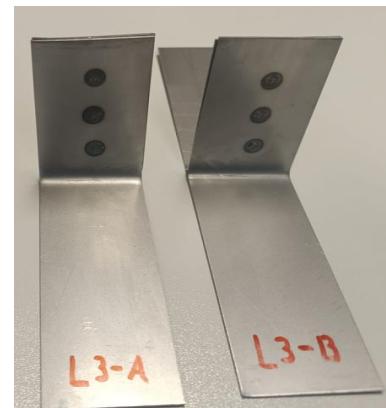


Figura 53: Ensamblaje L3

$F_{MAX} = 861 \text{ N}$

P2

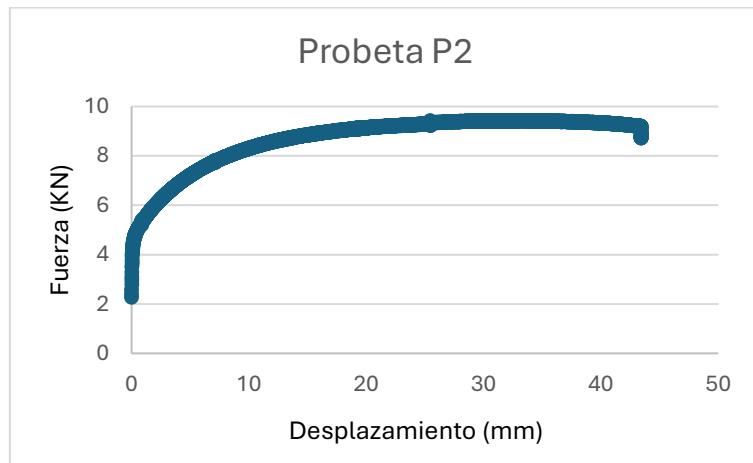


Figura 54: Ensayo a Tracción P2



Figura 55: Probeta P2

6. Modelización con SolidWorks de uniones soldadas por puntos

6.1 Descripción del procedimiento

Una vez realizado los ensayos y, sabiendo el material con el que hemos realizado los ensayos, procedemos a realizar las simulaciones de estos ensayos virtualmente en SolidWorks comparando ambos resultados.

Primero, realizamos los croquis de ambas placas (Solape y Tracción) y continuamos haciendo el ensamblaje de la misma manera que la realizada en el taller y con las mismas medidas.

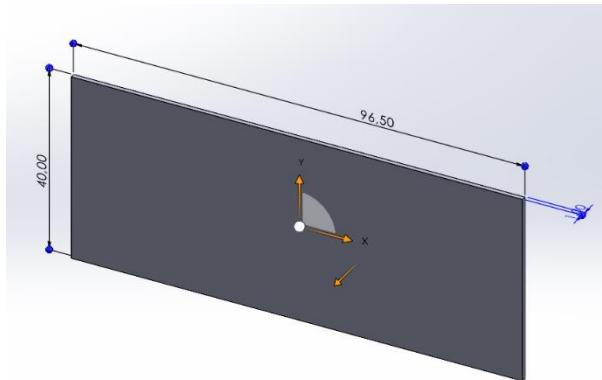


Figura 56: Croquis Placa Solape

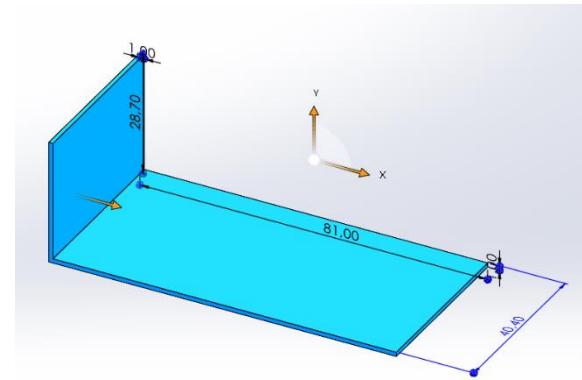


Figura 57: Croquis Placa Tracción

A la hora de ensamblar ambas placas es necesario añadir las relaciones de posición necesarias para que se coloquen de la manera adecuada.



Figura 58: Relaciones de Posición Ensamblaje a Solape

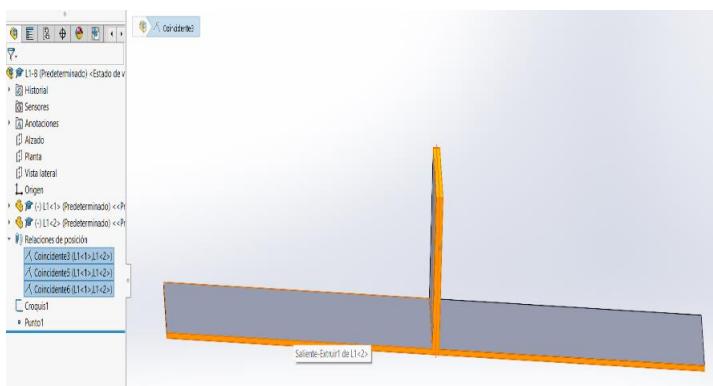


Figura 59: Relaciones de Posición Ensamblaje a Tracción

Una vez que las placas están colocadas, procedemos a realizar el estudio donde añadiremos el material, conexiones y realizaremos la malla.

Para el material utilizaremos el módulo elástico y límite de tracción calculado una vez realizado los ensayos.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	201000	N/mm ²
Coeficiente de Poisson	0.28	N/D
Módulo cortante	79000	N/mm ²
Densidad de masa	7700	kg/m ³
Límite de tracción	300	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	155	N/mm ²
Coeficiente de expansión térmica	1.3e-05	/K
Conductividad térmica	50	W/(m·K)

Figura 60: Propiedades del Material Utilizado

Con respecto a las conexiones, en el apartado de conectores, seleccionamos la soldadura por puntos donde nos piden que seleccionemos las dos caras (una de cada pieza) donde va a actuar la soldadura, seleccionamos el punto, colocado anteriormente, donde se va a colocar la soldadura y añadimos el diámetro de soldadura correspondiente.

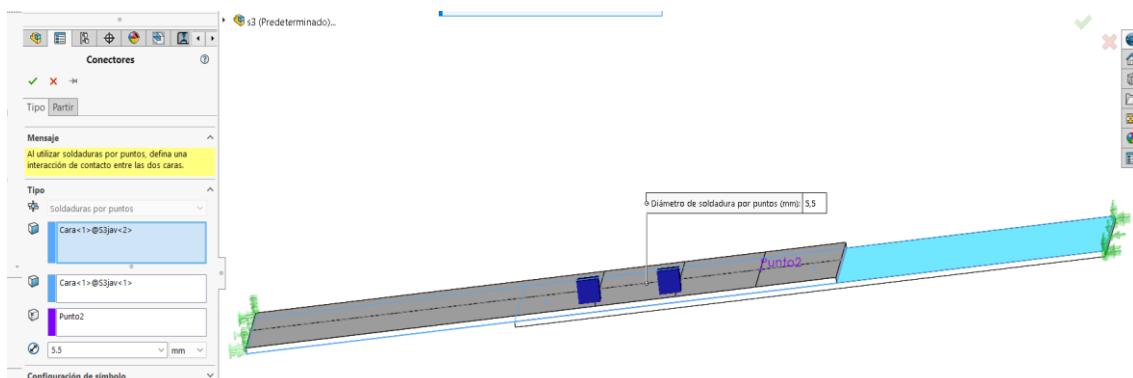


Figura 61: Creación de Puntos de Soldadura

En interacción entre componentes lo pondremos por contacto, para que todo el esfuerzo recaiga en la soldadura siendo éste el objetivo del análisis.

Como sujeción, utilizaremos la geometría fija que actuará como las mordazas de la máquina y en la opción de geometrías avanzadas aplicaremos un desplazamiento en la dirección "Eje X" de 0.1 restringiendo las otras dos direcciones, simulando así el trabajo que realiza las mordazas en el ensayo.

Por último, crearemos la malla y ejecutaremos el estudio para ver los resultados.

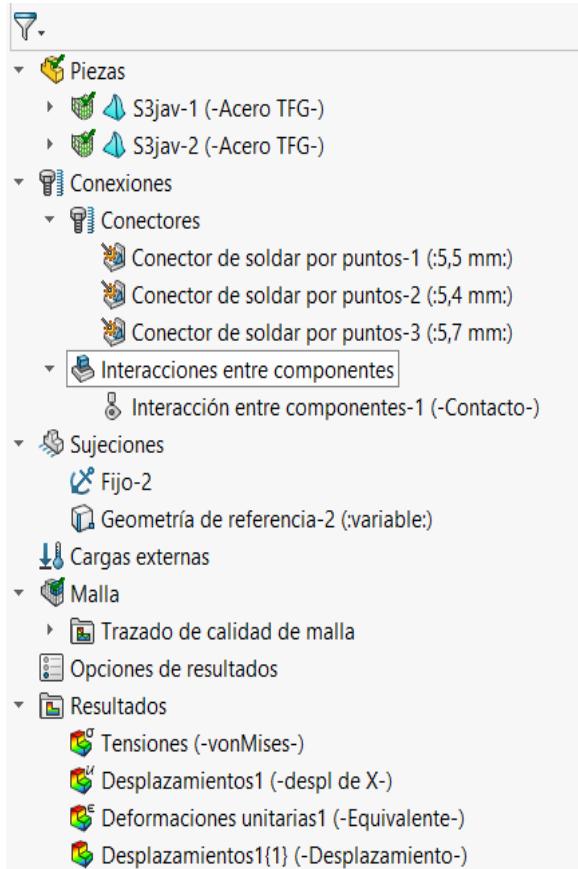


Figura 62: Resumen del Estudio Realizado

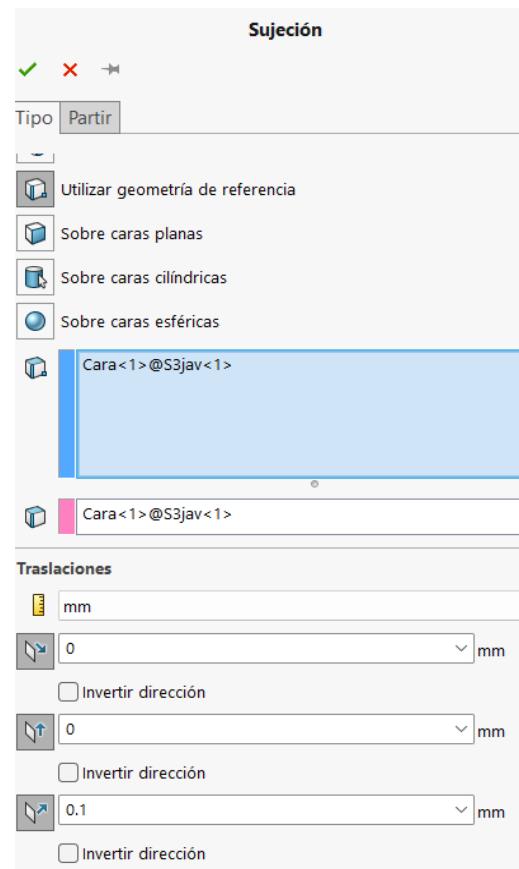


Figura 63: Aplicación del Desplazamiento

6.2 Resultados de esfuerzos en puntos de soldadura

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones.

Para ello, aplico un desplazamiento impuesto de 0,1 mm al extremo de la pieza, lo que se busca con estas simulaciones es determinar la relación entre la fuerza de reacción, que sería la fuerza medida en la máquina de ensayos, con el reparto de esfuerzos sobre el punto de soldadura.

Este reparto de esfuerzos es el que utilizaremos para llevar a cabo cálculos de tensiones en el ANEXO 4 y ANEXO 5.

Simulación del Ensayo a solape

Ensayo	S1	S2		S3		
Fuerza Cortante (N)	3430,3	420,45	486,09	604,25	330,78	621,63

Tabla 2: Fuerzas Simuladas en Ensayo a Solape

En estas simulaciones, vemos como se reparten los esfuerzos en función del número de puntos de soldadura que contiene además de las fuerzas de reacción de cada uno de los ensamblajes.

S1

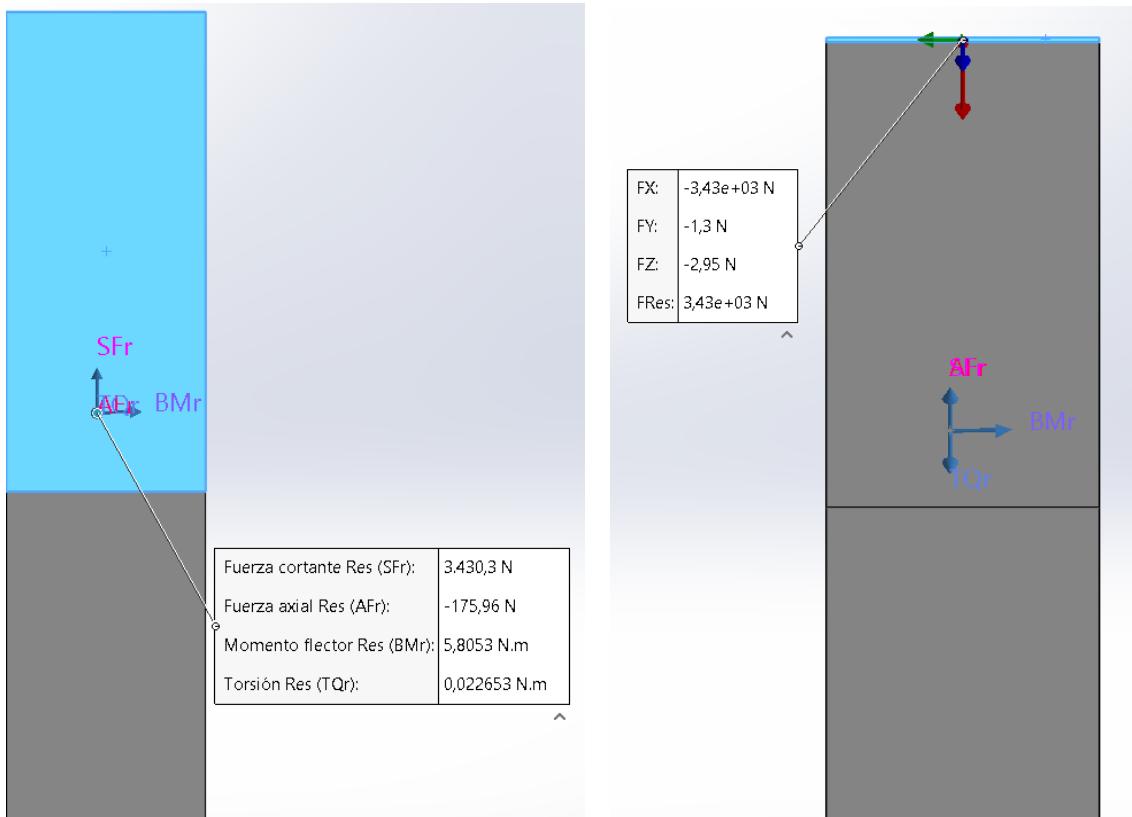


Figura 64: Fuerzas Unión Soldada S1

Figura 65: Fuerzas de Reacción S2

En este ensamblaje, al haber un punto de soldadura vemos como coincide el valor de la fuerza cortante de la unión soldada con la Fuerza de Reacción.

Comparación de la Probeta S1 deformada con la simulada en SolidWorks



Figura 66: Probeta S1 después del ensayo

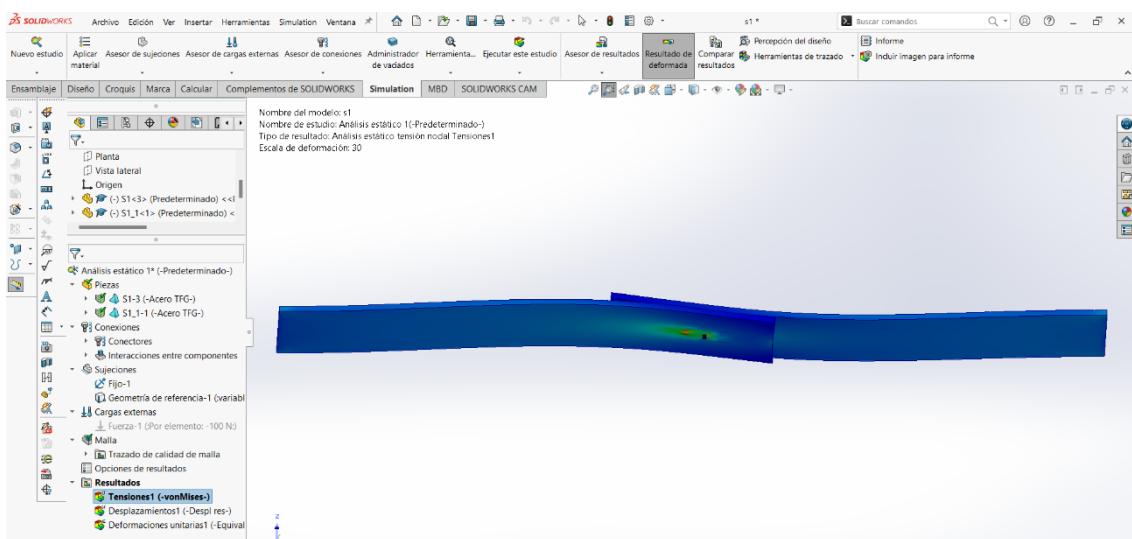


Figura 67: Probeta S1 deformada virtualmente en SolidWorks

Vemos las similitudes de cómo se deforma la pieza realmente a como se vería virtualmente en SolidWorks. Además, se puede observar que el punto donde mayor tensión hay es en el punto de soldadura, que es realmente lo esperado.

S2

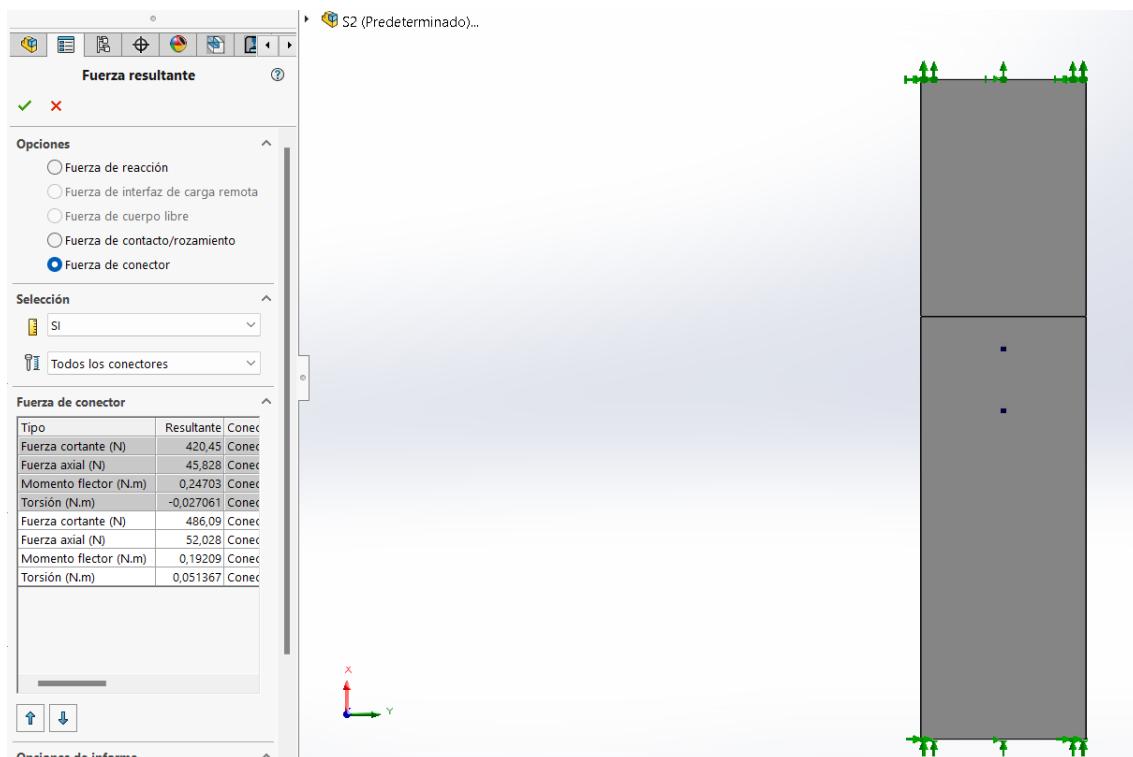


Figura 68: Fuerzas Unión Soldada S2

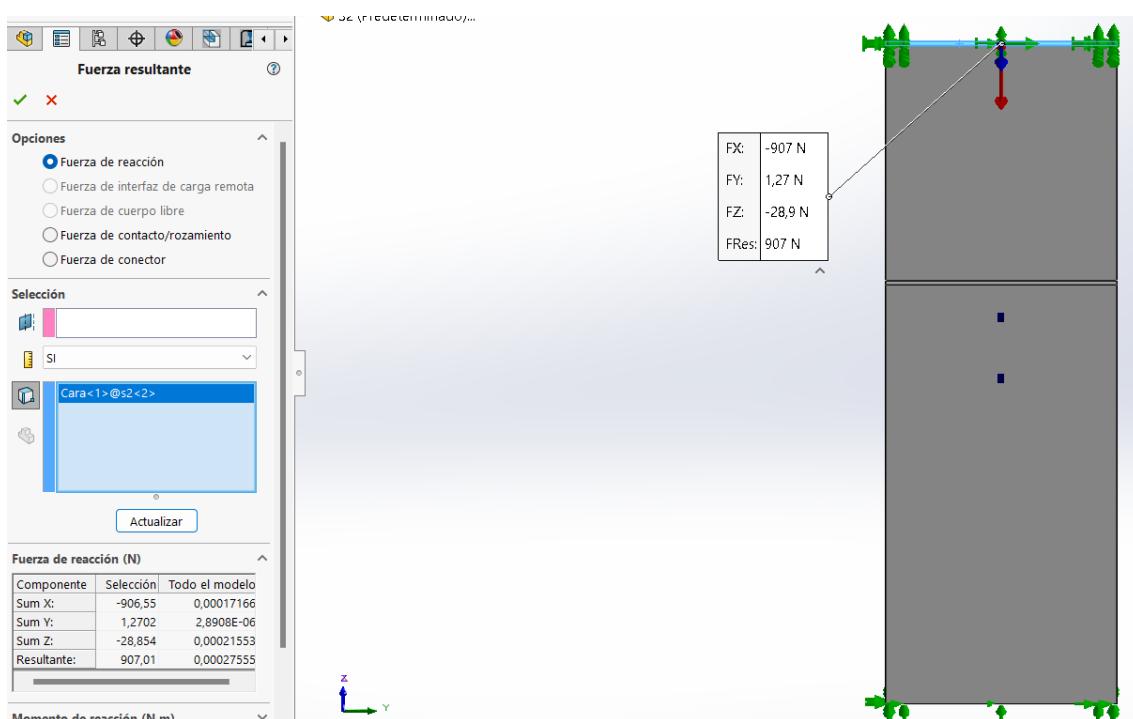


Figura 69: Fuerzas de Reacción S2

Para el Ensamblaje S2, vemos que se reparten las fuerzas equitativamente llevándose el 53,6 % el más cercano a la aplicación de la fuerza.

