

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,**  
**VALPARAÍSO, CHILE**



**DESARROLLO Y PROTOTIPADO DE**  
**MÉTODOS DE SOLDADURA PLÁSTICA**  
**ECONÓMICOS CON PRUEBAS DE**  
**TRACCIÓN**

**DIEGO IGNACIO MATUS ABARCA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE**  
**INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL**

**PROFESOR GUÍA: DIPL.-ING. UDO RHEINSCHMIDT**  
**PROFESOR CO-REFERENTE: DR.-ING. LUIS PÉREZ POZO**

*Abril-2025*

# AGRADECIMIENTOS

Quiero tomar este pequeño apartado para agradecer aquellas personas que han sido parte de este largo camino dentro y fuera de la universidad.

En primer lugar, debo agradecer a mi madre, Claudia Abarca. Muchas gracias por el apoyo desde el primer día, por las palabras de aliento, los abrazos de consuelo y por la constante motivación que me transmitías para continuar y culminar este proceso.

Por otro lado, es imposible olvidar a aquellos compañeros y amigos tanto de la carrera como de otras. En especial a Máximo López, Maximiliano Soto, Juan Rodríguez, Matías Gonzalez y mi hermano de otra madre Ignacio Hagedorn, quienes me acompañaron en incontables noches de estudio, conversaciones y celebraciones, atenuando el estrés constante. Al mismo tiempo debo agradecer de manera especial a mis amigos Ignacio Pot, Iván Ramirez, Álvaro Bozo, Vicente Soumastre, Claudio Madrid, Álvaro Miranda, Fernanda Pandelara, Sergio Cespedes y el resto de los amigos de ELI que, si bien no compartimos la carrera o el área, la amistad, compañerismo, confianza, buenos momentos y conversaciones profundas generaron un vínculo que considero muy importante para mí y espero ser digno de mantener a través del tiempo.

Por último, agradecer al departamento de Ingeniería Mecánica de la universidad, a los profesores con quienes tuve la oportunidad de aprender en las diversas áreas y también agradecer a Udo Rheinschmidt, quién desde el primer momento tuvo la disposición para poder llevar a cabo este tema de trabajo.

# RESUMEN

Durante este trabajo se realizó una investigación exhaustiva sobre la soldadura plástica con el objetivo de identificar las variables y parámetros críticos para desarrollar tres métodos de soldadura utilizando equipos alternativos de bajo costo. Estos equipos, originalmente no diseñados para soldadura plástica, incluyen cautines y pistolas de calor modificados. La investigación también incluyó la estandarización de ensayos de tracción según la norma ASTM D638, fabricando probetas mediante impresión 3D con diferentes geometrías para evaluar uniones en V, traslape y traslape con esfuerzo combinado.

Los ensayos de tracción permitieron evaluar la efectividad de las uniones, revelando que algunos métodos lograron una resistencia adecuada y una buena calidad superficial. Sin embargo, se identificó que la consistencia y la calidad de las uniones dependen significativamente de la experiencia técnica del operador. Por lo tanto, es esencial estandarizar los procedimientos para asegurar la reproducibilidad y confiabilidad de los métodos desarrollados.

La investigación demostró que es viable utilizar equipos alternativos y económicos para soldadura plástica en aplicaciones de media y baja escala, lo que podría reducir significativamente los costos de inversión inicial. Esto no solo facilita la adopción de la soldadura plástica en pequeñas y medianas empresas, sino que también promueve su visibilidad y uso más amplio en la industria.

En conclusión, los métodos desarrollados funcionan y son capaces de producir uniones viables, pero requieren un control preciso de los parámetros y una estandarización rigurosa para garantizar la calidad y consistencia. Este enfoque abre nuevas posibilidades para la implementación de soldadura plástica económica, proporcionando una solución accesible y efectiva para diversas aplicaciones industriales.

## ABSTRACT

This study conducted an in-depth investigation into plastic welding to identify critical variables and parameters for developing three welding methods using low-cost alternative equipment. These tools which were originally not designed for plastic welding included soldering irons and heat guns with custom attachments. The research required the standardization of tensile testing following the ASTM D638 norm, with test specimens 3D-printed in different geometries to evaluate V-joints, lap joints, and combined-stress lap joints.