Comparación de la Probeta S2 deformada con la simulada en SolidWorks



Figura 70: Probeta S2 después del ensayo

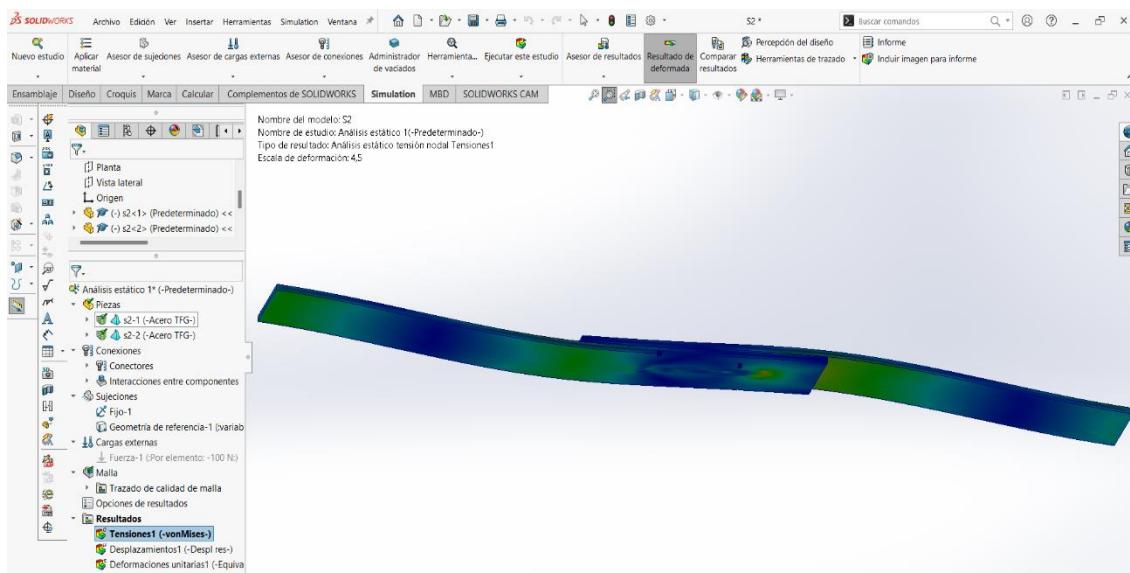


Figura 71: Probeta S2 deformada virtualmente en SolidWorks

En este caso, vemos como las piezas se deforman más que con 1 punto de soldadura y comprobamos que la simulación da unos resultados bastante coherentes con respecto a la deformación y esa tensión máxima en uno de los puntos de soldadura.

S3

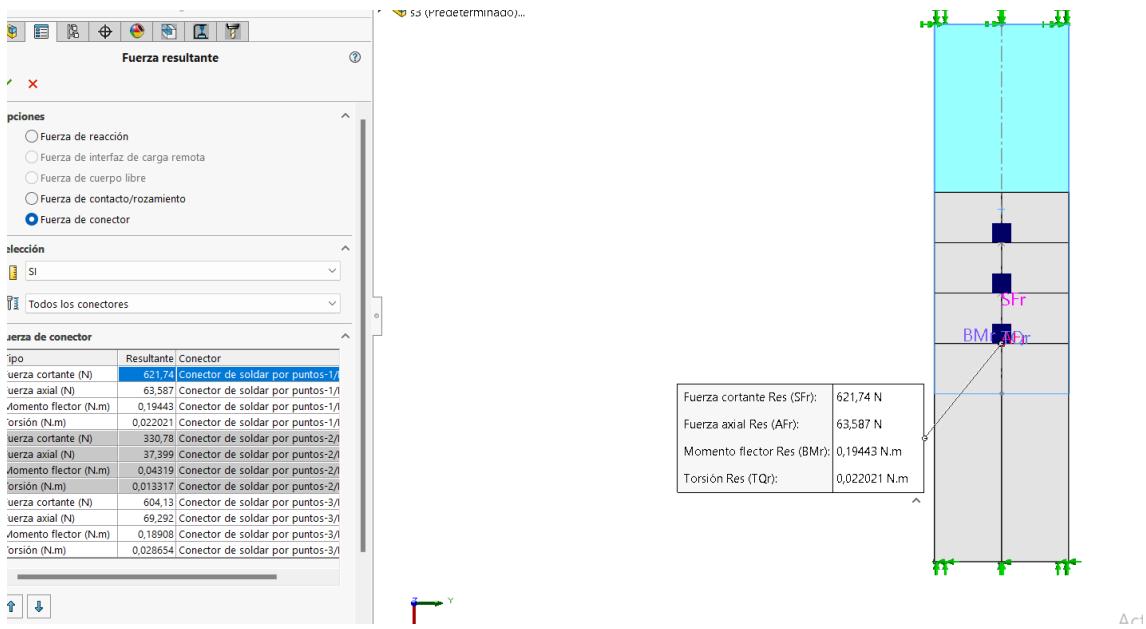


Figura 72: Fuerzas Unión Soldada S3

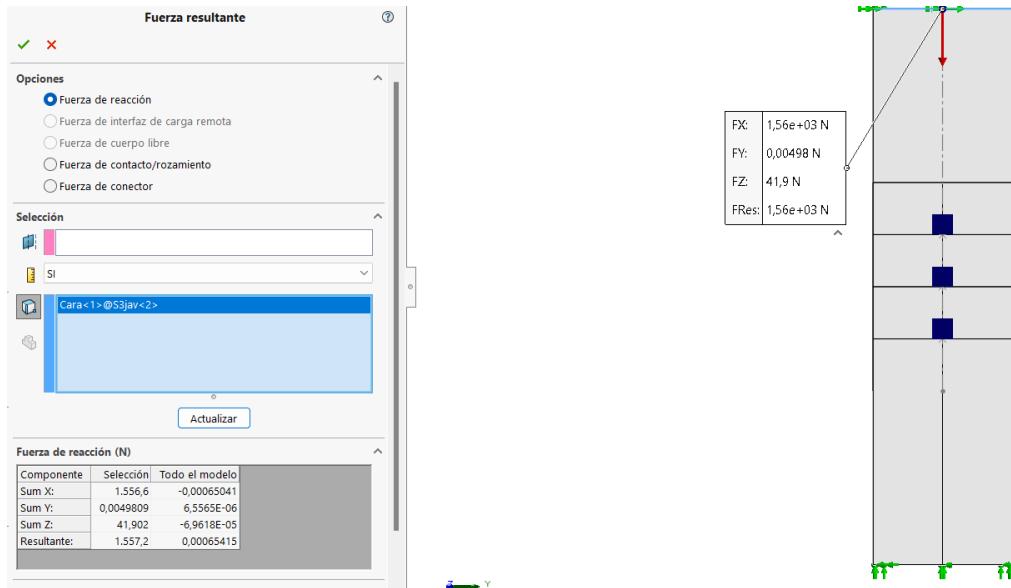


Figura 73: Fuerzas de Reacción S3

Para el Ensamblaje S3, se reparten en un 40% los puntos de soldadura que se encuentran en los extremos y un 20% para el que se encuentra en medio de los dos.

Comparación de la Probeta S3 deformada con la simulada en SolidWorks


Figura 74: Probeta S3 después del ensayo

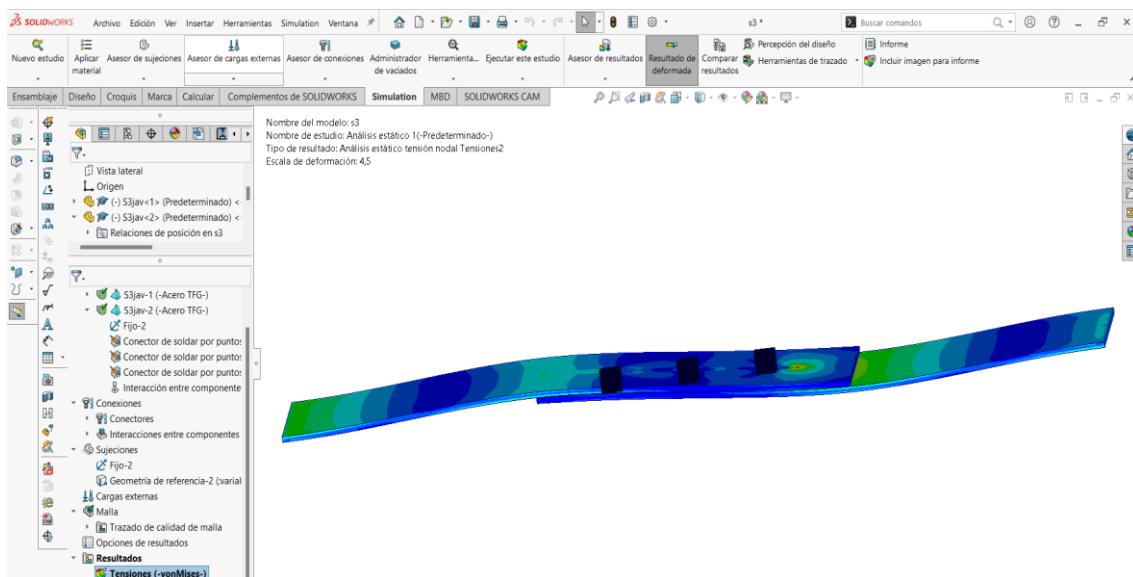


Figura 75: Probeta S3 deformada virtualmente en SolidWorks

En el Ensamblaje S3, vemos que la deformación se hace más notable que en los ensayos anteriores y, de acuerdo con lo visto en las imágenes anteriores (el punto de soldadura entre medio de los dos se despega y no rompe), vemos que los picos de tensión se producen en los puntos de soldadura que hay en los extremos.

Simulación del Ensayo a tracción

Ensayo	L1	L2		L3		
Fuerza Axial (N)	57,416	129,7	0	236,28	0	0
Momento Flector (N.mm)	444,82	830,08	0	876,61	0	0

Tabla 3: Fuerzas y Momentos Ensayos a Tracción

En estas simulaciones, vemos como se reparten los esfuerzos en función del número de puntos de soldadura que contiene además de las fuerzas de reacción de cada uno de los ensamblajes.

L1

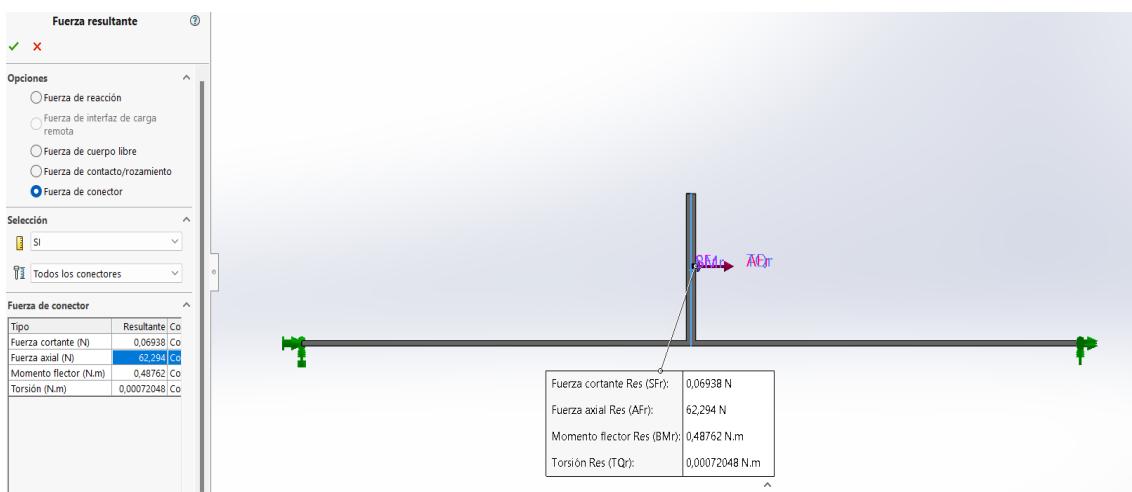


Figura 76: Fuerzas Unión Soldada L1

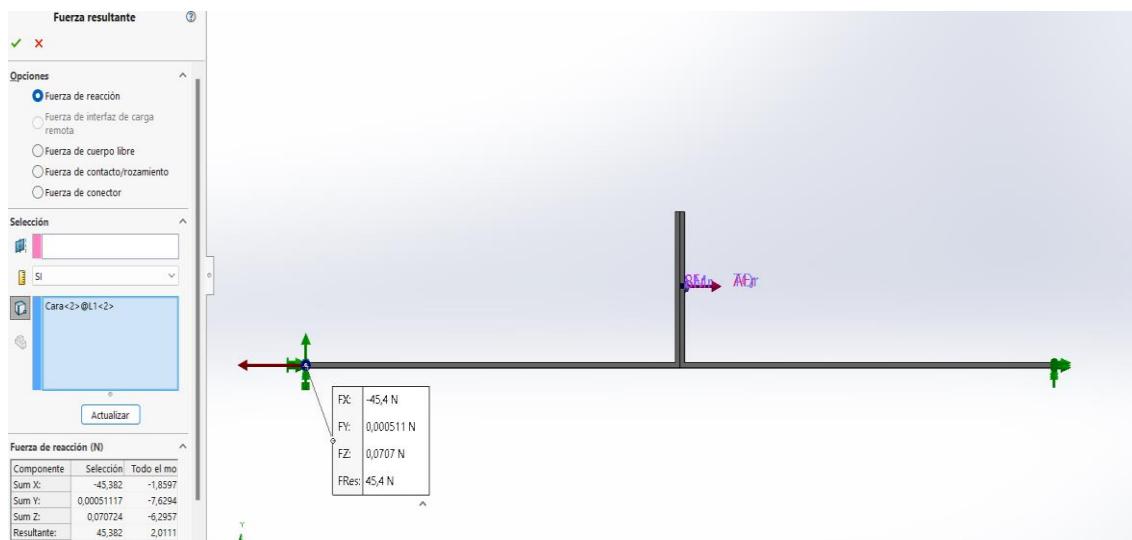


Figura 77: Fuerzas de Reacción L1

En este ensayo se produce el efecto de “apalancamiento” donde la fuerza en los puntos de soldadura es mayor que la aplicada inicialmente, siendo de 42,1 N.

De esta manera, podemos calcular el Reparto de fuerzas que lleva el punto de soldadura con respecto a la total, siendo de un 137 %.

Comparación de la Probeta L1 deformada con la simulada en SolidWorks



Figura 78: Probeta L1 después del ensayo

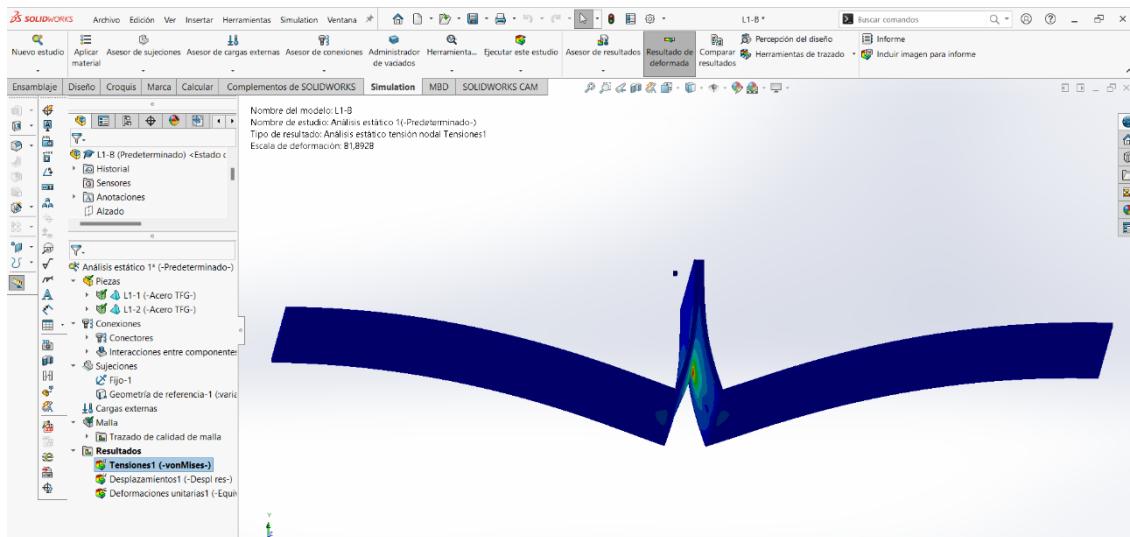


Figura 79: Probeta L1 deformada virtualmente en SolidWorks

La simulación de este ensayo se asemeja bastante a lo que ocurrió anteriormente en el ensayo ya que reproduce bastante bien como queda deformada la pieza y el punto donde se produce la máxima tensión que, como esperábamos, ocurre en el punto de soldadura.

L2

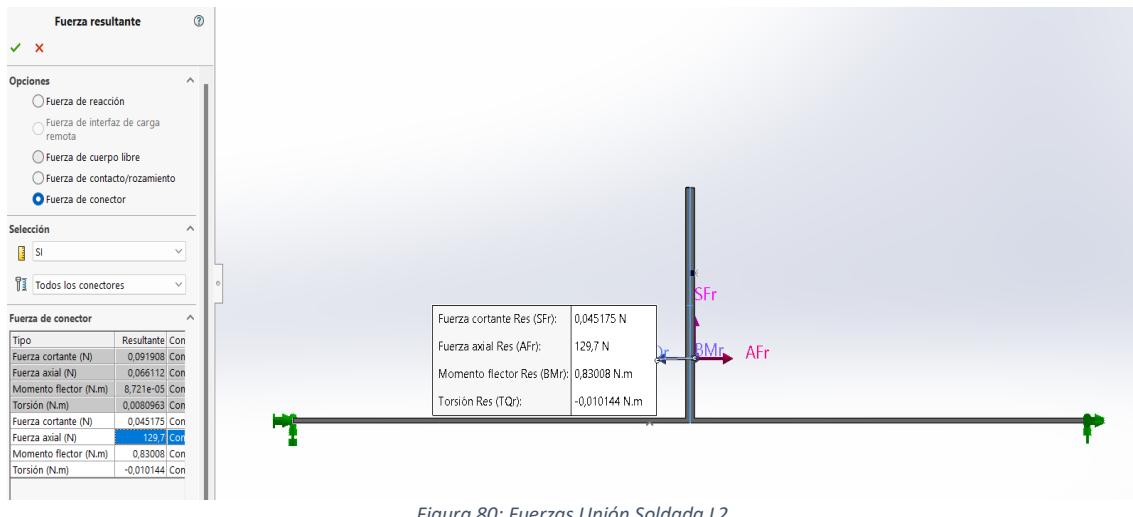


Figura 80: Fuerzas Unión Soldada L2

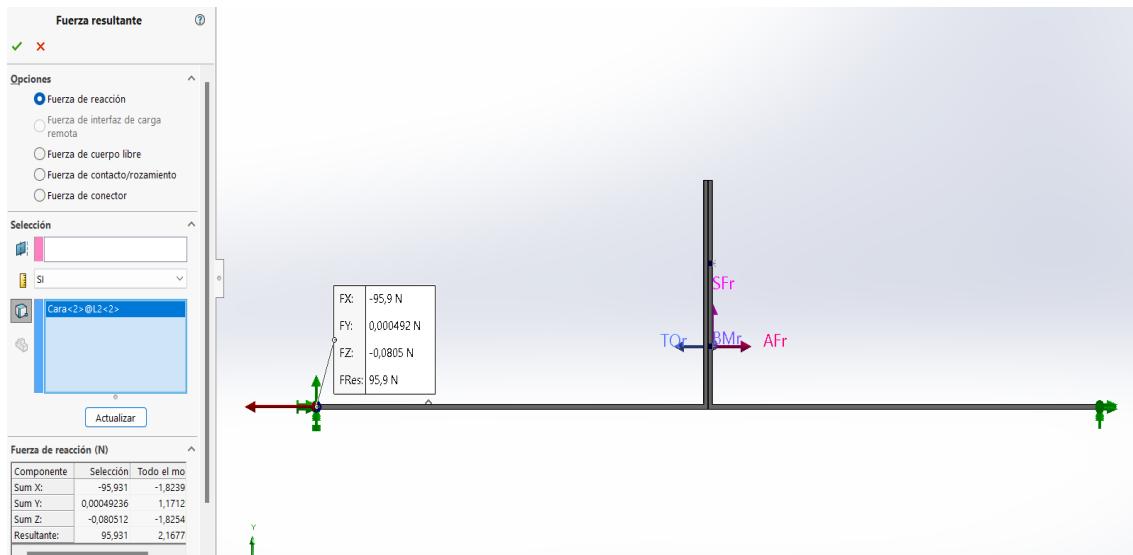


Figura 81: Fuerzas de Reacción L2

En este ensayo se produce el efecto de “apalancamiento” donde la fuerza en los puntos de soldadura es mayor que la aplicada inicialmente, siendo de 95,9 N.

De esta manera, podemos calcular el Reparto de fuerzas que lleva el punto de soldadura con respecto a la total, siendo de un 135 %.

Comparación de la Probeta L2 deformada con la simulada en SolidWorks



Figura 82: Probeta L2 después del ensayo

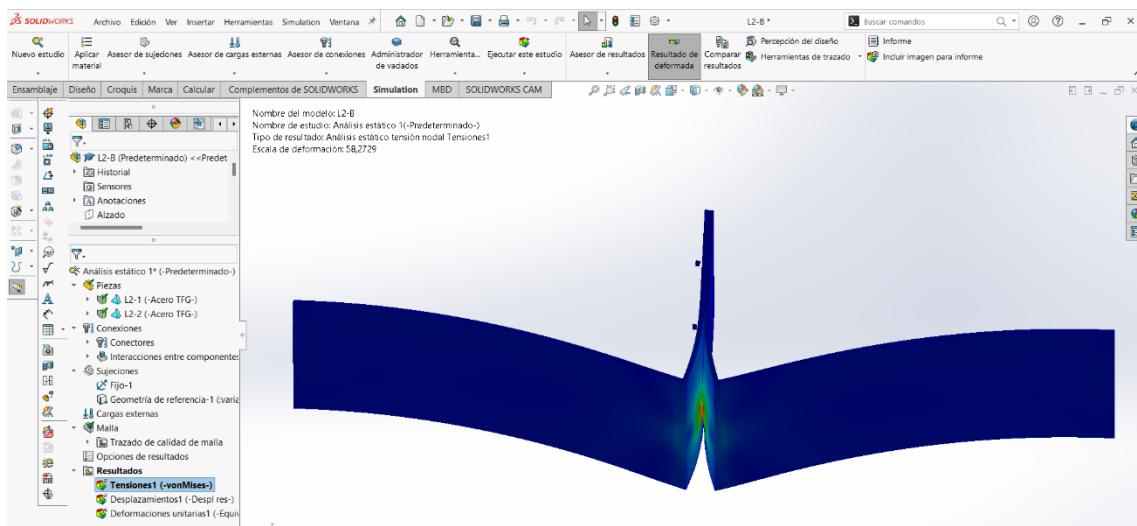


Figura 83: Probeta L2 deformada virtualmente en SolidWorks

Tanto en este ensayo a tracción como en el siguiente, veremos que, en la simulación, el primer punto de soldadura se lleva todos los esfuerzos consigo, no siendo así la realidad, ya que en el ensayo los puntos de soldadura van rompiendo uno a uno.

L3

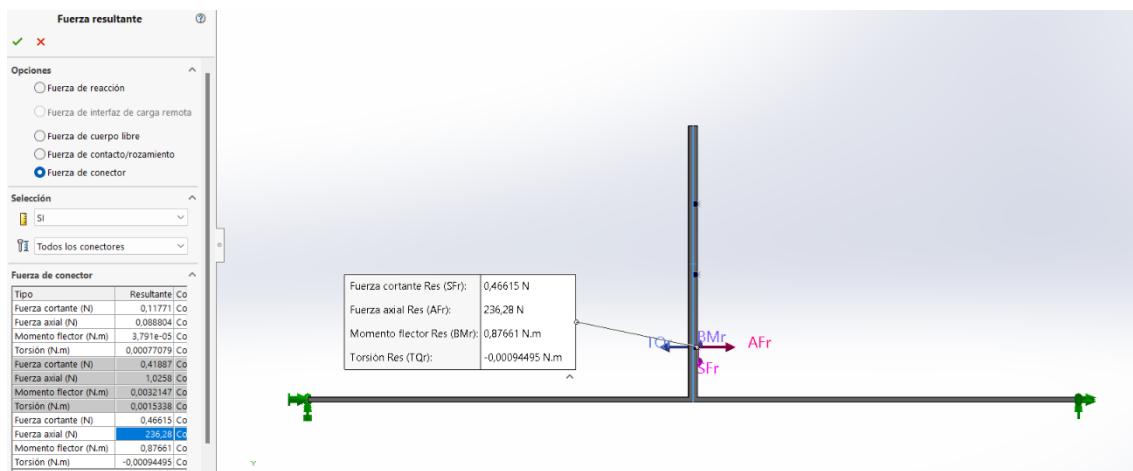


Figura 84: Fuerzas Unión Soldada L3

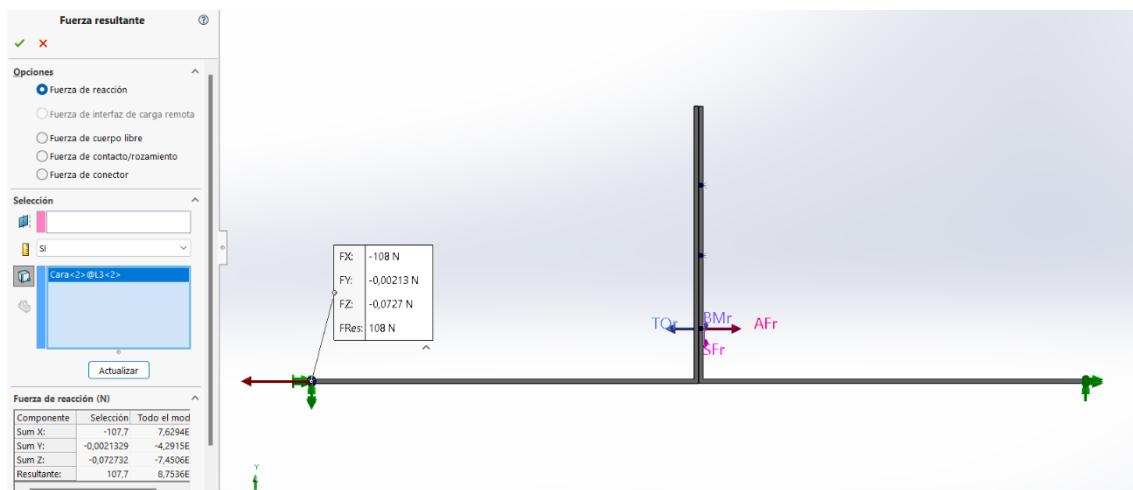


Figura 85: Fuerzas de Reacción L3

En este ensayo se produce el efecto de “apalancamiento” donde la fuerza en los puntos de soldadura es mayor que la aplicada inicialmente, siendo de 107,7 N.