The tensile tests assessed joint effectiveness, showing that some methods achieved sufficient strength and good surface quality. However, it was found that joint consistency and quality depend significantly on the operator's technical skill. Thus, standardizing procedures is essential to ensure the reproducibility and reliability of the developed methods.

The study demonstrated that alternative, low-cost plastic welding equipment is viable for small- to medium-scale applications, which could substantially reduce initial investment costs. This not only eases the adoption of plastic welding in small and medium-sized enterprises but also enhances its visibility and broader industrial use.

In conclusion, the developed methods are functional and can produce viable joints, but they require precise parameter control and rigorous standardization to guarantee quality and consistency. This approach opens new possibilities for cost-effective plastic welding, providing an accessible and efficient solution for diverse industrial applications.

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	1
<b>RESUMEN</b> .....	2
<b>ABSTRACT</b> .....	3
<b>ÍNDICE</b> .....	4
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	7
<b>OBJETIVOS GENERALES</b> .....	8
<b>PLAN DE TRABAJO</b> .....	9
<b>1. Marco teórico – Estado del Arte</b> .....	12
<b>1.1. Introducción al área de estudio</b> .....	12
<b>2.2. Historia y evolución de la soldadura plástica</b> .....	13
<b>2.3. Principios fundamentales</b> .....	14
<b>2.4. Métodos de soldadura plástica actuales</b> .....	15
2.4.1. Soldadura por Ultrasonido .....	16
2.4.2. Soldadura por Aire Caliente.....	16
2.4.3. Soldadura por Extrusión .....	17
2.4.4. Soldadura por Fricción .....	17
2.4.5. Soldadura Láser .....	17
2.4.6. Soldadura por Placa Caliente .....	18
<b>2.5. Materiales y propiedades</b> .....	18
2.5.1. Termoestables vs. Termoplásticos: Una Perspectiva Térmica y Mecánica.....	18
2.5.2. Propiedades Clave para la Soldadura Plástica.....	19
2.5.3. Termoplásticos Recomendados para Soldadura Plástica .....	20
<b>2.6. Aplicaciones y casos de estudio</b> .....	21
2.6.1. Industria del Embalaje .....	22
2.6.2. Industria Automotriz.....	22
2.6.3. Industria de Productos de Consumo .....	22
2.6.4. Industria Médica .....	23
<b>3. Prototipado de soldadura plástica a menor escala</b> .....	23
<b>3.1. Teoría y consideraciones</b> .....	23
3.1.1. Soldadura teórica.....	23

3.1.2. Selección del material de trabajo .....	24
<b>3.2. Métodos de soldadura .....</b>	<b>24</b>
3.2.1. Método basado en Pistola de Calor & accesorios .....	25
3.2.2. Método basado en el uso de Cautín con boquilla o punta de lápiz .....	27
3.2.3. Soldadura sin/con añadido de material .....	31
<b>3.3. Probetas .....</b>	<b>33</b>
3.3.1. Norma ASTM D638 .....	33
3.3.2. Diseño y Producción de las probetas .....	38
<b>4. Pruebas de soldadura .....</b>	<b>40</b>
<b>4.1. Equipo utilizado.....</b>	<b>40</b>
<b>4.2. Consideraciones.....</b>	<b>41</b>
<b>4.3. Ensayo tracción probeta normal.....</b>	<b>43</b>
<b>4.4 Ensayo de tracción - Unión en V.....</b>	<b>43</b>
4.4.1. Preparación de la Junta.....	44
4.4.2. Proceso de Soldadura.....	45
4.4.3. Ensayo para método con pistola de calor (PCx).....	45
4.4.4. Ensayo para método con cautín con boquilla (C1x).....	47
4.4.5. Ensayo para método con cautín “punta de lápiz” (C2x).....	49
<b>4.5. Ensayo de tracción - Unión en traslape con E.C.....</b>	<b>50</b>
4.5.1. Preparación de las Piezas.....	52
4.5.2. Proceso de Soldadura.....	52
4.5.3. Ensayo para método con pistola de calor (PCx).....	53
4.5.4. Ensayo para método con cautín con boquilla (C1x).....	55
4.5.5. Ensayo para método con cautín con “punta de lápiz” (C2x).....	56
<b>4.6. Ensayo de tracción - Unión en traslape .....</b>	<b>57</b>
4.6.1. Preparación de la Junta.....	58
4.6.2. Proceso de Soldadura.....	59
4.6.3. Ensayo para método con cautín con boquilla (C1x).....	59
4.6.4. Ensayo para método con cautín con “punta de lápiz” (C2x).....	61
<b>5. Análisis de resultados .....</b>	<b>63</b>
<b>5.1. Calidad superficial.....</b>	<b>63</b>
<b>5.2. Fenómenos apreciados .....</b>	<b>65</b>
5.2.1. Elongación .....	65

5.2.2. Modo de falla.....	65
<b>5.3. Deformación plástica y elástica .....</b>	<b>67</b>
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>68</b>
<b>6.1. Conclusiones cuantitativas .....</b>	<b>68</b>
6.1.1. Ensayo en probetas bajo tracción pura.....	68
6.1.2. Ensayo con probetas sometidas a esfuerzos combinados.....	69
<b>6.2. Conclusiones cualitativas.....</b>	<b>72</b>
6.2.1. Calidad Superficial .....	72
6.2.2. Integridad de la Unión.....	72
6.2.3. Adherencia y Cohesión .....	72
6.2.4. Propiedades del Material .....	72
6.2.5. Estabilidad Dimensional.....	72
6.2.6. Estética .....	73
<b>6.3. Conclusiones de los métodos.....</b>	<b>73</b>
6.3.1. Pistola de Calor con Boquilla (PCx).....	73
6.3.2. Cautín con Boquilla (C1x).....	74
6.3.3. Cautín con Punta de Lápiz (C2x).....	74
<b>6.4. Conclusiones Generales sobre la Soldadura Plástica .....</b>	<b>75</b>
6.4.1. Ventajas .....	75
6.4.2. Aspectos a mejorar .....	75
6.4.3. Consideraciones .....	75
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>78</b>

# INTRODUCCIÓN

La soldadura plástica es un método que hoy en día no se conoce mucho dada la poca visibilidad que se le da a todos los posible usos, sin embargo, se utiliza bastante en el área industrial, en el sector automotriz, industria médica, empaquetado, construcción, industria aeroespacial, entre otros. Como buen método de unión lo importante siempre radica en la resistencia de esta y en el acabado final de la unión, que para los sectores antes mencionados es necesaria una garantía de la efectividad de la soldadura.

Otro de los posibles factores de la poca visibilidad de este método es el costo que involucra adquirir equipos especializados para ello respecto a la utilización que se le dará. Así mismo cada equipo o método de soldadura industrial requiere de cierta capacitación en el personal y conocimientos mínimos de los equipos a utilizar además del material a soldar.

Tomando en cuenta lo anterior mencionado es que se plantea por medio de este documento, una investigación basada en la soldadura plástica tradicional seguido del desarrollo y protipado de métodos de soldadura plástica con la ayuda de equipos de menor costo y con la ayuda de accesorios que permitan establecer los parámetros necesarios en el proceso de soldadura para generar una buena unión. Al mismo tiempo se busca desarrollar una guía a grandes rasgos de cómo realizar los procedimientos con cada método.

Para comprobar la eficacia de la unión de cada método desarrollado es necesario realizar ensayos de tracción que permitan evidenciar la calidad de soldadura obtenida. Es necesario considerar la norma ASTM D638, la cual entrega la información necesaria para obtener las dimensiones principales de la probeta a utilizar en los ensayos, posterior a ello se debe realizar el diseño de las diferentes probetas necesarias en software Inventor, para su posterior producción en PLA (material seleccionado para realizar la soldadura de prueba) con la ayuda de la impresión 3D.