De esta manera, podemos calcular el Reparto de fuerzas que lleva el punto de soldadura con respecto a la total, siendo de un 219 %.

Como se puede comprobar solo trabaja un punto de soldadura (el de más abajo) de una manera parecida al ensayo donde sí iban rompiendo de uno en uno.

Comparación de la Probeta L3 deformada con la simulada en SolidWorks


Figura 86: Probeta S1 después del ensayo

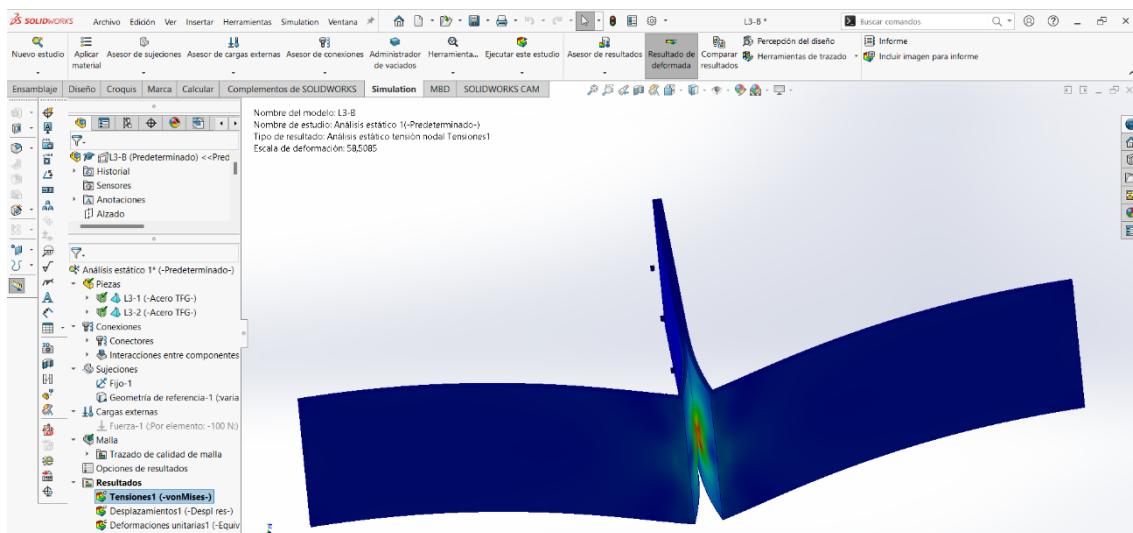


Figura 87: Probeta S1 deformada virtualmente en SolidWorks

Como hemos dicho anteriormente, se observa que, el primer punto de soldadura se lleva todos los esfuerzos consigo, no siendo así la realidad, ya que en el ensayo los puntos de soldadura van rompiendo uno a uno.

7. Determinación de estado tensional en puntos de soldadura

7.1 Ensayo a solape

En este ensayo, los puntos de soldadura están sometidos a esfuerzos a cortante ya que tanto la fuerza axial como los momentos flectores son aproximadamente 0.

Para calcular estos esfuerzos, nos serviremos de la ecuación: $\tau = \frac{N_x}{A}$; donde los valores son:

Ensayo	S1	S2	S3
Fuerza Axial (N)	3500	5000	7500
Área Soldadura (mm ²)	34	20,75	23,76
Tensiones (MPa)	102,92	129,15	117,85

Tabla 4: Resultados Analíticos Ensayo a Solape

Con respecto a los resultados de las tensiones, nos quedaremos con el valor medio de los tres con un valor de **116,64 MPa**.

En el ANEXO 3 podemos ver más en detalle estos cálculos.

7.2 Ensayo a tracción

En el ensayo a tracción vemos como que ocurre todo lo contrario al ensayo a solape ya que, en este caso, los puntos de soldadura están sometidos a esfuerzos axiales y flectores, siendo 0 los correspondientes a esfuerzos cortantes.

Por tanto, para calcular estos esfuerzos, nos guiamos de la ecuación $\sigma = \frac{N_x}{A} + \frac{M_z}{W_z}$, cuyos valores son:

Ensayo	L1	L2	L3
Fuerza Axial (N)	754	906	861
Área Soldadura (mm ²)	33,18	43,71	39,15
Momento Flector (N*mm)	8098,35	7836,9	6988,74
Módulo Resistente (mm ⁴)	26,96	40,76	34,55
Tensiones (MPa)	331,13	220,26	250,55

Tabla 5: Resultados Analíticos Ensayo a Tracción

En el ANEXO 4 podemos ver más en detalle estos cálculos.

De estos últimos resultados, nos quedaremos con el valor medio de los tres con un valor de **267,31 MPa**.

En el ANEXO 5, justificamos la diferencia entre estos resultados debido a la dispersión que existe entre el tamaño de los diferentes puntos de soldadura realizados en cada una de las probetas.

Además, existe una dispersión con respecto al material ya que los valores de la tensión de Fluencia y el Módulo de Young varían entre ellos.

Para concluir, estos valores finales se acercan bastante a los valores de resistencia dados por el fabricante que como hemos visto anteriormente son: $\sigma_u = 270-330 \text{ MPa}$; $\tau_u = 135-165 \text{ MPa}$

Por tanto, damos como buenos estos resultados y la realización del ensayo.

8. Otras tipologías de unión simulados en SolidWorks

En este apartado analizaremos cómo se comportan las uniones soldadas en otro tipo de ensamblajes. También realizaremos estudios de frecuencia para comprobar la Rigidez de los diferentes ensamblajes

Geometrías de los ensamblajes analizados

El primero se trata de dos placas en U soldadas entre sí con uno, dos y tres puntos de soldadura, mientras que el segundo se trata de una placa en L soldada a una placa rectangular con uno, dos y tres puntos de soldadura.

Ensamblaje en U

Se trata de la misma pieza duplicada y colocadas de la manera que se muestra en las Figuras 87, 88 y 89. Los puntos de soldadura tendrán un diámetro de 3 mm y, en función del número de puntos de soldadura que contenga, los denominaremos U1 (un punto de soldadura), U2 (dos puntos de soldadura) y U3 (tres puntos de soldadura).

U1

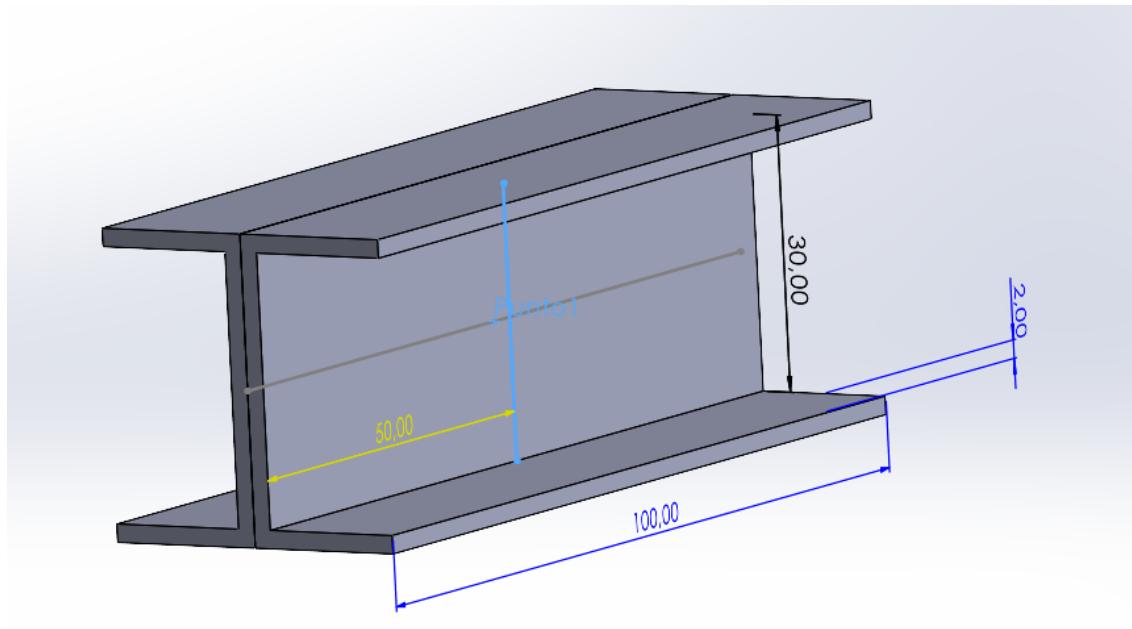


Figura 88: Geometría del ensamblaje U1

U2

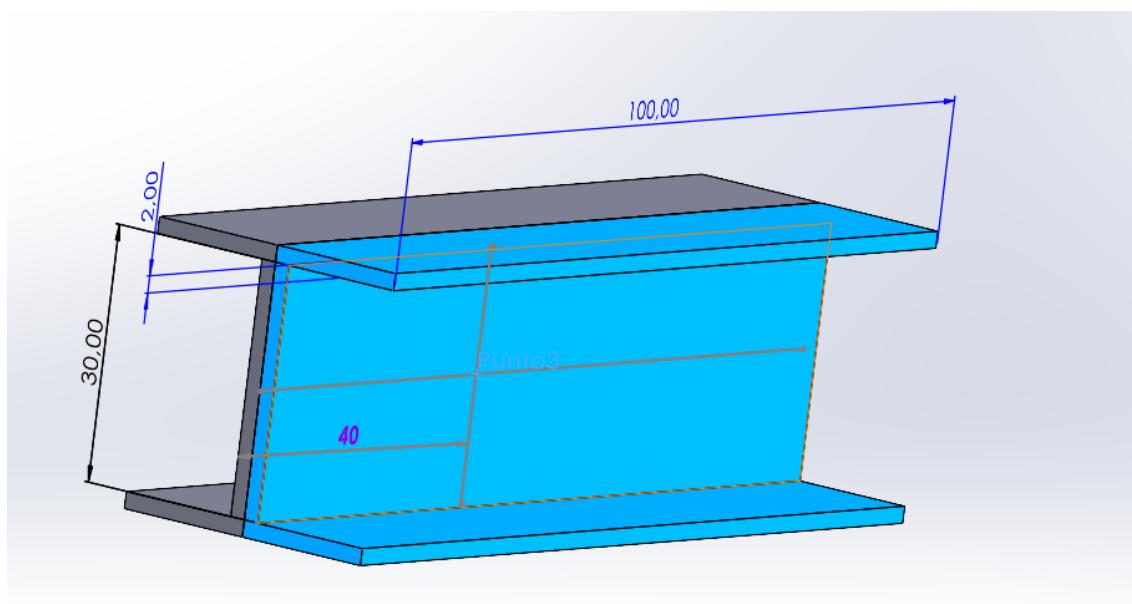


Figura 89: Geometría del ensamblaje U2

U3

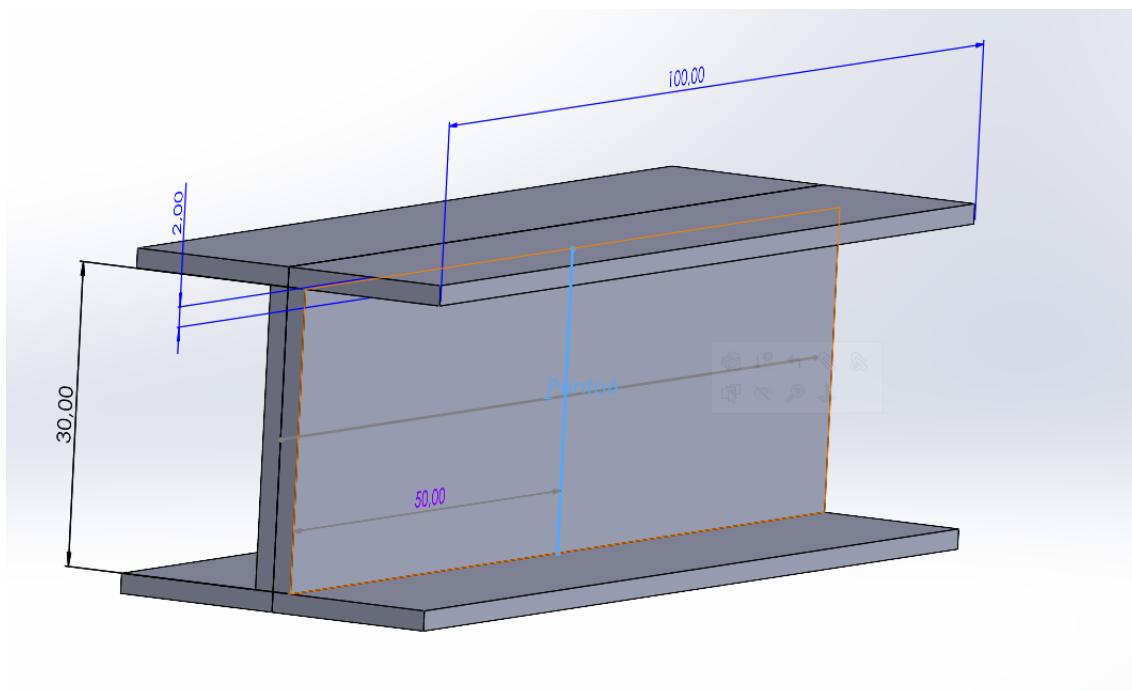


Figura 90: Geometría del ensamblaje U3

Ensamblaje en L

Se trata de una placa rectangular a la que le hemos soldado otra placa con una geometría en L como se puede observar en las Figuras 90, 91 y 92.

Los puntos de soldadura tienen un diámetro de 3 mm y, en función de la cantidad de puntos de soldadura que contenga, los denominaremos Placa en L1 (un punto de soldadura) Placa en L2 (dos puntos de soldadura) y Placa en L3 (tres puntos de soldadura).

Placa en L1

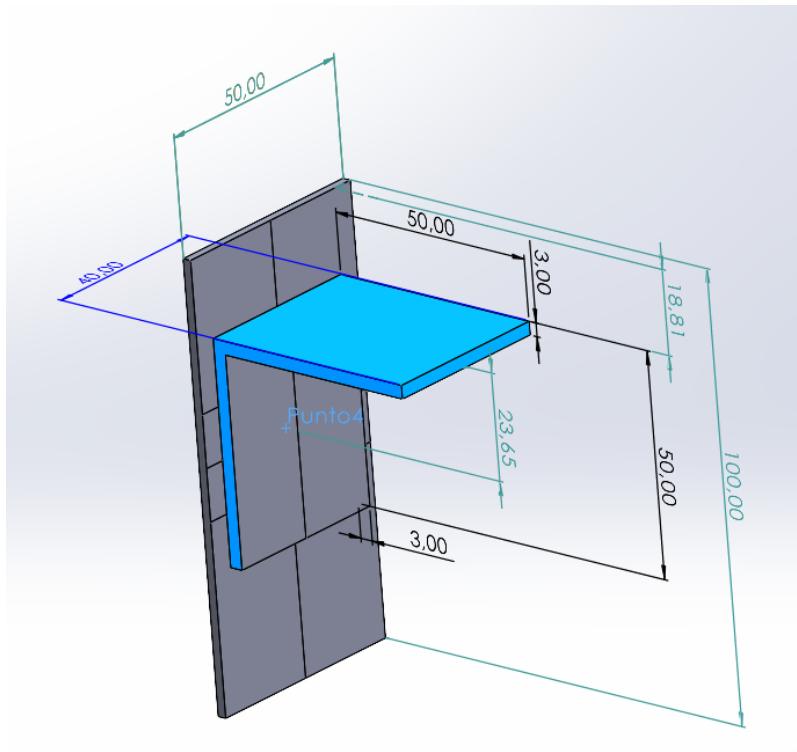


Figura 91: Geometría del ensamblaje Placa en L1

Placa en L2

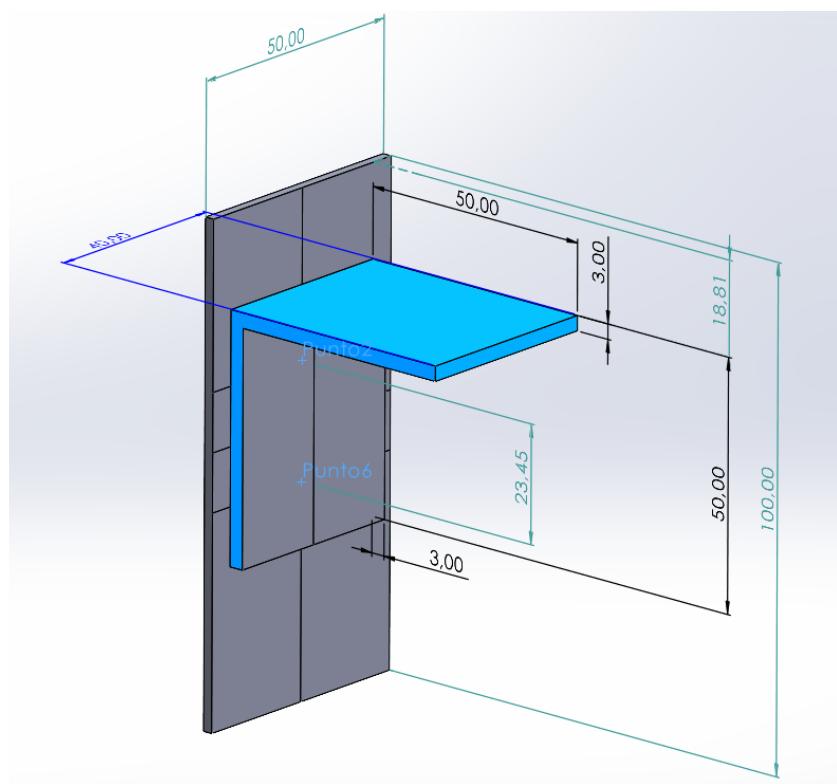


Figura 92: Geometría del ensamblaje Placa en L2

Placa en L3

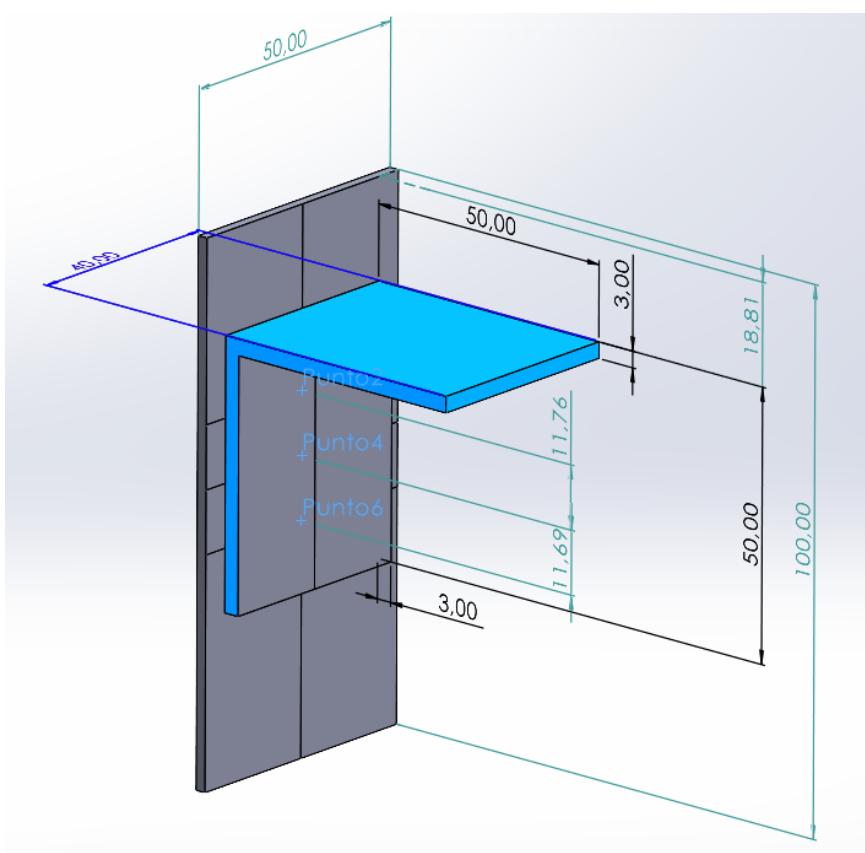


Figura 93: Geometría del ensamblaje Placa en L3

Estudios de Rígidez

En estas simulaciones veremos cómo se comporta los diferentes ensamblajes con respecto a su rigidez, y como va variando esta última en función de los puntos de soldadura que añadimos.

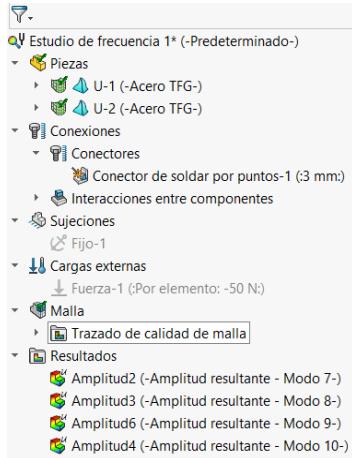


Figura 94: Resumen Estudio de Frecuencia

Realizaremos un cálculo de frecuencias naturales donde no consideraremos ninguno de los apoyos (condiciones libre-libre) y tampoco consideraremos ningún tipo de carga.

Los resultados obtenidos muestran las formas y frecuencias de los modos propios.

Para ello, utilizaremos las formas modales 7, 8, 9 y 10 para los tres tipos de Ensamblajes y compararemos los resultados. Los 6 modos anteriores no se consideran ya que son modos como sólido rígido, siendo el 7 el primer modo como sólido elástico.