Finalmente se debe realizar un análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados del ensayo de tracción tomando en cuenta factores como adherencia del material, calidad superficial de la unión, carga máxima soportada y desplazamiento máximo antes de la fractura. De este modo se podrá demostrar que las uniones son útiles, repetibles y pueden ser implementadas en diferentes contextos.

# OBJETIVOS GENERALES

El objetivo general del presente trabajo de título es realizar métodos de soldadura plástica con baja inversión económica y al mismo tiempo garantizando una buena unión. Al mismo tiempo se busca respaldar la efectividad de la unión sometiendo los diferentes métodos de soldadura a pruebas de tracción bajo norma internacional (esto incluye la producción de probetas). Para la interpretación de los resultados de los ensayos de tracción se utilizará un análisis cualitativo y cuantitativo, de este modo se pueden apreciar factores como la resistencia a la tracción, elongación máxima antes de fractura, uniformidad de la soldadura, adherencia de material, entre otros.

## Objetivos específicos

- Investigar a líneas generales la utilización de la soldadura plástica en la industria, su valor aproximado, los métodos disponibles, accesorios y capacitaciones necesarias.
- Establecer los parámetros y factores más relevantes para el proceso que involucra la soldadura plástica.
- Proponer una guía básica de soldadura para cada método desarrollado.
- Investigar normas que involucren ensayos de tracción en plásticos, de tal modo de obtener las dimensiones de la probeta.
- Realizar el diseño en software 3D de las probetas para su posterior producción con la ayuda de la impresión 3D.
- Realizar interpretación de los resultados de los ensayos, tomando como punto de comparación las probetas completas (sin unión).
- Presentar conclusiones cualitativas y cuantitativas además de consideraciones, incluyendo el método más versátil de los propuestos.

# PLAN DE TRABAJO

## Planteamiento de la idea

La soldadura plástica es una tecnología con gran potencial en diversas industrias debido a su flexibilidad y durabilidad. Sin embargo, la adopción de esta tecnología se ve obstaculizada por los altos costos de inversión inicial necesarios para adquirir equipos especializados. Además, la soldadura plástica no es ampliamente conocida, lo que limita la demanda y, por ende, justifica menos la inversión en equipos costosos.

El objetivo de este documento es desarrollar métodos de soldadura plástica utilizando equipos alternativos y de bajo costo, como cautines y pistolas de calor, modificados con accesorios específicos que permitan un control adecuado de los parámetros críticos del proceso. Estos equipos alternativos, accesibles y económicos, serán adaptados para mejorar el control de temperatura, presión y tiempo de exposición, factores cruciales para la calidad de la soldadura.

Para alcanzar este objetivo, es necesario realizar un estudio teórico exhaustivo sobre los métodos de soldadura plástica existentes, identificando sus limitaciones y oportunidades de mejora. Este estudio proporcionará la base para desarrollar prototipos de equipos modificados que puedan ser utilizados de manera efectiva en procesos de soldadura plástica. Además, se requiere el desarrollo de habilidades prácticas para estandarizar la soldadura en diferentes tipos de unión, garantizando que las uniones resultantes sean eficaces, tengan un buen acabado superficial y sean replicables en los diferentes métodos propuestos.

Un correcto desarrollo de métodos de soldadura plástica debe implicar la realización de pruebas de tracción para validar la calidad de las soldaduras obtenidas con los equipos alternativos. Estas pruebas permitirán ajustar y optimizar los parámetros de soldadura, asegurando que los métodos desarrollados sean robustos y confiables.

## Metodología

Cuando lo que se busca es el desarrollar métodos de soldadura plástica, es importante seguir una metodología de trabajo que sea sistemática, eficiente y adaptada a las limitaciones existentes, que permita el correcto estudio del ámbito de la soldadura en polímeros. Es por ello que para el desarrollo del documento se profundizará en los siguientes apartados, para lograr abarcar tanto el ámbito teórico como el práctico en el área de la soldadura plástica.

### ➤ **Definición del problema y objetivos**

Al comienzo del documento se plantean los diferentes objetivos y la problemática general. Sin embargo, esto debe ser profundizado para poder establecer la base de partida en la investigación al mismo tiempo que metas, como lo es poder lograr uniones eficaces y reproducibles bajo el contexto de la soldadura plástica.

Por otro lado, los objetivos marcan etapas para una correcta investigación y desarrollo de métodos de soldadura no tradicionales. Es por ello que los objetivos deben indicar claramente el fin que busca dentro del desarrollo de los métodos.

#### ➤ **Estado del arte**

En este apartado es necesario investigar artículos relacionados, patentes existentes de tecnología actual y estudios relacionados a la soldadura plástica. Del mismo modo es importante conocer el impacto que ha tenido en los últimos 50 años y el desarrollo actual que se le da para su implementación en las diferentes industrias.

Al mismo tiempo es necesario realizar un Benchmarking, que permita establecer niveles de inversión económica necesaria para los distintos métodos ya existentes e implementados en las industrias.

#### ➤ **Diseño conceptual y prototipado**

Tomando en consideración la información obtenida en el estado del arte, se pueden obtener los parámetros más importantes a la hora del proceso de soldadura. Al mismo tiempo, tener una perspectiva económica gracias al Benchmarking es que permite establecer niveles de inversión respecto a la tecnología utilizada, principio de funcionamiento y la industria a la que pertenece.

Por otro lado, se debe realizar una cuidadosa selección de los posibles equipos a utilizar para los diferentes métodos y establecer la posibilidad de realizar uniones con y sin añadido de material extra. De este modo se pueden abarcar más opciones para la aplicación de los métodos de soldadura plástica desarrollados. Del mismo modo se debe seleccionar el material polimérico con el cual se va a trabajar y desarrollar los métodos.

Finalmente, los prototipos desarrollados, deben ser capaces de enfrentar el proceso de soldadura plástica aplicando los diferentes métodos de unión, adición o junta establecidos para el desarrollo del estudio, considerando tanto los parámetros operacionales como el resultado en las uniones (dada la experiencia técnica).

#### ➤ **Ensayos y evaluación de calidad**

Una vez logrados los resultados en las uniones soldadas, es necesario realizar ensayos de tracción y evaluación de la calidad en las uniones soldadas de plástico ya que de este modo se puede asegurar la integridad estructural, la durabilidad y el rendimiento adecuado del material en su aplicación final. Estos ensayos proporcionan información crítica sobre la eficacia del proceso de soldadura y sobre si la unión cumplirá con los requisitos específicos del diseño.

#### **Cómo se realizan los ensayos**

1. **Preparación de las probetas o muestras:** Se requiere la preparación de las probetas o muestras ya soldadas, siguiendo un procedimiento estándar que asegure la repetibilidad de los ensayos.

2. **Ensayos de Tracción:** Las muestras se colocan en una máquina de ensayos de tracción, que aplica una fuerza de separación axial a la unión hasta que esta falla. Durante el ensayo, se registran datos como la fuerza máxima soportada, la elongación a la ruptura y, en algunos casos, el módulo de elasticidad.
3. **Análisis de los Resultados:** Los datos recogidos se analizan para evaluar la calidad de la soldadura. Se busca entender el modo de fallo (por ejemplo, si la ruptura ocurrió en el material base, en la zona de soldadura o en la interfaz), la resistencia de la unión en comparación con el material no soldado, y cualquier signo de defectos de soldadura como porosidad, inclusiones o zonas térmicamente afectadas inadecuadamente.