Ensamblaje en U

U1

Forma modal 7

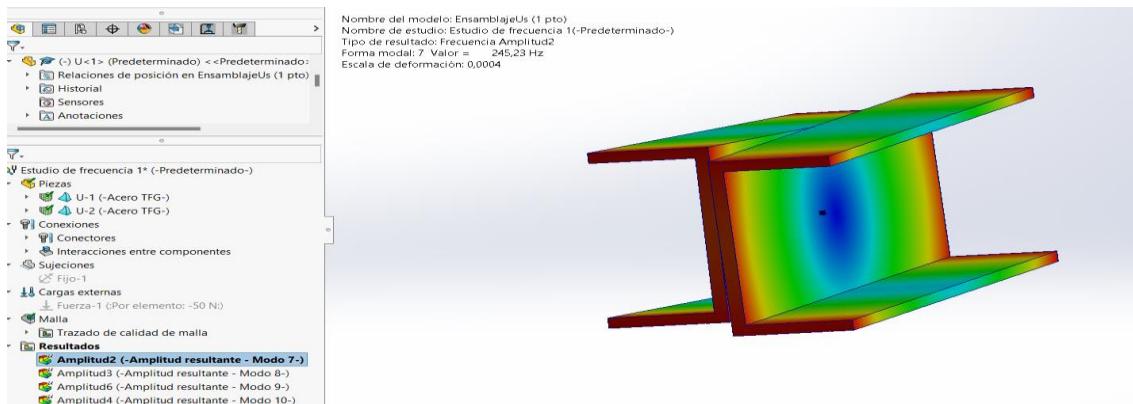


Figura 95: Estudio de Rígidez U1 Forma Modal 7

Forma modal 8

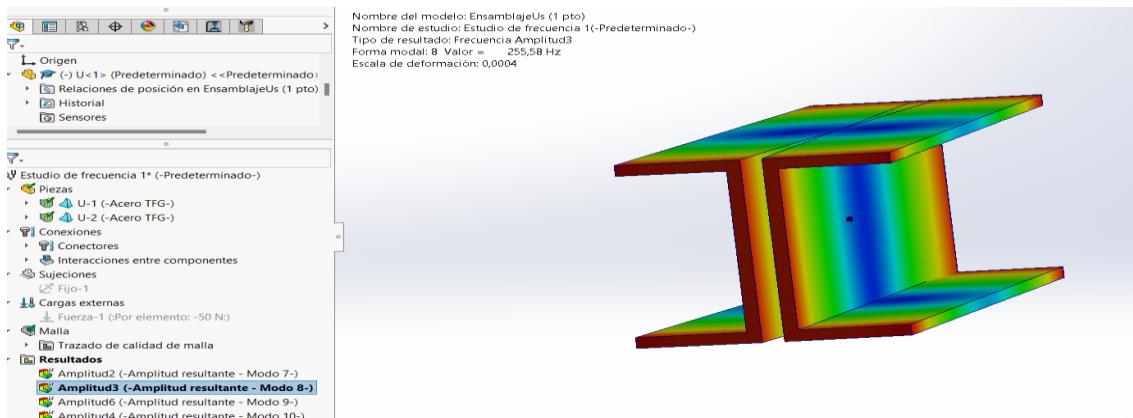


Figura 96: Estudio de Rígidez U1 Forma Modal 8

Forma modal 9

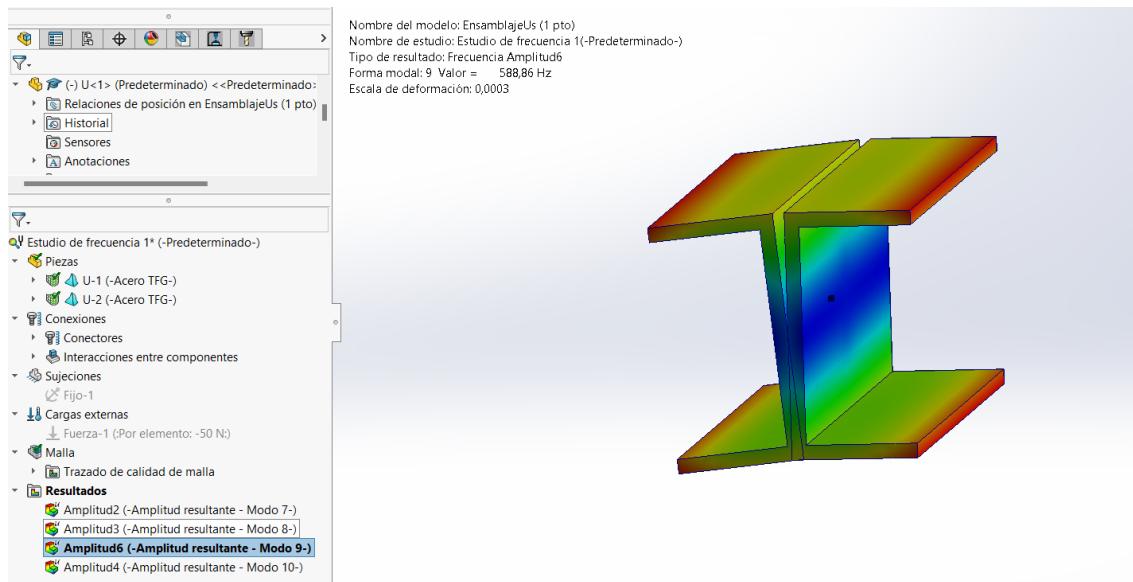


Figura 97: Estudio de Rígidez U1 Forma Modal 9

Forma modal 10

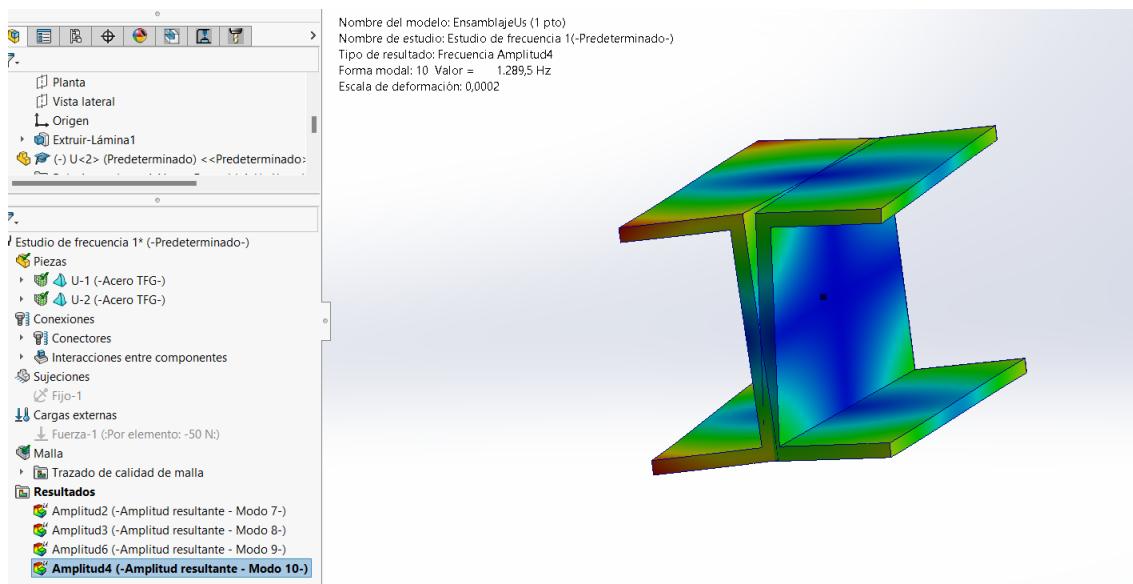


Figura 98: Estudio de Rígidez U1 Forma Modal 10

U2

Forma modal 7

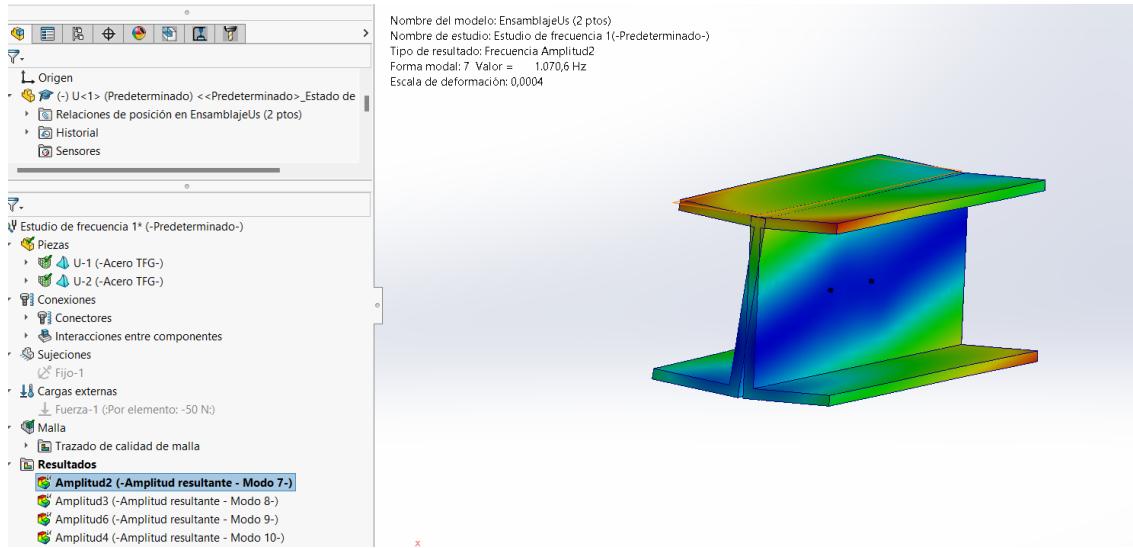


Figura 99: Estudio de Rígidez U2 Forma Modal 7

Forma modal 8

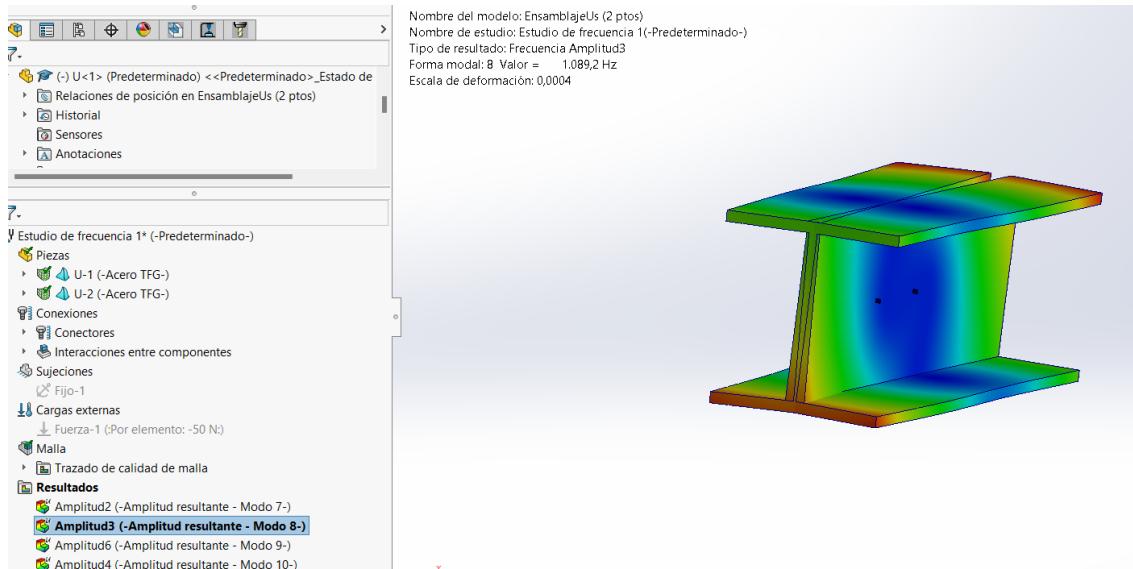


Figura 100: Estudio de Rígidez U2 Forma Modal 8

Forma modal 9

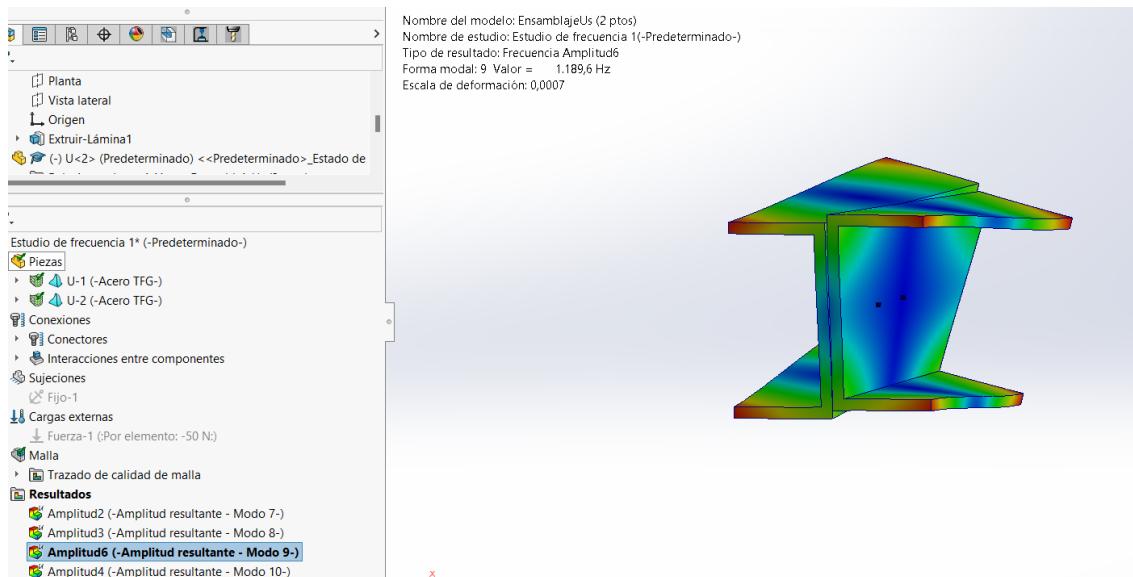


Figura 101: Estudio de Rígidez U2 Forma Modal 9

Forma modal 10

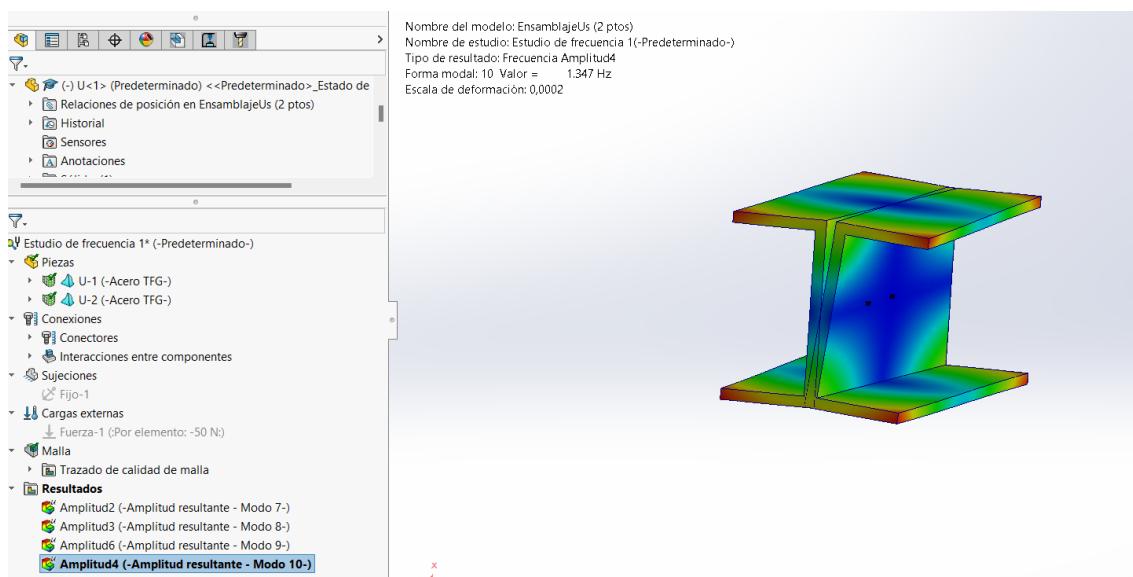


Figura 102: Estudio de Rígidez U2 Forma Modal 10

U3

Forma modal 7

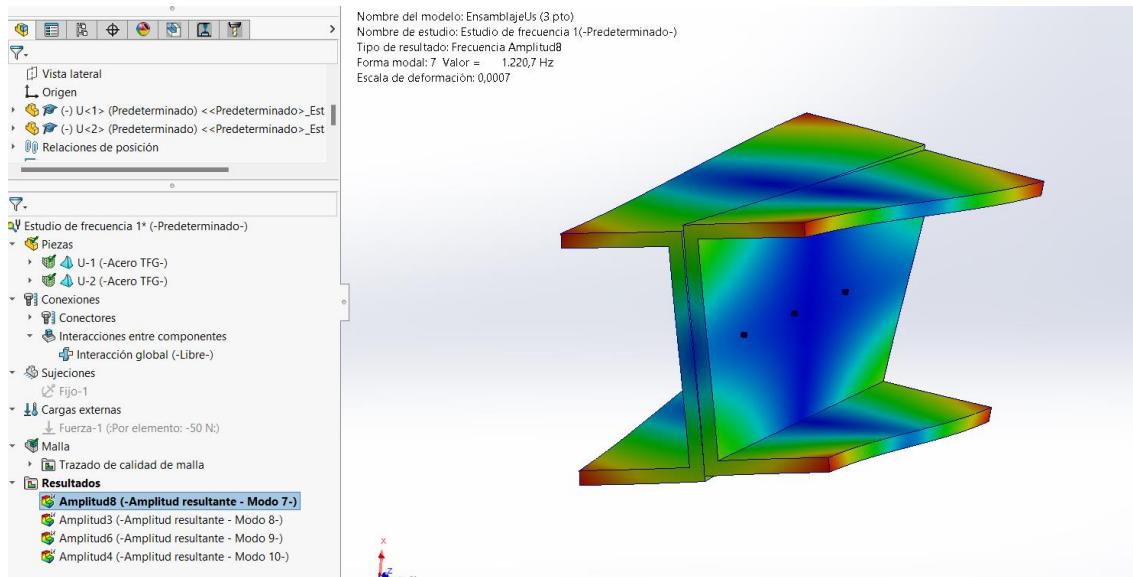


Figura 103: Estudio de Rígidez U3 Forma Modal 7

Forma modal 8

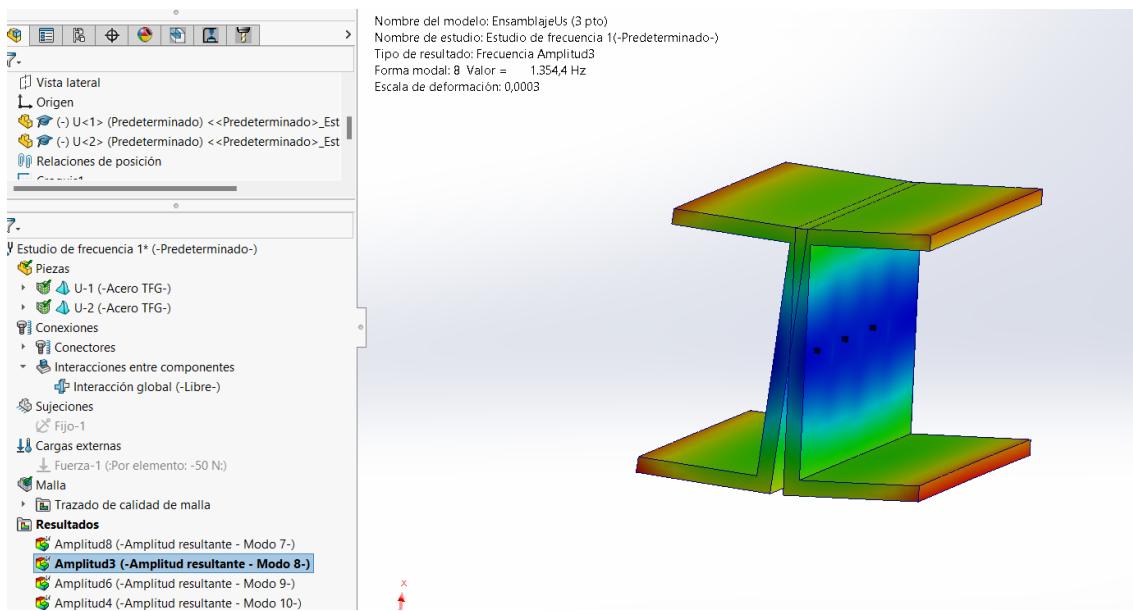


Figura 104: Estudio de Rígidez U3 Forma Modal 8

Forma modal 9

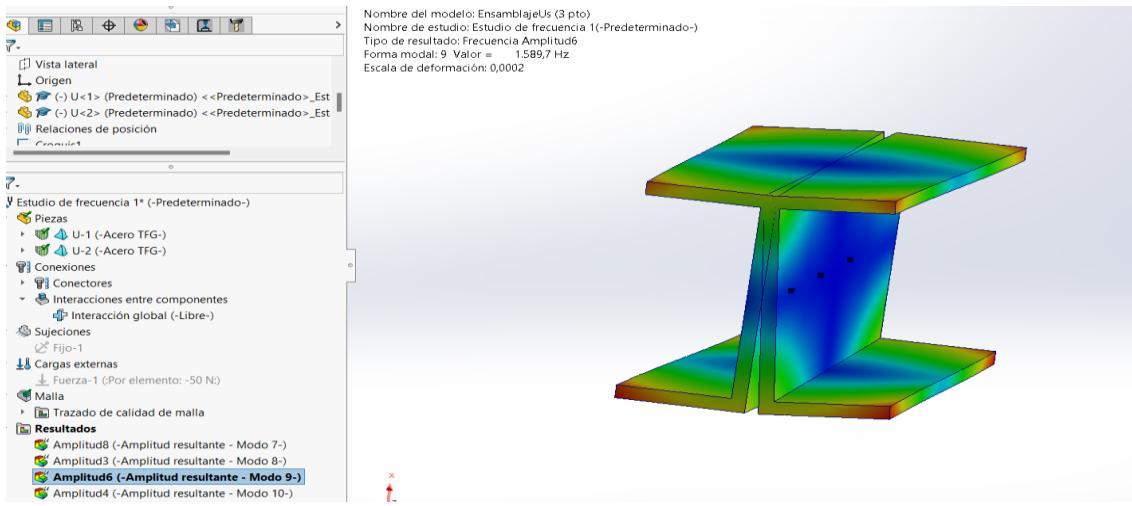


Figura 105: Estudio de Rígidez U3 Forma Modal 9

Forma modal 10

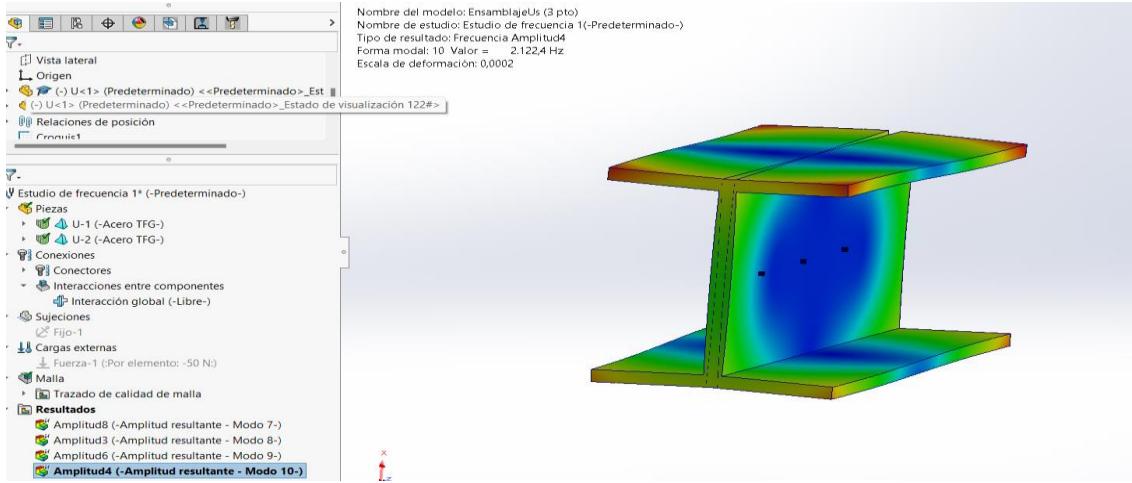


Figura 106: Estudio de Rígidez U3 Forma Modal 10

Ensamblaje	Modos	U1	U2	U3
Frecuencias (Hz)	7	245,23	1070,6	1220,7
	8	255,58	1089,2	1354,4
	9	588,86	1189,6	1589,7
	10	1289,5	1347	2122,4

Tabla 6: Frecuencias Ensamblaje en U

Vemos como a medida que va aumentando los puntos de soldadura y vamos subiendo de formas modales, tenemos frecuencias mayores, lo que significa que cada vez es más rígido.

A frecuencias altas (modo 10), vemos ocurre un aumento de frecuencia muy significativo en el paso de 2 a 3 puntos de soldadura mientras que a frecuencias bajas (modos 7, 8, 9) el aumento más significativo ocurre en el cambio de 1 a 2 puntos de soldadura como podemos observar en la tabla 6.