➤ **Análisis de resultados y conclusiones**

Qué se busca observar

- **Resistencia de la Unión:** Comparar la resistencia de la unión soldada con la del material base para determinar si el proceso de soldadura ha comprometido la integridad del material.
- **Modo de Fallo:** Identificar dónde y cómo ocurre el fallo durante el ensayo proporciona información valiosa sobre la calidad de la soldadura y posibles mejoras.
- **Deformación Plástica:** La cantidad de deformación antes de la ruptura indica la ductilidad de la unión soldada, lo que es crucial para aplicaciones que requieren cierta flexibilidad.
- **Defectos y Homogeneidad:** Evaluar la presencia de defectos y la homogeneidad de la soldadura para asegurar que la unión pueda soportar las condiciones de servicio esperadas.
- **Calidad superficial:** Es necesario considerar el resultado en la calidad superficial para diferentes ámbitos que se puede utilizar la soldadura, además que, dependiendo del método o el uso, puede alterar los colores y textura del material.

Estos ensayos son fundamentales para el desarrollo y la validación de procesos de soldadura de plásticos, asegurando que las uniones soldadas cumplan con los criterios de diseño y los estándares de seguridad necesarios para su aplicación específica.

### Validación de los métodos mediante análisis cualitativo y cuantitativo

El análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados permiten evaluar la calidad de las uniones realizadas y comprobar la efectividad de los métodos para reproducir uniones soldadas en diferentes ocasiones, por diferentes métodos, o con diferentes formas de unión.

¿Por qué son necesarios los ensayos de tracción y evaluación de la calidad?

- **Verificar la Resistencia Mecánica:** Los ensayos de tracción determinan la resistencia a la separación de las uniones soldadas. Esto es fundamental en aplicaciones donde las piezas están sujetas a cargas mecánicas durante su uso.
- **Evaluar la Homogeneidad de la Unión:** La calidad de la soldadura afecta directamente la distribución de tensiones en la unión. Un ensayo de tracción puede revelar si la soldadura es homogénea y sin defectos, lo que podría llevar a puntos débiles.
- **Optimización del Proceso de Soldadura:** Los resultados de estos ensayos permiten ajustar los parámetros del proceso de soldadura, como la temperatura, el tiempo y la presión, para mejorar la calidad de la unión.
- **Cumplimiento de Estándares y Normativas:** En muchas industrias, las uniones soldadas deben cumplir con normativas específicas que garantizan la seguridad y la eficacia del producto final. Así mismo para realizar los ensayos es necesario tomar en consideración normas internacionales para no afectar la interpretación de datos o resultados.

## 1. Marco teórico – Estado del Arte

### 1.1. Introducción al área de estudio

La soldadura plástica representa un pilar fundamental en la manufactura y reparación de una vasta gama de productos de uso cotidiano, industrial y especializado. En la actualidad, el avance hacia una economía más sostenible y consciente del uso eficiente de los recursos hace que el desarrollo de métodos de soldadura plástica económicos no sea solo una ventaja competitiva, sino una necesidad imperante.

Dentro del ámbito económico, la optimización de los procesos de soldadura tiene un impacto directo en la reducción de costos de producción. Al emplear técnicas más económicas sin sacrificar la calidad, las empresas pueden ofrecer productos más accesibles, generando una oportunidad en ámbitos productivos.

Por otro lado, la sostenibilidad se erige como uno de los mayores retos del siglo XXI. La adopción de prácticas de soldadura plástica que minimicen el desperdicio de material y energía es un componente clave en la reducción de la huella ambiental de la producción. Asimismo, al prolongar la vida útil de los productos mediante reparaciones eficientes y asequibles, se contribuye a la economía circular, promoviendo un ciclo de vida más largo y sostenible para los productos plásticos.

La innovación en los métodos de soldadura plástica económicos también abre puertas a la inclusión de materiales reciclados en los procesos de producción, apoyando así la gestión de residuos y fomentando una cultura de reciclaje industrial. Esta visión alinea a las industrias con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, estableciendo un marco ético y práctico para el desarrollo industrial.

Por lo tanto, el desarrollo de técnicas de soldadura plástica económicas y sostenibles es crucial para enfrentar los desafíos económicos actuales y futuros, promover la sostenibilidad ambiental y respaldar el compromiso social de las industrias grandes, medianas y pequeños talleres. Al abordar estos métodos con una visión innovadora, se sientan las bases para una industria más resiliente y responsable, preparada para avanzar hacia un futuro más próspero y verde, además de ofrecer la posibilidad de realizar soldadura plástica sin una gran inversión.

## **2.2. Historia y evolución de la soldadura plástica**

Una particularidad en el desarrollo de nuevas tecnologías a lo largo de la historia es que, en cada uno de estas, existió de por medio satisfacer una necesidad creada por el contexto y para una situación en específico, posteriormente son mejoradas y más estudiadas en el tiempo a la vez que son modificadas para satisfacer otras necesidades más específicas del uso que se le busque dar. Por ello es necesario conocer el contexto de la evolución de la soldadura plástica, con el fin de reconocer necesidades, tecnologías, métodos y factores que se tomaron en consideración al pasar las décadas.

**1930s - Innovaciones en Polímeros:** Con la invención del polietileno (1933) y el poliestireno (1937), los plásticos comienzan a ser vistos como materiales alternativos a los tradicionales en varios sectores. Estos nuevos materiales requerían métodos de unión innovadores, lo que sienta las bases para la futura soldadura plástica enfocando los esfuerzos de aquellos años en entender el comportamiento térmico y la reactividad de estos nuevos materiales.

**1940s - Soldadura en Tiempos de Guerra:** Durante la Segunda Guerra Mundial, la necesidad de materiales resistentes y ligeros llevó al uso experimental de la soldadura plástica en equipamiento militar, abriendo el camino para su uso en aplicaciones civiles, centrandos sus estudios para enfocarse en la resistencia y velocidad de unión.

**1950s - Avances en la Soldadura por Fricción:** La postguerra trajo un aumento en la fabricación de bienes de consumo, y con ello, la soldadura por fricción se convirtió en un método estándar para la unión de materiales plásticos, especialmente en la creciente industria del juguete, esta última industria enfocó los estudios en los parámetros operacionales de presión y movimiento con el fin de garantizar homogeneidad en la producción.

**1960s - Auge de la Soldadura por Ultrasonido:** Con la invención de la soldadura por ultrasonido, la industria del plástico pudo unir piezas pequeñas con precisión, revolucionando la fabricación de productos electrónicos y de consumo. Para el desarrollo de este método, fue necesario el estudio de los parámetros de frecuencia del ultrasonido y tiempo de aplicación.

**1970s - Soldadura de Composites:** La necesidad de materiales más resistentes impulsó el desarrollo de la soldadura de plásticos reforzados, esto gracias a concentrar los estudios en la temperatura y presión para poder maximizar la resistencia y durabilidad, lo que jugó un papel crucial en la producción de vehículos más ligeros y eficientes energéticamente, así como en componentes aeroespaciales.

**1980s - Precisión con la Soldadura por Láser:** La tecnología láser proporcionó a las industrias una herramienta de unión sin contacto, lo que permitió la producción de

componentes de alta precisión y fue fundamental en el avance de la tecnología médica y la miniaturización de dispositivos electrónicos, para ello fue necesario el desarrollo y estudio de la precisión del haz y la gestión térmica de la zona.

**1990s - Eficiencia con la Soldadura por Infrarrojos:** La soldadura por infrarrojos permitió unir plásticos con mayor rapidez y menor consumo de energía, facilitando la producción en masa y mejorando la eficiencia operativa de las plantas de manufactura.

**2000s - Integración de la Automatización:** La incorporación de la automatización en la soldadura plástica aumentó exponencialmente la producción y aseguró una calidad y uniformidad que manualmente sería difícil de lograr, abriendo paso a una era de fabricación avanzada, en este punto de la historia se busca la repetibilidad y precisión en los ciclos de soldadura, garantizando así la uniformidad en la producción a gran escala.

**2010s - Soldadura Ecológica y Reciclaje:** A medida que el reciclaje de plásticos se convirtió en una práctica estándar, la industria de la soldadura se adaptó para permitir la unión eficaz de plásticos reciclados, apoyando la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental.

**2020s - Innovación hacia la Economía Circular:** La actual década se centra en perfeccionar la soldadura plástica dentro de la economía circular, buscando métodos que reduzcan el impacto ambiental y promuevan el uso de materiales reciclados, así como el desarrollo de tecnologías de soldadura que consuman menos energía y faciliten la reparación y reutilización de productos.