Ensamblaje en L

Placa L1

Forma modal 7

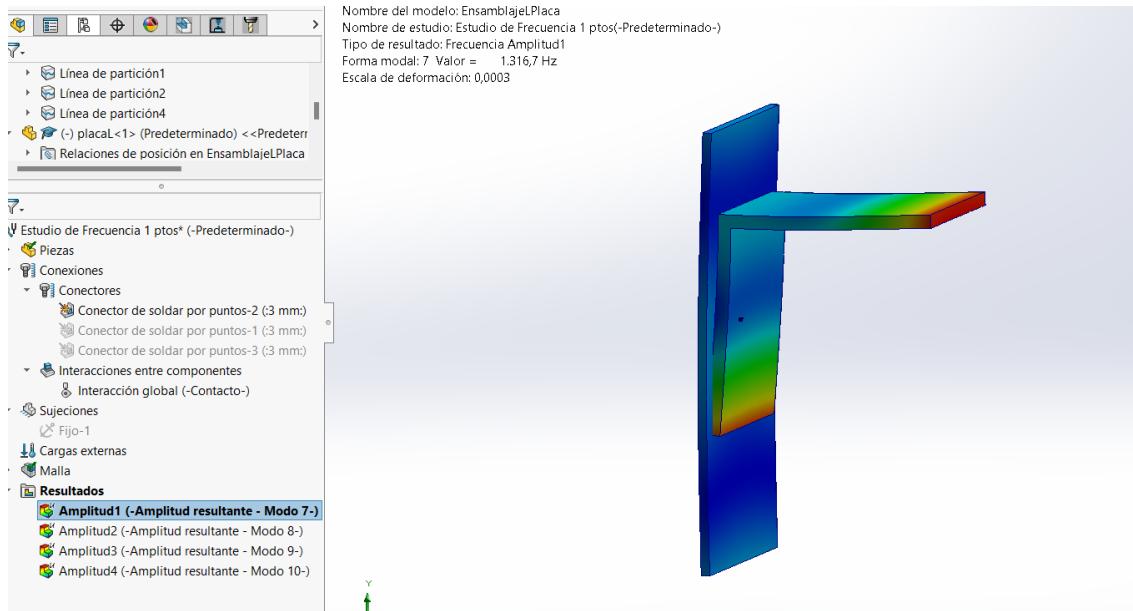


Figura 107: Estudio de Rígidez Placa L1 Forma Modal 7

Forma modal 8

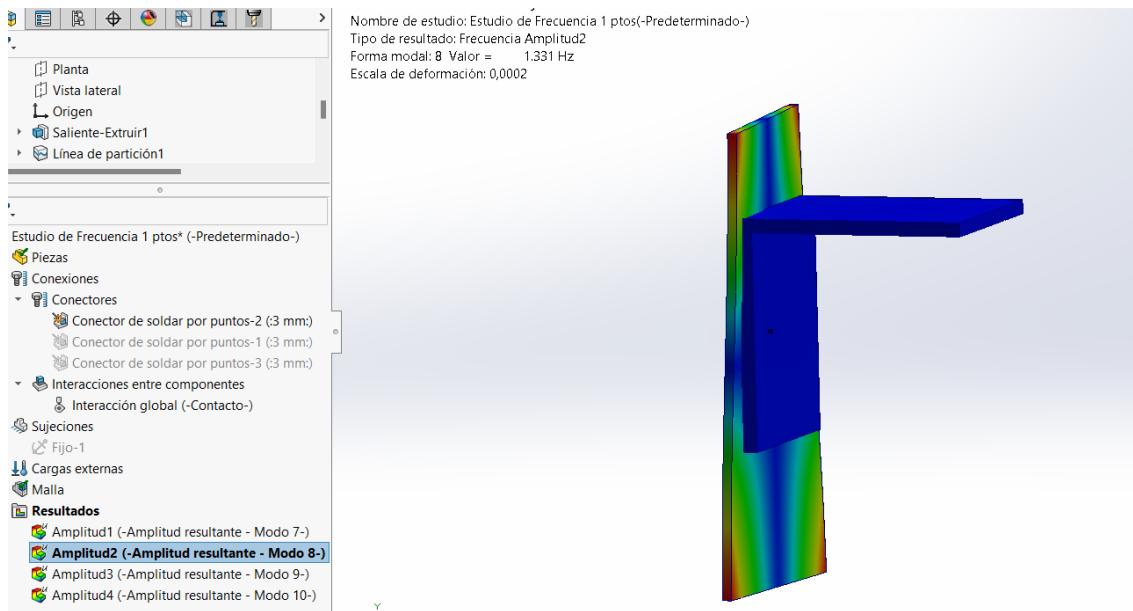


Figura 108: Estudio de Rígidez Placa L1 Forma Modal 8

Forma modal 9

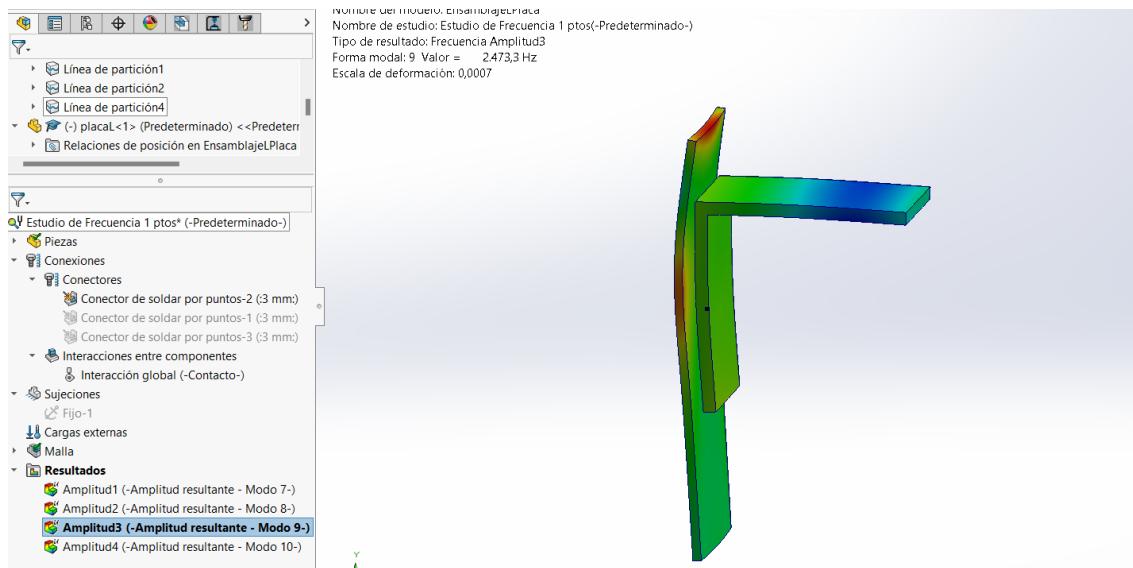


Figura 109: Estudio de Rígidez Placa L1 Forma Modal 9

Forma modal 10

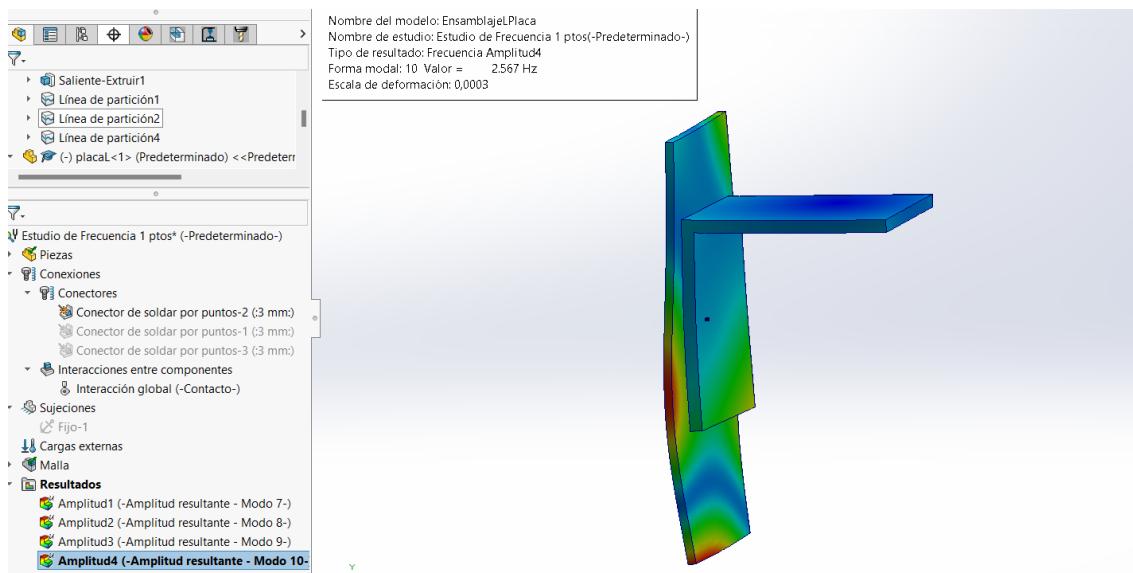


Figura 110: Estudio de Rígidez Placa L1 Forma Modal 10

Placa L2

Forma modal 7

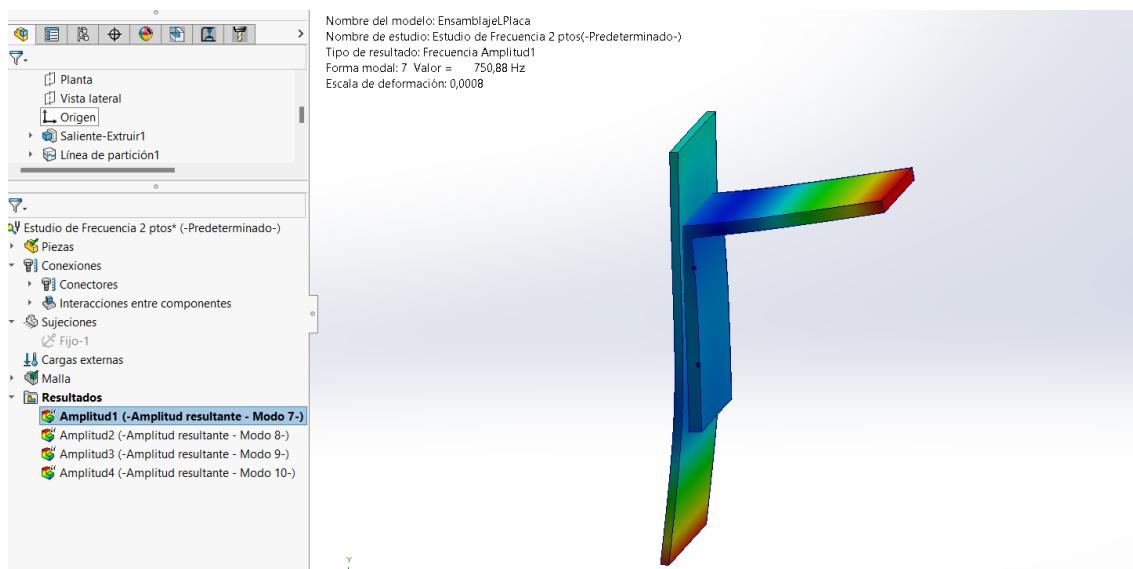


Figura 111: Estudio de Rígidez Placa L2 Forma Modal 7

Forma modal 8

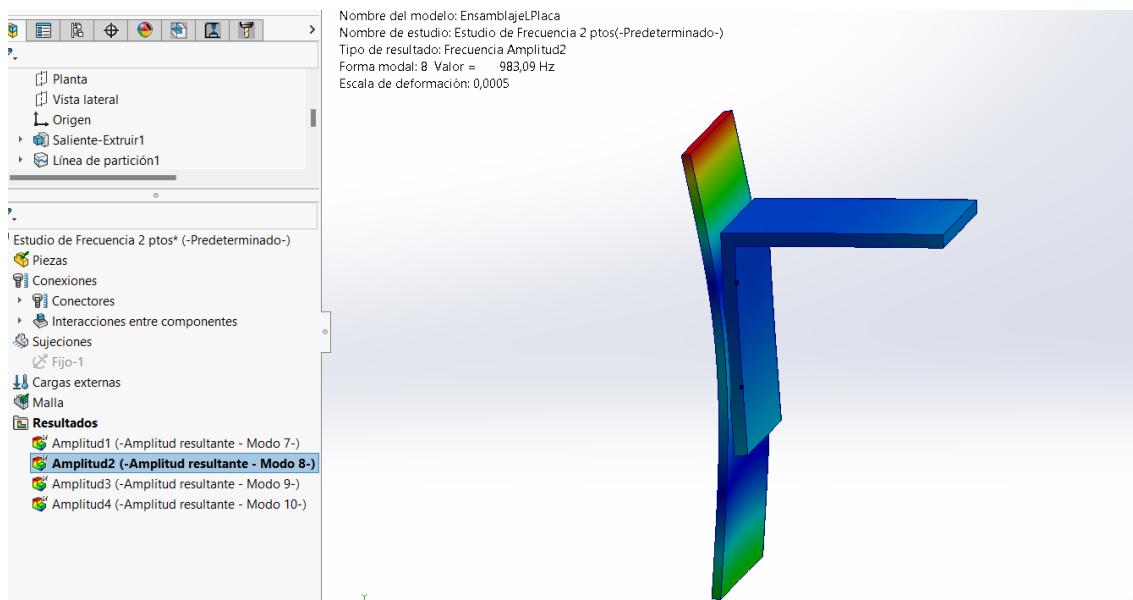


Figura 112: Estudio de Rígidez Placa L2 Forma Modal 8

Forma modal 9

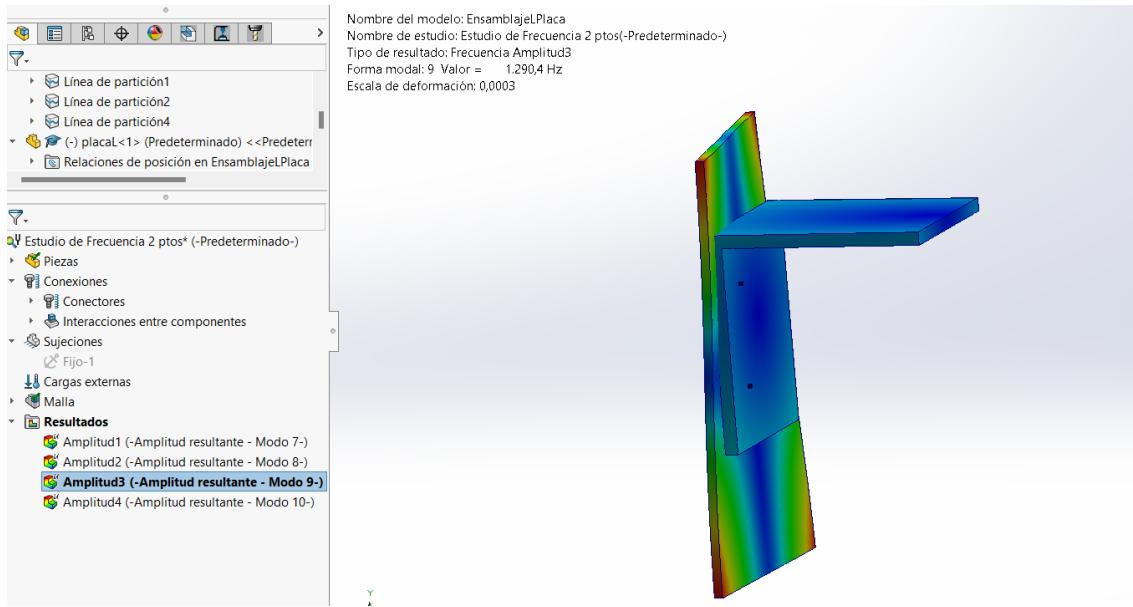


Figura 113: Estudio de Rígidez Placa L2 Forma Modal 9

Forma modal 10

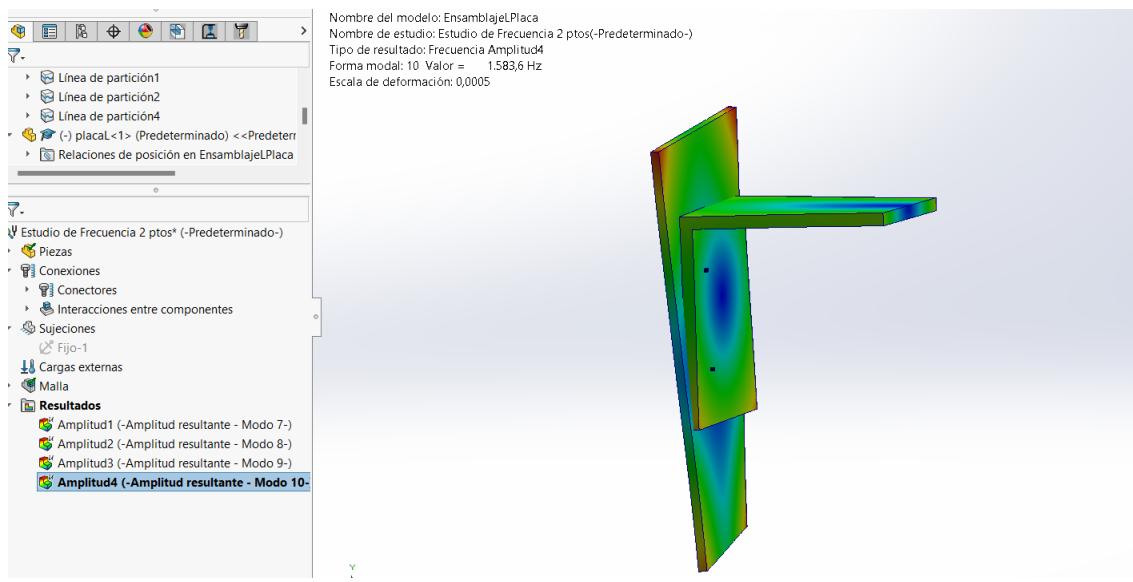


Figura 114: Estudio de Rígidez Placa L2 Forma Modal 10

Placa en L3

Forma modal 7

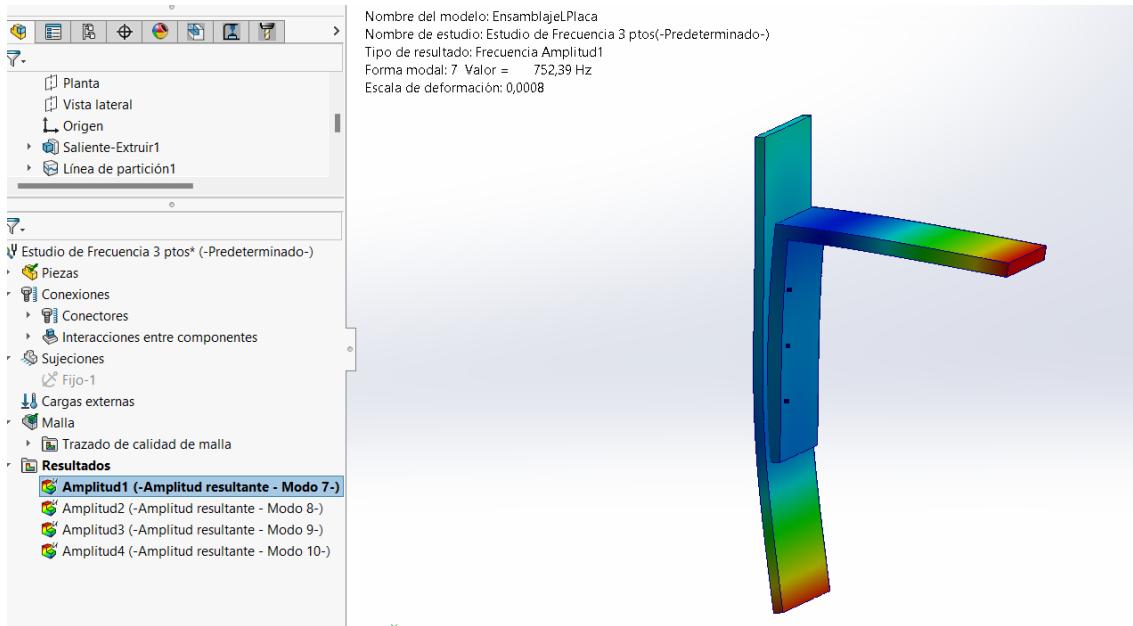


Figura 115: Estudio de Rígidez Placa L3 Forma Modal 7

Forma modal 8

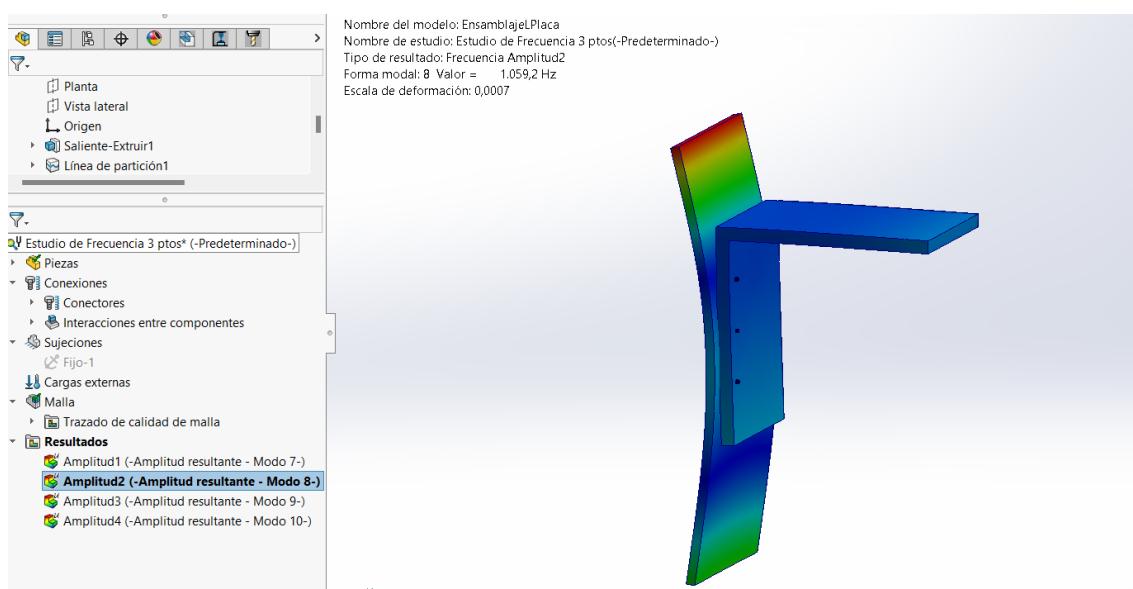


Figura 116: Estudio de Rígidez Placa L3 Forma Modal 8

Forma modal 9

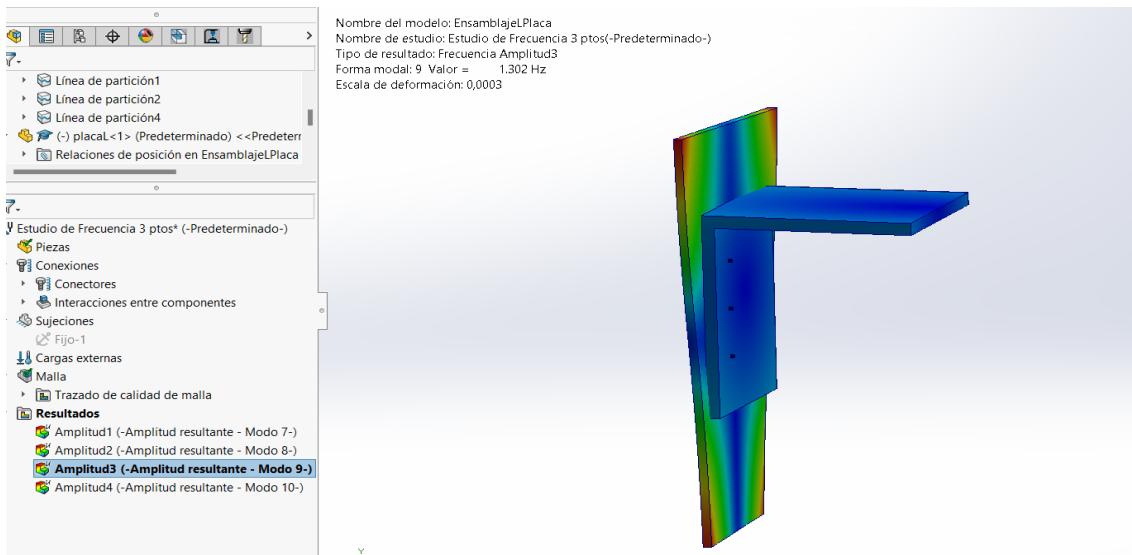


Figura 117: Estudio de Rigididad Placa L3 Forma Modal 9

Forma modal 10

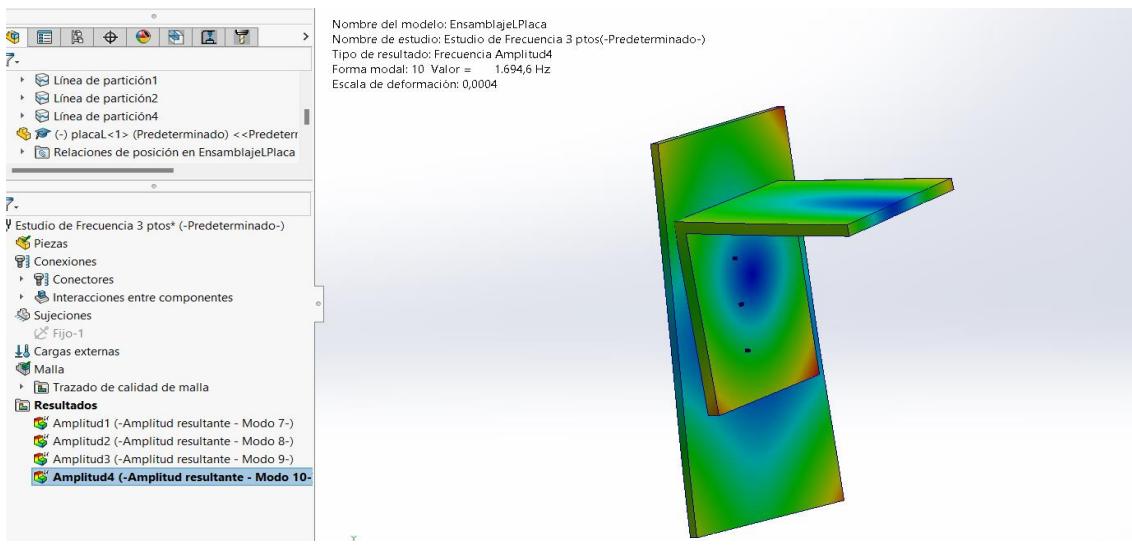


Figura 118: Estudio de Rigididad Placa L3 Forma Modal 10

Ensamblaje	Modos	Placa L1	Placa L2	Placa L3
Frecuencias (Hz)	7	1316,7	750,88	752,39
	8	1331	983,09	1059,2
	9	2473	1290,4	1302
	10	2567	1583,6	1694,6

Tabla 7: Frecuencias Ensamblaje Placa en L

Si nos fijamos en las formas modales con 1 punto de soldadura se comporta más como dos piezas independientes que como un conjunto ensamblado, es por ello que nos centraremos en los resultados obtenidos para 2 y 3 puntos de soldadura

Vemos como a medida que va aumentando los puntos de soldadura y vamos subiendo de formas modales, tenemos frecuencias mayores, lo que significa que cada vez es más rígido.

Simulaciones Tensiones

En este apartado, llevaremos a cabo un estudio estático en SolidWorks similar al que se ha realizado previamente con las uniones a solape y de tracción donde analizaremos cómo se comportan las uniones soldadas y las tensiones resultantes.

Ensamblaje en U

En este ensamblaje, aplicaremos una Fuerza de 50 N en las dos caras contrarias a las que le aplicamos una geometría fija como se observa en las imágenes posteriores, teniendo una Fuerza Total de 100 N a repartir entre los diferentes puntos de soldadura.

U1

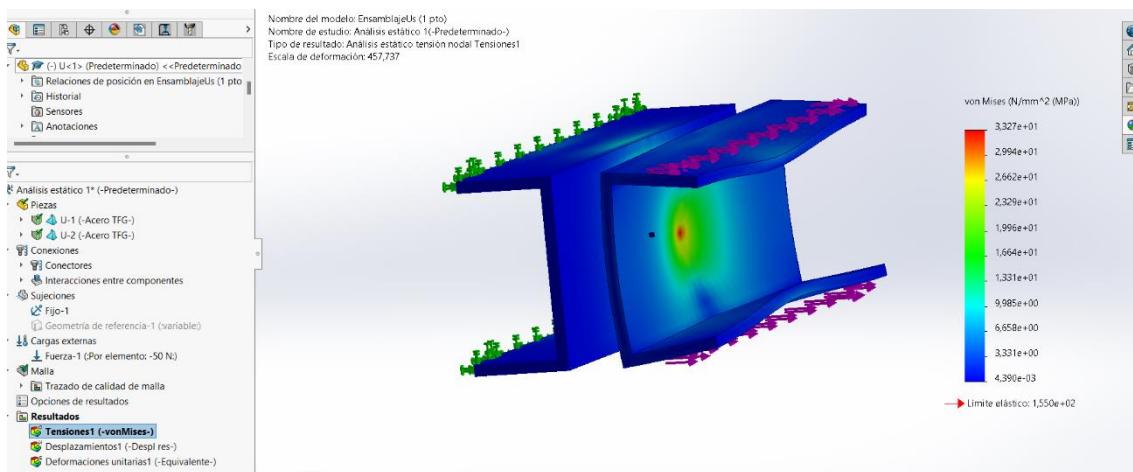


Figura 119: Tensiones en U1

U2

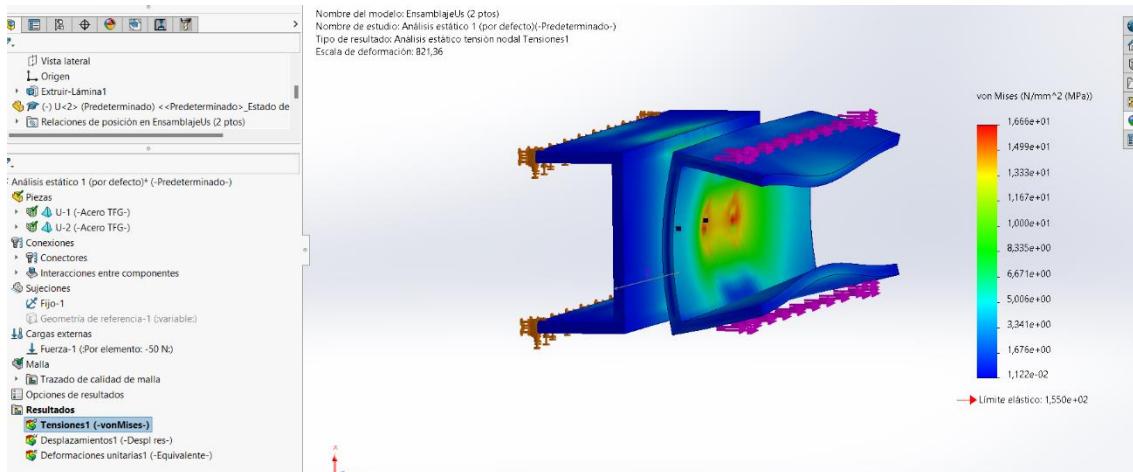


Figura 120: Tensiones en U2

U3

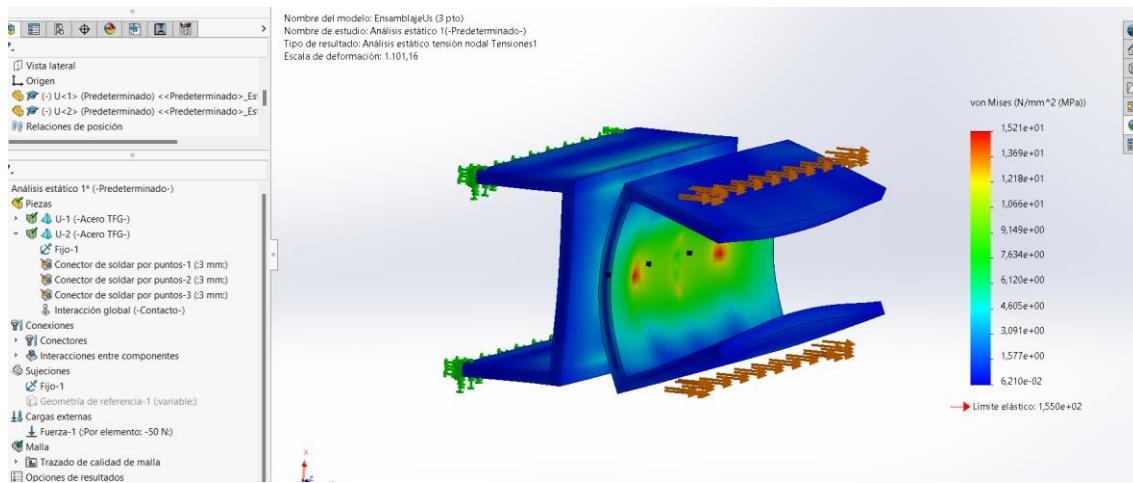


Figura 121: Tensiones en U3

Ensamblaje	U1	U2		U3		
Fuerza Conectores (N)	100	50,054	49,946	34,413	31,296	34,598
Tensiones (MPa)	33,27	16,66			15,21	

Tabla 8: Esfuerzos Ensamblaje en U

En la tabla de resultados observamos como se van repartiendo la fuerza de 100 N entre los diferentes puntos de soldadura y como la Tensión Máxima va disminuyendo debido a que los esfuerzos también se van repartiendo entre ellos.

En las propias imágenes se puede observar como el punto de soldadura que queda en el medio es el que menos esfuerzo tiene que soportar.

Ensamblaje Placa en L

En este caso, aplicaremos una Fuerza Total de 200 N en la cara horizontal de la Placa en L que se repartirán entre los diferentes puntos de soldadura.

Placa en L1

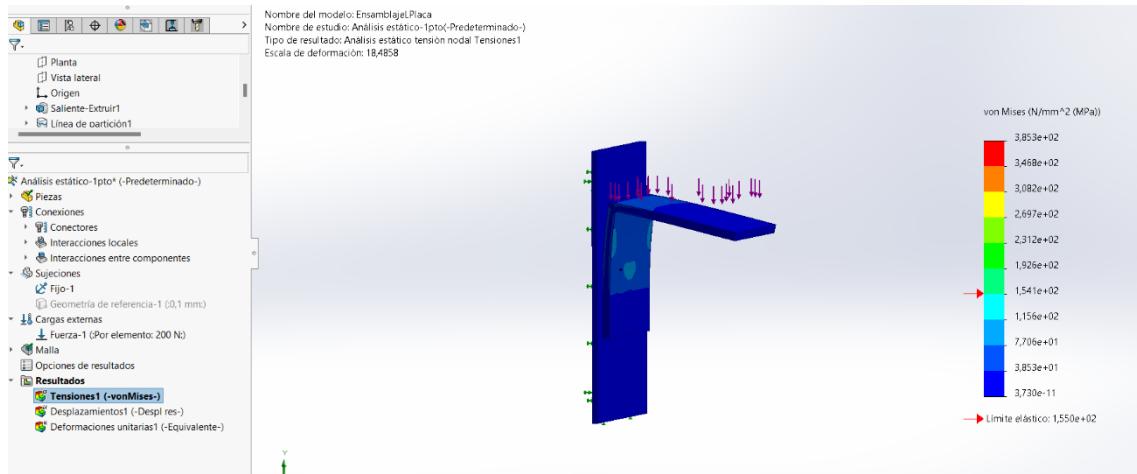


Figura 122: Tensiones Placa en L1

Placa en L2

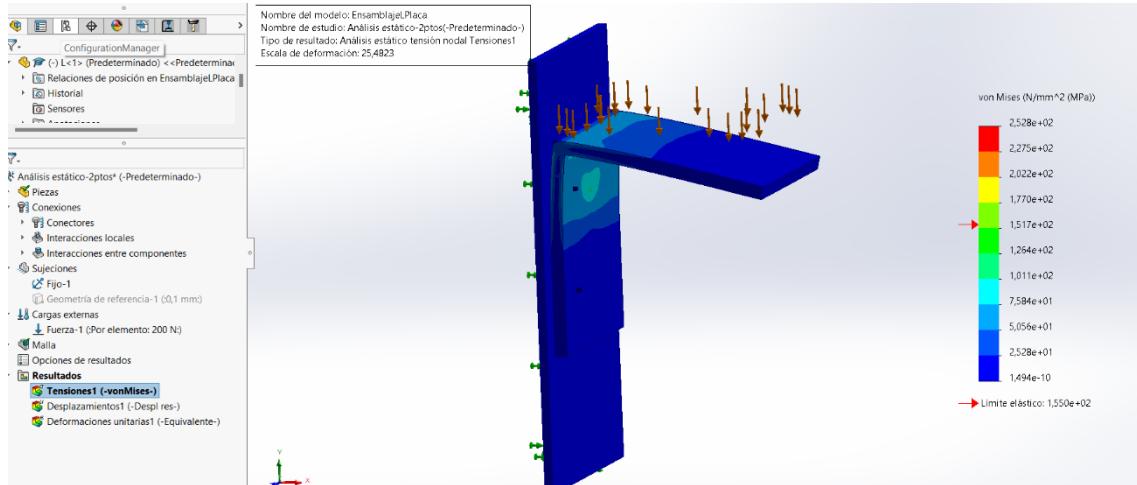


Figura 123: Tensiones Placa en L2

Placa en L3

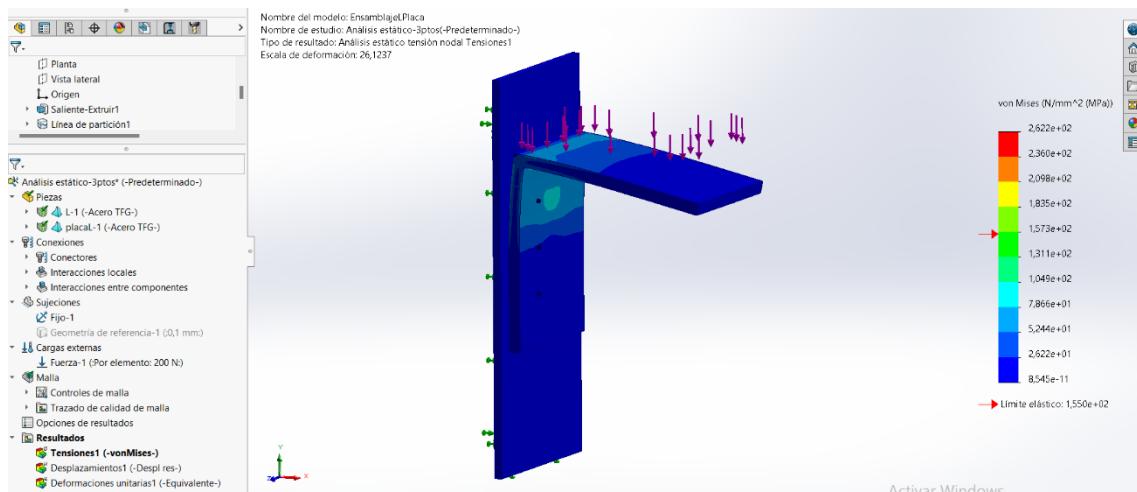


Figura 124: Tensiones Placa en L3

Ensamblaje	Placa en L1	Placa en L2	Placa en L3			
Fuerza Cortante (N)	181,28	128,66	54,98	74,34	96,7	
Fuerza Axil (N)	375,3	-5,16	331,77	-3,22	25,386	
Tensiones (MPa)	385,3			252,8		
				262,2		

Tabla 9: Esfuerzos Ensamblaje Placa en L

En esta unión aparecen tanto esfuerzos a cortante como axil, la suma de los cortantes en los puntos de soldadura sale un poco menos que la fuerza aplicada de 200 N debido al rozamiento que se ha aplicado en el contacto.

En la tabla de resultados observamos como las tensiones finales son combinación del esfuerzo de cortadura y axil sobre el punto de soldadura. Este esfuerzo axil viene condicionado por la distancia del punto de soldadura al punto de pivotamiento del soporte en L.

9. Resultados y conclusiones

En este apartado voy a resumir los resultados obtenidos y si realmente hay una buena predicción de la resistencia de la unión mediante esta metodología de simulación en SolidWorks para determinar esfuerzos.

Comenzamos determinando experimentalmente las propiedades del material para identificarlo. Para ello, nos basamos en el Módulo de Young y Tensión de Fluencia, calculados a partir de los ensayos donde utilizamos un extensómetro para ver cuánto se deformaba en función de la Fuerza. A partir de ahí obtuvimos unos resultados de $E = 201000 \text{ MPa}$ y una Tensión de Fluencia $\sigma = 155 \text{ MPa}$.

A partir de los resultados obtenidos identificamos el acero como DC-06.

En el ANEXO 1 y ANEXO 2 podemos ver más en detalle el Excel donde se llevaron a cabo estos resultados.

Seguidamente se han procedido a ensayar dos configuraciones de uniones mediante puntos de soldadura: a solape y a tracción.

Con respecto al Ensayo a Solape, hemos obtenido una Tensión media en el punto de soldadura más solicitado $\tau = 116,64 \text{ MPa}$, proporcionando un valor bastante acorde a la resistencia que nos da el fabricante para un Acero DC-06 que es de 135-165 MPa.

En el ANEXO 3, podemos ver más en detalle el cálculo de estos resultados.

Con respecto al Ensayo a Tracción, hemos obtenido una Tensión media en el punto de soldadura más solicitado $\sigma = 267,31 \text{ MPa}$, siendo la resistencia para un Acero DC-06 de 270-330 MPa. Por tanto, consideramos que es muy buen resultado ya que está muy cerca de quedarse entre esos valores, teniendo en cuenta las dimensiones del punto de soldadura obtenidos y en las propiedades del material.

En el ANEXO 4, tenemos los cálculos detallados sobre estos últimos resultados y, además, en el ANEXO 5, podemos ver el Excel donde se han calculado todas estas dispersiones que ha habido en el proceso.

Finalmente se ha aplicado la metodología definida para el análisis de dos configuraciones distintas de unión, determinando el reparto de esfuerzos entre los puntos de soldadura, estado tensional y rigidez. Para el análisis de rigidez se ha basado en el análisis de las frecuencias naturales y modos asociados.

Como conclusión, la metodología empleada de simular las uniones mediante SolidWorks Simulation y determinar el estado tensional en los puntos de soldadura a partir de los esfuerzos determinados en éste ha dado buenos resultados, ya que se adaptan bastante bien a lo que se ha obtenido experimentalmente en los ensayos.



Bibliografía

1. https://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura_por_puntos
2. <https://joanbonetm.wordpress.com/2019/06/18/historia-de-la-soldadura/>
3. <https://jom.es/aplicaciones-de-la-soldadura-por-puntos-2/>
4. <https://revistacentrozaragoza.com/soldadura-por-puntos-2/>
5. http://www.marioloureiro.net/ensino/manuaisOutros/soldadura/manual_catalogo%20soldadura.pdf
6. <https://jom.es/ventajas-de-las-soldaduras-por-puntos/>
7. <https://bfmx.com/soldadura/parametros-de-soldadura-que-debes-regular/>
8. <https://www.thefabricator.com/thefabricatorespanol/product/shopmanagement/la-herramienta-de-sujeci-n-fija-partes-peque-as-para-soldadura-preliminar-por-puntos>
9. <https://www.gnccaldereria.es/parametros-importantes-soldadura/>
10. https://www.en.aenor.com/_layouts/15/r.aspx?c=N0055683
11. https://2021.help.altair.com/2021.2/hwsolvers/os/topics/solvers/os/analysis_spotweld_fatigue_c.htm
12. <https://proleantech.com/es/spot-welding-advantages-disadvantages-applications/>
13. <https://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2023/ESP/?guid=GUID-57A6B359-B129-4559-9518-F619FD46EA4F>
14. <https://www.esb-group.com/en/products-din-en/cold-rolled-steel/>
15. https://urldefense.com/v3/_https://help.altair.com/ss/en_us/topics/simsolid/analysis/fatigue_spot_weld_r.htm ;!!D9dNQwwGXtA!VDd86LtUTFUC8uOK4D65dRhbb1B5gJBoiikLmURLqqC JUcsEYnN7gg1cJ726yAZNBqz6xr4 hWkhFTY\$
16. https://www.llogsa.mx/manuales/detector_de_fallas/Spotchecker/Spotchecker.pdf
17. <https://www.suministrosurquiz a.com/soldador-por-puntos-spw-100>
18. <https://www.amazon.es/Soldadura-Resistencia-Bol%C3%ADgrafo-Accesorio-Autom%C3%A1tico/dp/B0CFY5KSQM>
19. <https://www.directindustry.es/prod/serra-soldadura-sau/product-5408-2596165.htm>
20. <https://www.solcaman.com/soldadura-por-puntos-que-es/>
21. https://www.kuka.com/es-mx/productos-servicios/sistemas-de-robot/kuka-ready2_use/kuka-ready2_spot
22. <https://www.revistaautocrash.com/equipo-soldadura-punto-resistencia-tecna-36ez/>
23. <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/FeriaVirtual/Producto-Soldadura-por-puntos-con-mesa-Myspot-44263.html>
24. <https://tecsolda.com/electrodos-soldadura-resistencia-por-puntos/>
25. https://www.teyuchiller.com/es/industrial-chiller-cw-6000-for-cooling-vacuum-pump-system_p48.html
26. <https://www.kuka.com/es-mx/sectores/industria-del-metal/soldadura-por-puntos>
27. <https://revistacentrozaragoza.com/soldadura-por-puntos-2/>
28. <https://es.dreamstime.com/la-soldadura-por-puntos-del-brazo-rob%C3%B3tico-las-piezas-de-puerta-coche-el-proceso-fabricaci%C3%B3n-automotriz-pieza-hola-tecnolog%C3%ADa-image140589438>
29. <https://www.shoptronica.com/soldadores-estaciones-soldadura-de-punto/5081-estacion-de-soldadura-de-punto-709a-8944748447296.html>
30. https://es.123rf.com/photo_203335286_robot-de-soldadura-por-puntos-que-opea-en-una-f%C3%A1brica-de-construcci%C3%B3n-naval-producindo.html
31. <https://www.amadaweldtech.eu/es/base-de-conocimientos/soldadura-por-puntos>
32. <https://jom.es/ventajas-la-soldadura-puntos/>
33. <https://bfmx.com/soldadura-por-resistencia/parametros-de-soldadura-que-debes-regular/>
34. <https://www.infoplcc.net/noticias/item/109814-nueva-serie-motoman-sp-robots-soldadura-por-puntos>

35. <https://www.nederman.com/es-mx/knowledge-center/welding-fume-extraction-hoods>
36. <https://www.revistautocrash.com/equipo-soldadura-punto-resistencia-tecna-36ez/>
37. <https://es.scribd.com/presentation/466720173/Residuos-Soldadura-ppt>
38. https://ingenieriapedia.com/prueba-de-traccion-y-corte-para-soldaduras-por-puntos/#Prueba_de_traccion_y_corte_para_soldaduras_por_puntos
39. <https://industrialphysics.com/es/base-de-conocimientos/articulos/pruebas-de-soldadura-por-puntos/>
40. <https://selectauto.es/maquinas-de-soldadura-por-puntos-/6461-soldador-por-puntos-aluminio-digital-spotter-7500a-s-5949128290236.html>
41. <https://www.olympus-ims.com/es/spot-weld-testing/>
42. <https://www.directindustry.es/prod/serra-soldadura-sau/product-5408-2596165.html>

Diferentes libros de la biblioteca

43. Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). Manufacturing Engineering and Technology. Pearson
44. Kou, S. (2003). Welding Metallurgy. Wiley
45. "Welding: Principles and Applications" de Larry Jeffus.
46. "Resistance Welding: Fundamentals and Applications" de Hongyan Zhang y Scott R. MacKenzie.
47. "Welding Handbook, Volume 2: Welding Processes, Part 2" por la American Welding Society (AWS).

Anexos

Anexo 1: Cálculo del Módulo de Young (E) del material

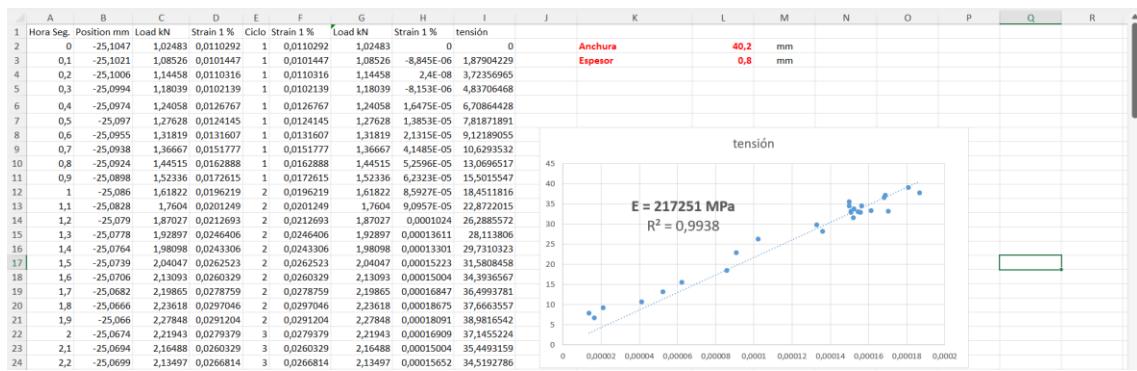


Figura 125: Cálculo Modulo de Young Probeta P1

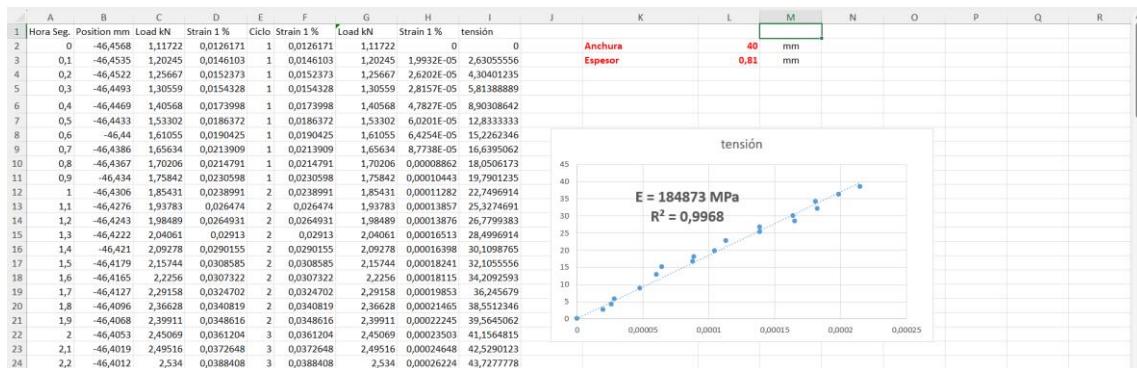


Figura 126: Cálculo Modulo de Young Probeta P2

Anexo 2: Cálculo de la Tensión de Fluencia del Material (σ_u)

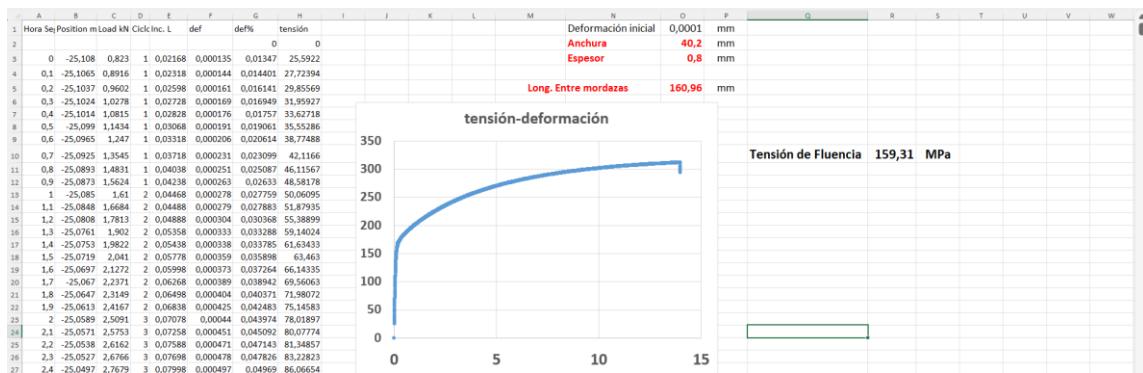


Figura 127: Cálculo Tensión de Fluencia Probeta P1



Figura 128: Cálculo Tensión de Fluencia Probeta P2

Anexo 3: Cálculo de tensiones en el ensayo a solape

S1

$F = 3500 \text{ N}$

$d = 6,58 \text{ mm}$

$$\tau = \frac{N_x}{A} = \frac{4*F}{\pi*d^2} = 102,92 \text{ MPa}$$

S2

$F = 5000 \text{ N}$

$d = 5,14 \text{ mm}$

53,6 %

$$\tau = \frac{N_x}{A} = \frac{0,536*4*F}{\pi*d^2} = 129,15 \text{ MPa}$$

S3

F = 7000 N

d = 5,5 mm

40 %

$$\tau = \frac{N_x}{A} = \frac{0,4*4*F}{\pi*d^2} = 117,85 \text{ MPa}$$

Anexo 4: Cálculo de tensiones en el ensayo a tracción**L1**

F = 754 N

d = 6,5 mm

137 %

F_{solid} = 45,4 NM_{solid} = 487,62 N*mm

$\frac{M}{F} = 10,74 \text{ mm}$ (Relacionamos la Fuerza Resultante con el Momento Flector que se relacionaría con la fuerza que actúa en las mordazas y el Momento al que estaría sometido)

$$M_z = 487,62 * 10,74 = 8098,35 \text{ N*mm}$$

$$\sigma = \frac{N_x}{A} + \frac{M_z}{W_z} = \frac{1,37*4*F}{\pi*d^2} + \frac{32 M_z}{\pi*d^3} = 331,13 \text{ MPa}$$

L2

F = 906 N

d = 7,46 mm

135 %

F_{solid} = 95,931 NM_{solid} = 830,8 N*mm
 $\frac{M}{F} = 8,65 \text{ mm}$

$$M_z = 830,8 * 8,65 = 7836,9 \text{ N*mm}$$

$$\sigma = \frac{N_x}{A} + \frac{M_z}{W_z} = \frac{1,35*4*F}{\pi*d^2} + \frac{32 M_z}{\pi*d^3} = 220,26 \text{ MPa}$$

L3

$$F = 861 \text{ N}$$

$$d = 7,06 \text{ mm}$$

$$219 \%$$

$$F_{\text{solid}} = 108 \text{ N}$$

$$M_{\text{solid}} = 876,61 \text{ N*mm}$$

$$\frac{M}{F} = 8,117 \text{ mm}$$

$$M_z = 876,61 * 8,117 = 6988,74 \text{ N*mm}$$

$$\sigma = \frac{N_x}{A} + \frac{M_z}{W_z} = \frac{2,19*4*F}{\pi*d^2} + \frac{32 M_z}{\pi*d^3} = 250,55 \text{ MPa}$$

Anexo 5: Cálculo de promedios y dispersión de tensiones y tamaños de puntos de soldadura

Ensayo a solape

	A	B	C	D	E	F	G
1	Cálculo de promedios y dispersión de tensiones y tamaños de puntos de soldadura						
2							
3	Tensiones						
4	S1	102,92	MPa		Media	116,64	MPa
5	S2	129,15	MPa		Dispersión	13,1567967	MPa
6	S3	117,85	MPa				
7							
8	Puntos de Soldadura						
9	S1	6,58	mm				
10		8,7	mm				
11	S2	5,85	mm				
12		5,14	mm				
13		5,4	mm		Media	5,8225	mm
14		5,4	mm		Dispersión	0,98582799	mm
15	S3	5,5	mm				
16		5,4	mm				
17		5,7	mm				
18		5,4	mm				
19		5,7	mm				
20		5,1	mm				
21							

Figura 129: Cálculo Promedios y Dispersión Ensayo a Solape

Ensayo a Tracción

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Cálculo de promedios y dispersión de tensiones y tamaños de puntos de soldadura							
2								
3	Tensiones							
4	L1	331,13	MPa		Media	267,313333	MPa	
5	L2	220,26	MPa		Dispersión	57,3044172	MPa	
6	L3	250,55	MPa					
7								
8	Puntos de Soldadura							
9	L1	5,43	mm					
10		6,5	mm					
11	L2	7,1	mm					
12		6,51	mm					
13		7	mm	Media	6,835	mm		
14		7,46	mm	Dispersión	0,58355494	mm		
15	L3	6,51	mm					
16		7,55	mm					
17		7,4	mm					
18		6,93	mm					
19		6,57	mm					
20		7,06	mm					

Figura 130: Cálculo Promedios y Dispersión Ensayo a Tracción

Anexo 6: Curvas Fuerza-Desplazamiento y Fotos de Ensayos

Anexo 6.1: Uniones a Solape

S1_A

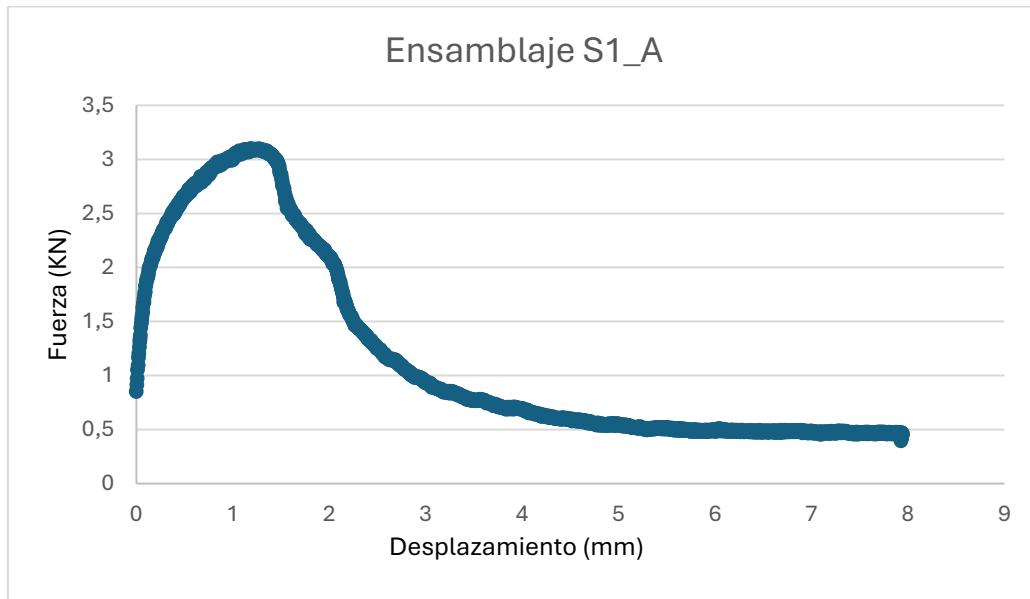


Figura 131: Curva Ensayo a Solape S1_A

S1_B

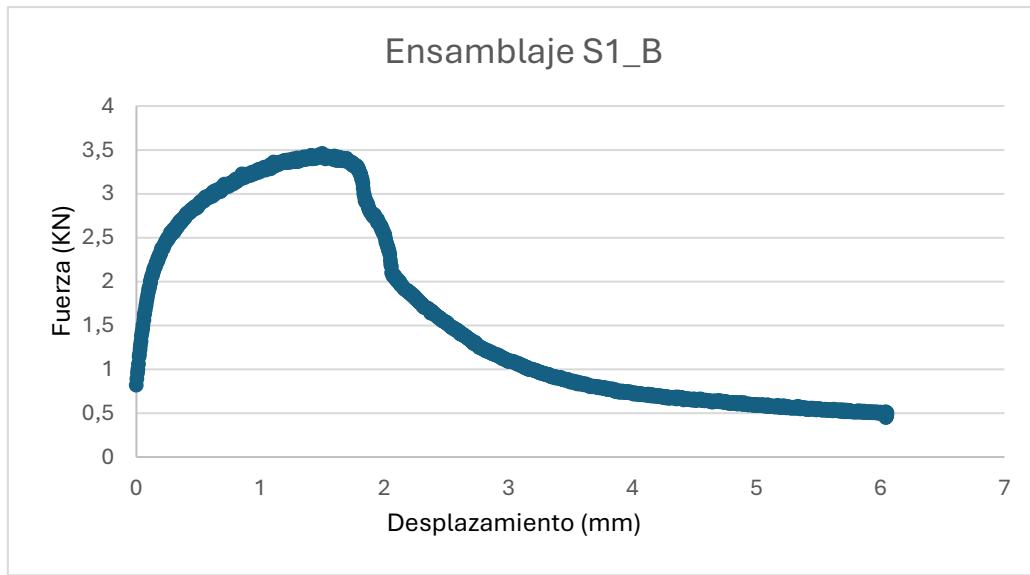
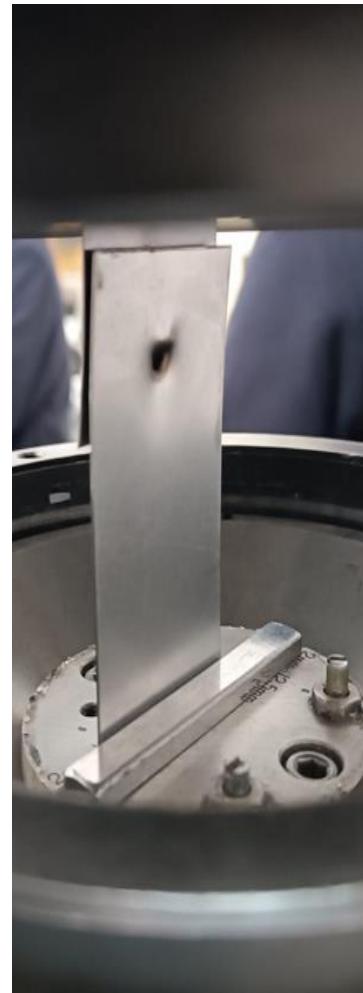


Figura 132: Curva Ensayo a Solape S1_B

Antes



Durante



Después



Figura 133: Ensamblaje S1 antes del ensayo

Figura 134: Ensamblaje S1 durante el ensayo

Figura 135: Ensamblaje S1 después del ensayo

S2_A

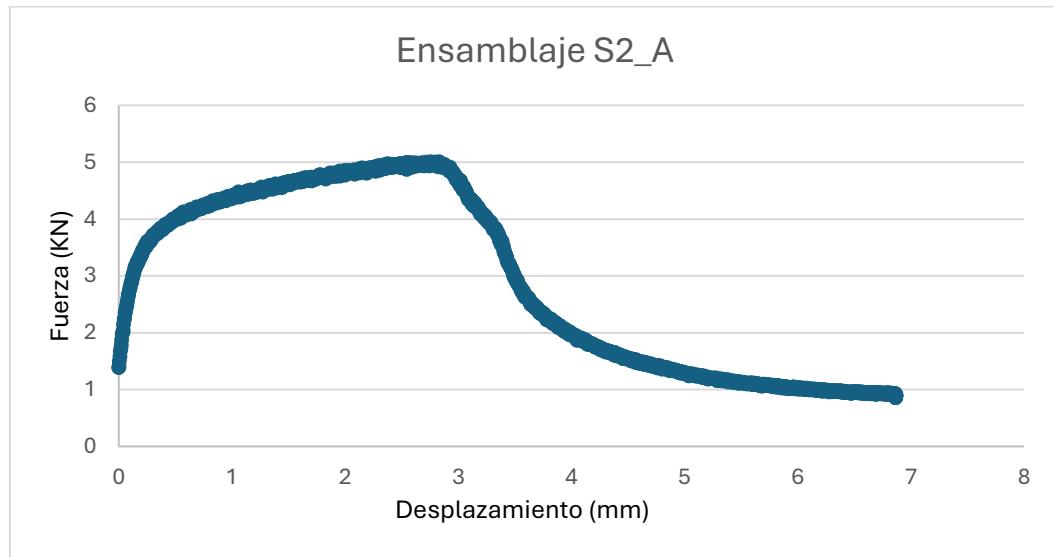


Figura 136: Curva Ensayo a Solape S2_A

S2_B

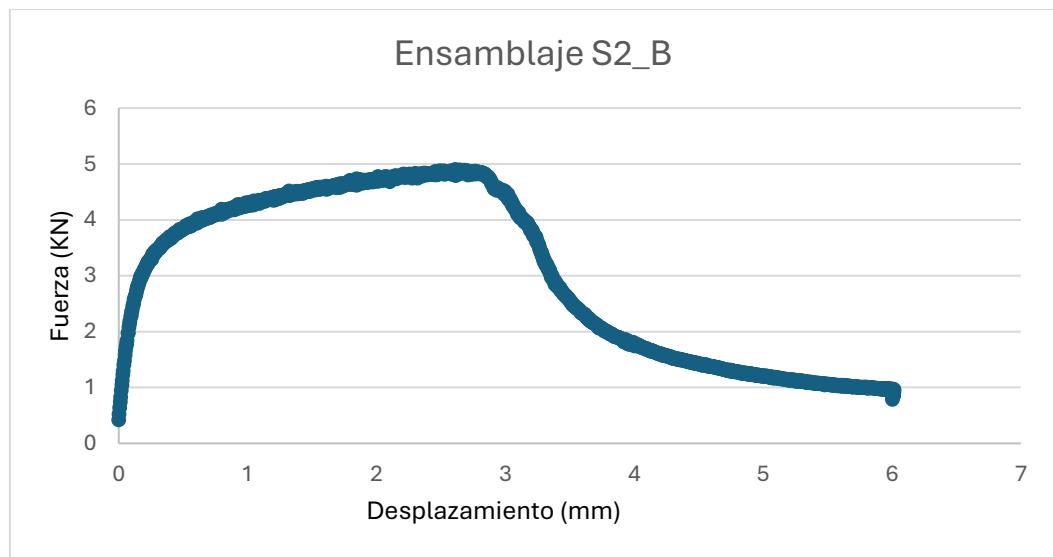


Figura 137: Curva Ensayo a Solape S2_B

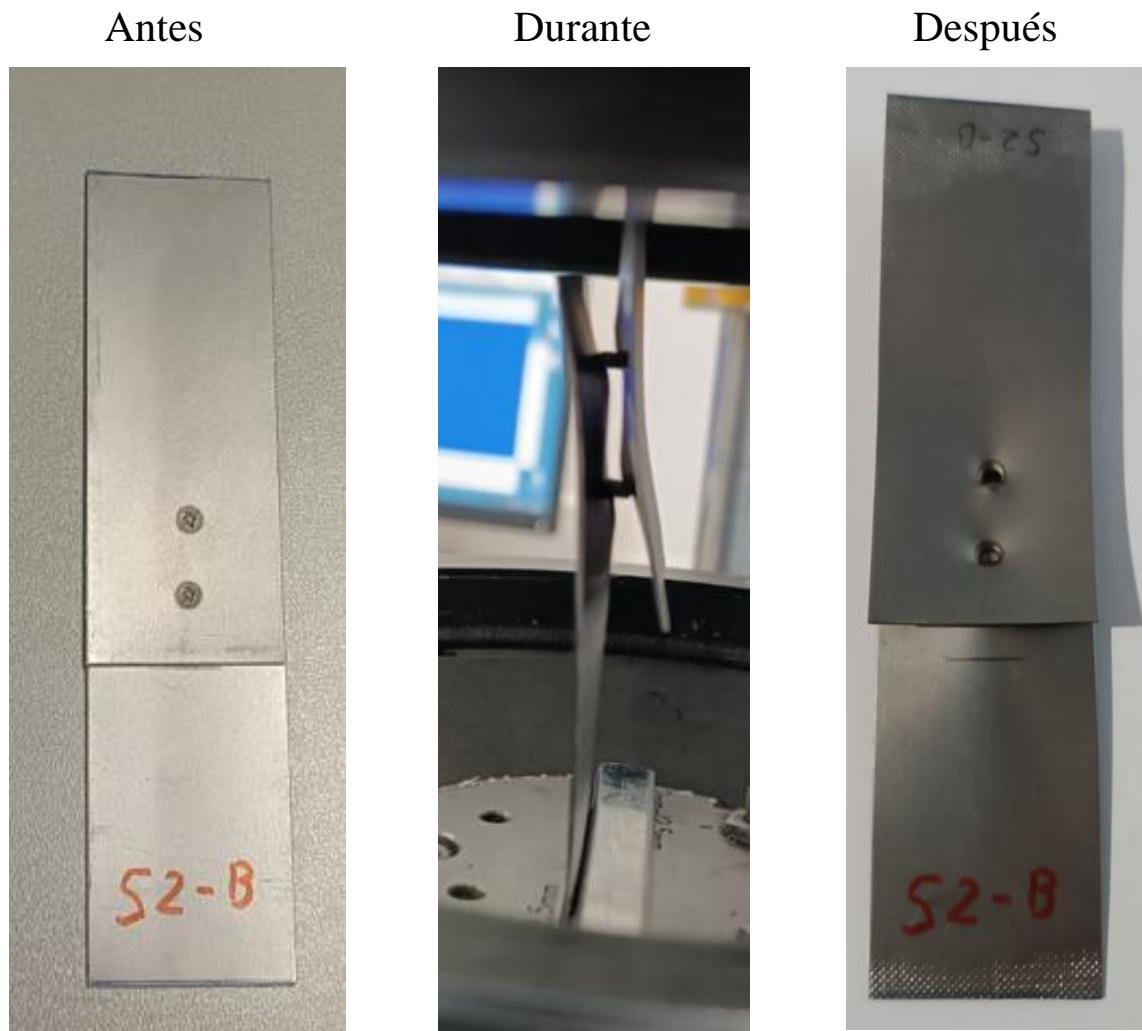


Figura 138: Ensamblaje S2 antes del ensayo

Figura 139: Ensamblaje S2 durante el ensayo

Figura 140: Ensamblaje S2 después del ensayo

S3_A

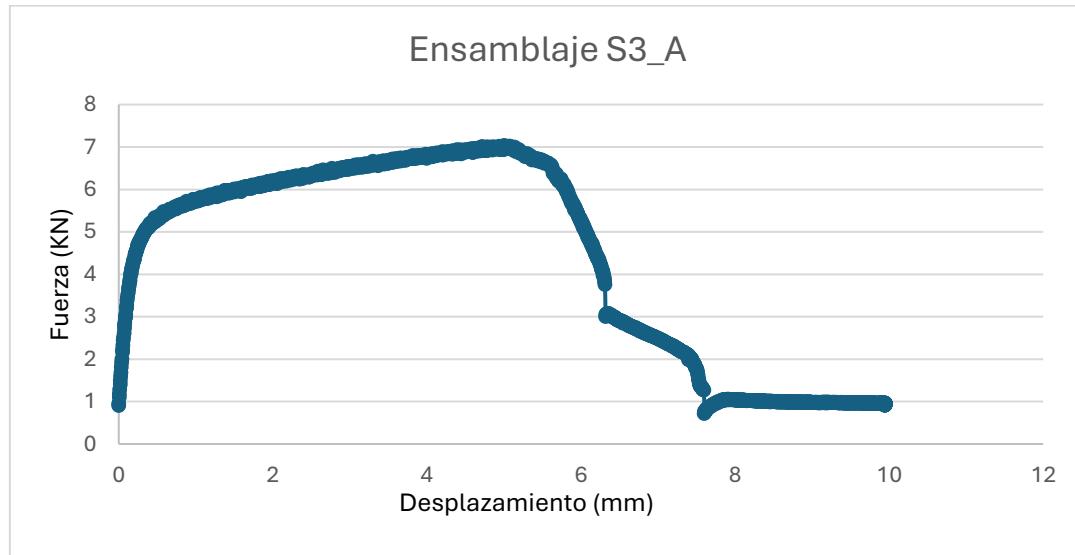


Figura 141: Curva Ensayo a Solape S3_A

S3_B

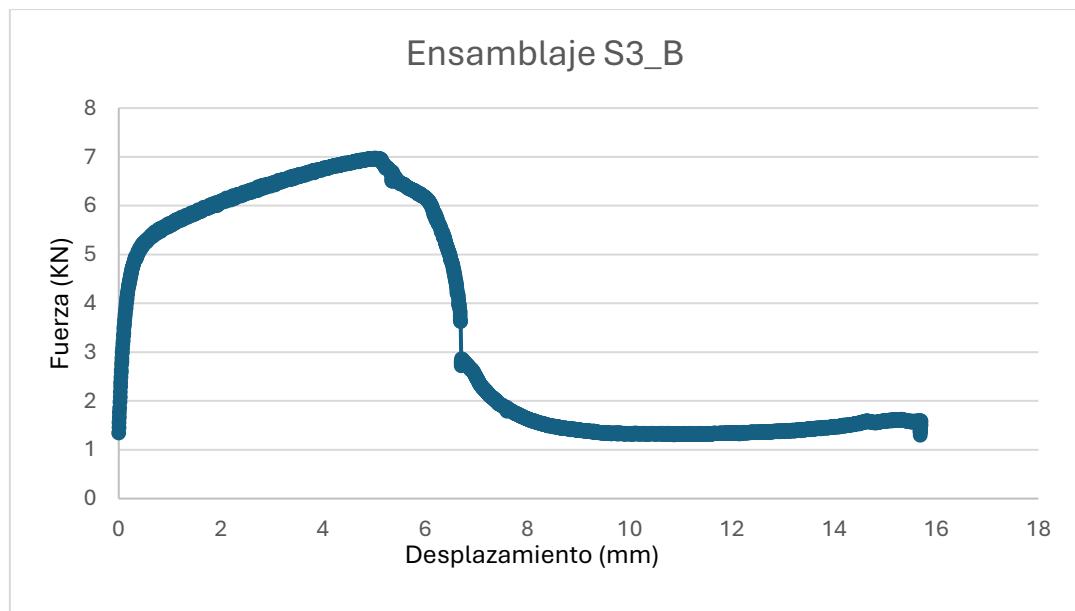


Figura 142: Curva Ensayo a Solape S3_B

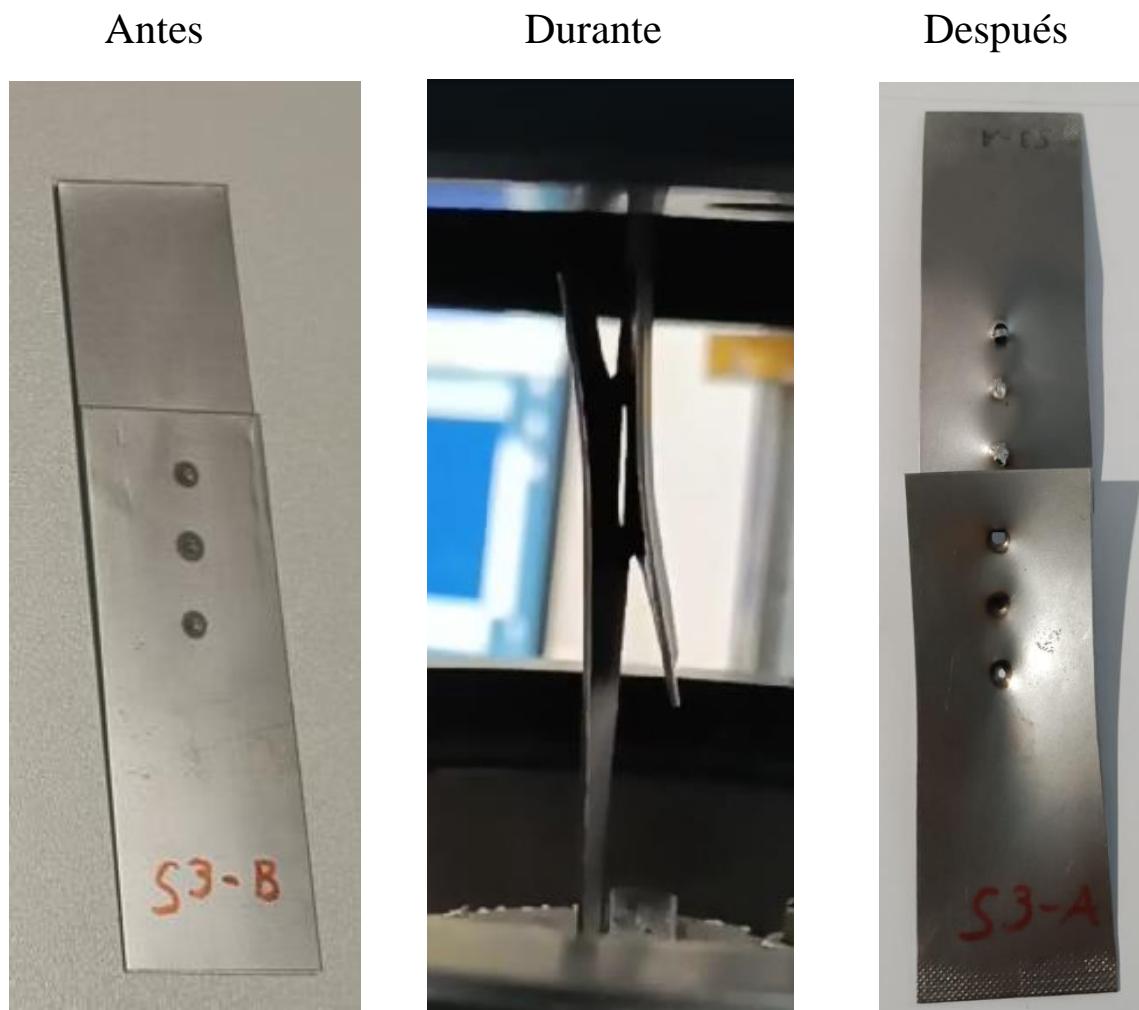


Figura 143: Ensamblaje S3 antes del ensayo

Figura 144: Ensamblaje S3 durante el ensayo

Figura 145: Ensamblaje S3 después del ensayo

Anexo 6.2: Uniones a Tracción

L1_A

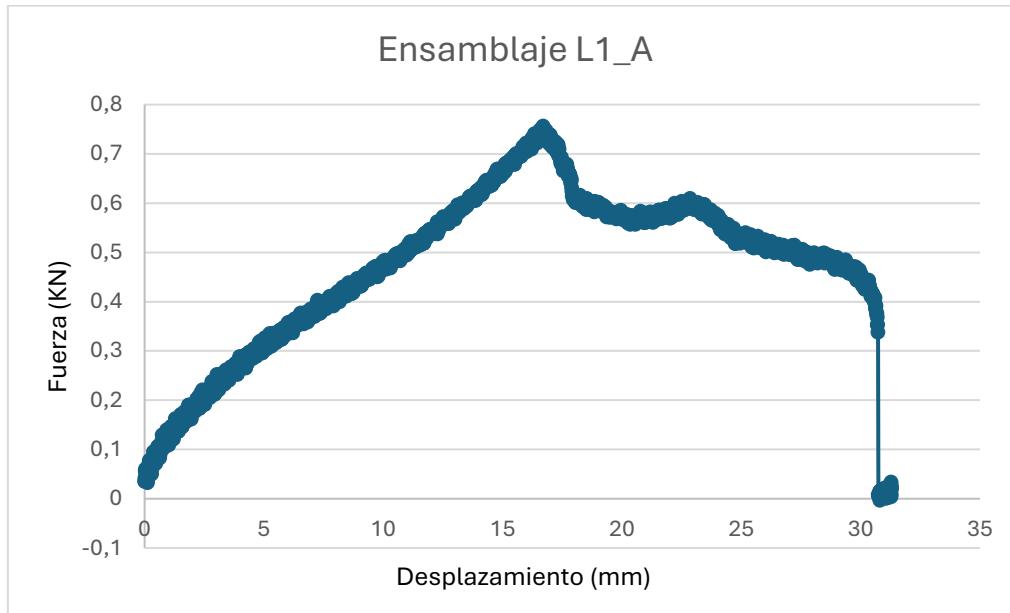


Figura 146: Curva Ensayo a Tracción L1_A

L1_B

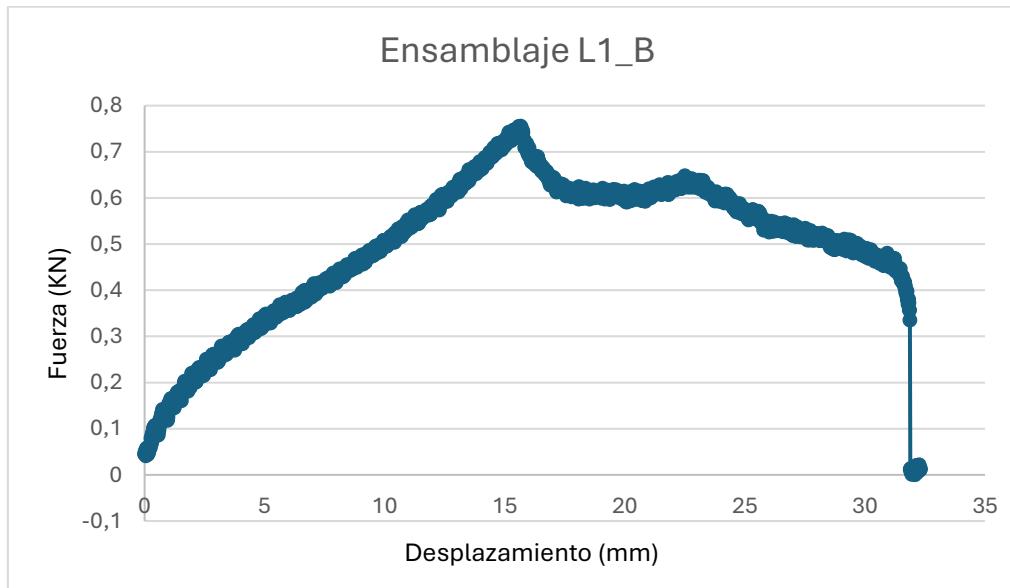


Figura 147: Curva Ensayo a Tracción L1_B

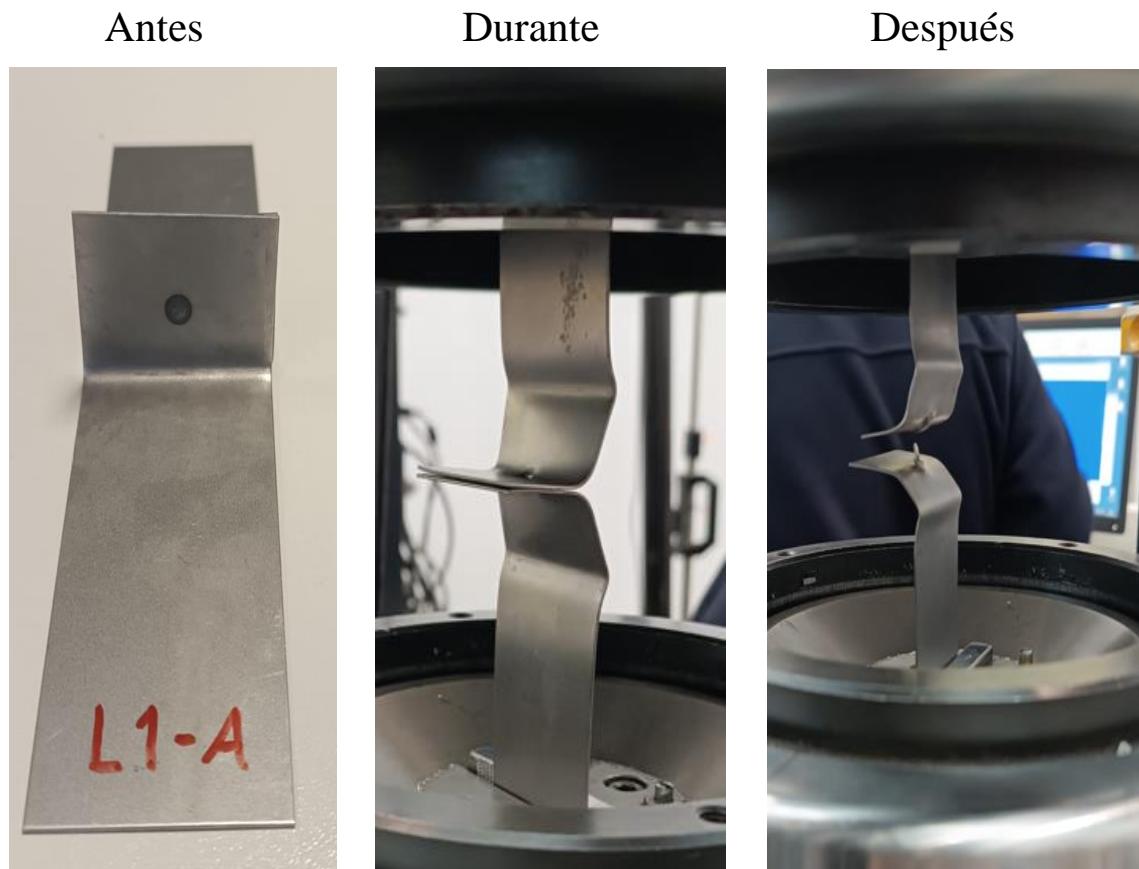


Figura 148: Ensamblaje L1 antes del ensayo

Figura 149: Ensamblaje L1 durante el ensayo

Figura 150: Ensamblaje L1 después del ensayo

L2_A

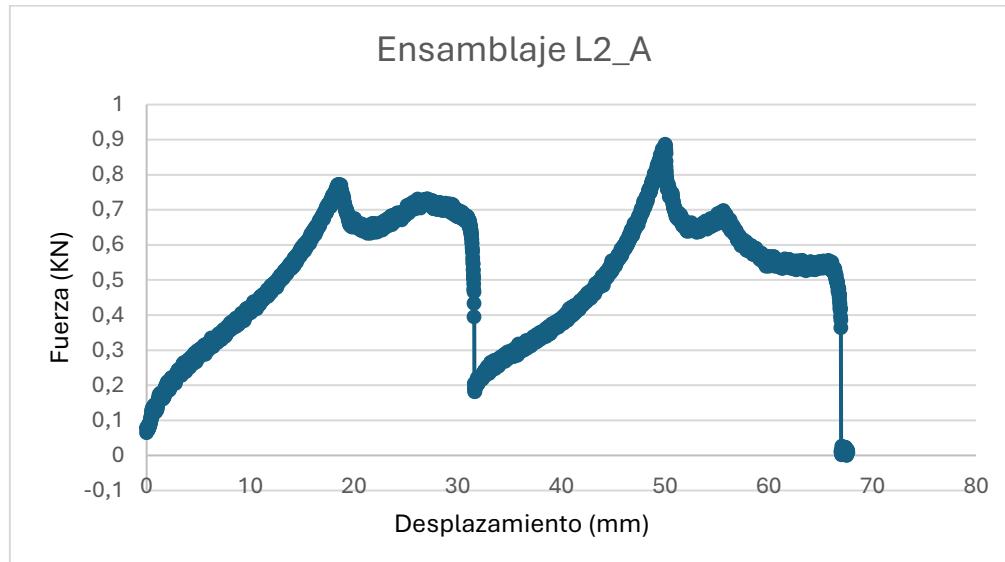


Figura 151: Curva Ensayo a Tracción L2_A

L2_B

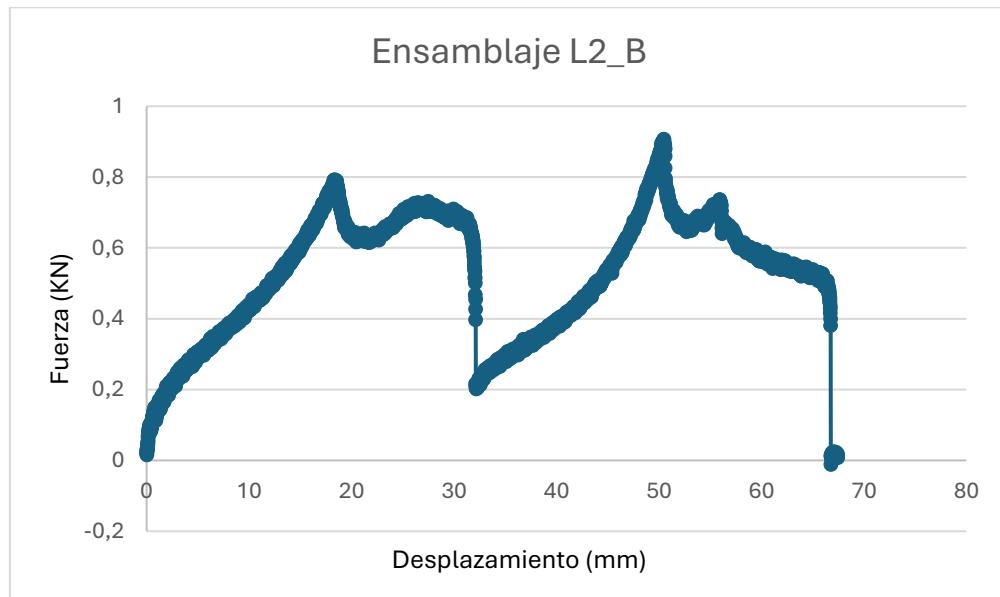


Figura 152: Curva Ensayo a Tracción L2_B

Antes



Figura 153: Ensamblaje L2 antes del ensayo

Durante



Figura 154: Ensamblaje L2 durante el ensayo

Después



Figura 155: Ensamblaje L2 después del ensayo

L3_A

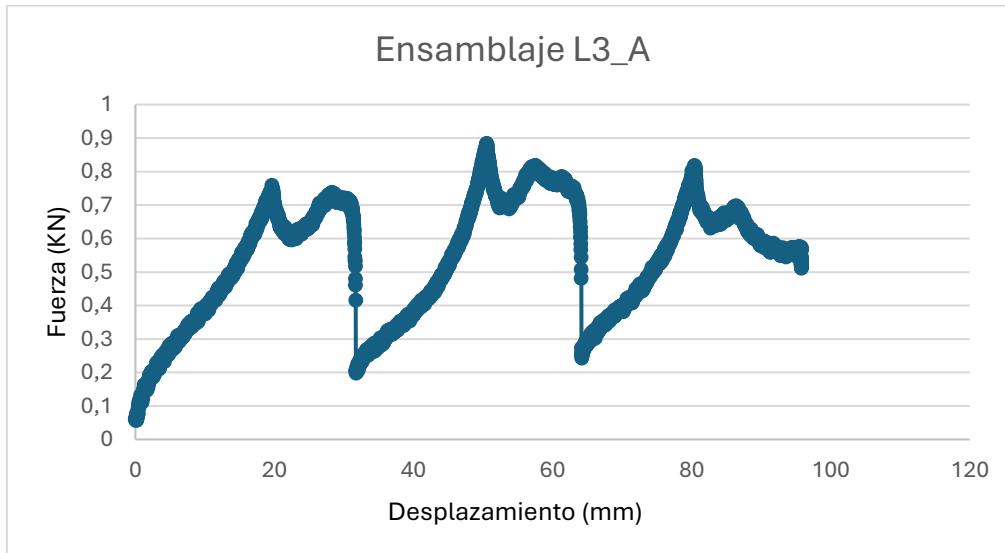


Figura 156: Curva Ensayo a Tracción L3_A

L3_B

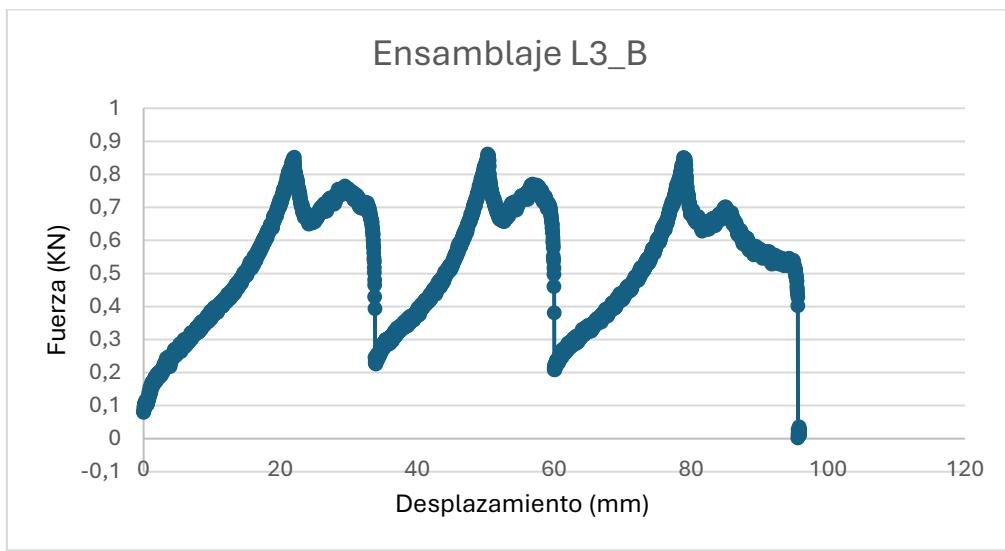


Figura 157: Curva Ensayo a Tracción L3_B

Antes



Figura 158: Ensamblaje L3 antes del ensayo

Durante



Figura 159: Ensamblaje L3 durante el ensayo

Después



Figura 160 Ensamblaje L3 después del ensayo

Anexo 6.3: Uniones a tracción del material

P1

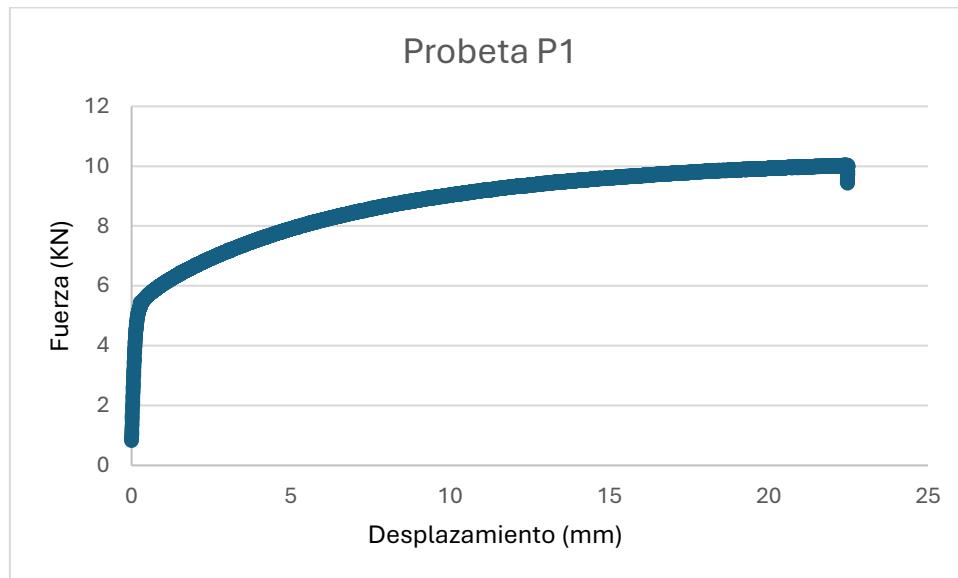


Figura 161: Curva Ensayo P1

P2

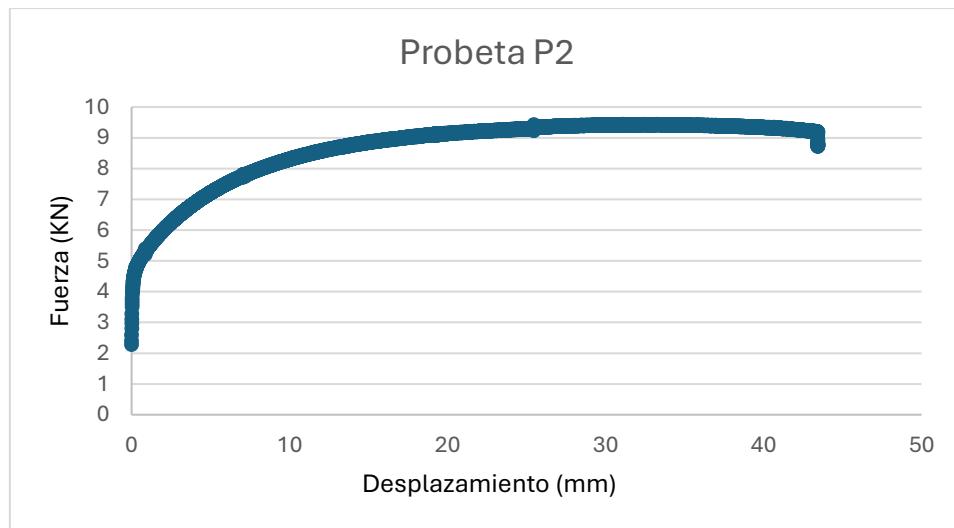


Figura 162: Curva Ensayo P2

Antes



Figura 163: Probeta antes del ensayo

Durante

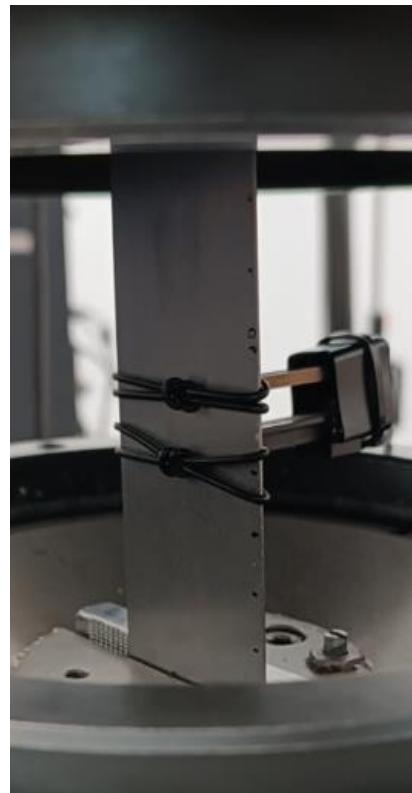


Figura 164: Probeta durante el ensayo

Después



Figura 165: Probeta después del ensayo