## 2.3. Principios fundamentales

Tomando en cuenta la historia detrás del desarrollo de la soldadura de polímeros es que surgen varios parámetros que repetitivamente se tomaron en cuenta para el desarrollo y mejora de los métodos y es necesario tomarlos en cuenta dado que son parte de los principios fundamentales para ejecutar la unión de manera correcta. Entre ellos se encuentra la temperatura, la presión y el tiempo de aplicación como principales, los otros parámetros mencionados son alusivos directamente al método y equipos con el cual se trabaja.

### Temperatura

La temperatura juega un papel crucial en la soldadura plástica, ya que afecta directamente la integridad del material y la calidad de la unión. Cada tipo de plástico tiene un rango de temperatura específico en el que se vuelve lo suficientemente maleable para fusionarse sin degradarse. Este rango se conoce como la "ventana de procesamiento" del material.

Si la temperatura es demasiado baja, los polímeros no alcanzarán el estado necesario para una adecuada difusión de las cadenas moleculares, lo que resulta en una soldadura débil o incompleta. Por otro lado, si se excede la temperatura superior del rango, el plástico puede quemarse o degradarse, alterando su estructura química y física, lo que conduce a la pérdida de propiedades mecánicas y estéticas.

Entonces, durante la soldadura hipotética, es esencial mantener la temperatura dentro de este rango óptimo. La aplicación controlada del calor permite que los polímeros en las superficies que se van a unir se entrelacen, creando una unión sólida al enfriarse. Además, la temperatura correcta asegura que no haya emisión de gases tóxicos y que el acabado del material soldado sea homogéneo y limpio.

### Presión

La presión es un parámetro vital en la soldadura plástica, ya que contribuye a la calidad y fortaleza de la unión soldada. Durante la soldadura, se aplica presión para ayudar a que las superficies de plástico se fundan y entrelacen las cadenas moleculares. Sin suficiente presión, las superficies no pueden fusionarse adecuadamente, resultando en uniones débiles o porosas. Por otro lado, una presión excesiva puede causar deformaciones o el exceso de flujo del material, llevando a uniones irregulares y la creación de tensiones internas que pueden comprometer la integridad estructural del producto final.

Además, la presión debe ser distribuida de manera uniforme para asegurar que toda el área de unión se fusione correctamente. Esto es especialmente importante en la soldadura de piezas grandes o con geometrías complejas.

Por lo tanto, si se logra una presión uniforme garantiza una soldadura consistente a lo largo de toda la junta, maximizando así la resistencia y la durabilidad.

### Tiempo de aplicación

El tiempo de aplicación de calor en la soldadura plástica también es esencial y debe ser cuidadosamente controlado. Este parámetro está estrechamente relacionado con la temperatura y la presión, y juntos determinan la eficacia del proceso de soldadura. Si el calor se aplica durante muy poco tiempo, los materiales no alcanzarán la temperatura necesaria para que ocurra una buena fusión. En contraste, un tiempo excesivo puede llevar a la degradación térmica del plástico, lo que afecta adversamente sus propiedades mecánicas y su apariencia.

El tiempo óptimo de aplicación de calor depende del tipo de plástico, del método de soldadura empleado y del diseño específico de la junta. Una adecuada regulación del tiempo es crucial para permitir que el calor penetre a través de las piezas de trabajo y active el proceso de soldadura sin causar daño al material. Por tanto, el control del tiempo es un factor decisivo en la eficiencia del proceso y la calidad del ensamble final.

Finalmente, se tiene que estos parámetros son los que se busca controlar o estandarizar en algún método para abrir la posibilidad a la soldadura plástica con métodos alternativos.

## **2.4. Métodos de soldadura plástica actuales**

Por otro lado, es posible analizar los diferentes métodos existentes, aquellos más utilizados en la actualidad, de este modo se puede tomar en cuenta ciertos parámetros operacionales, técnicas de utilización, información respecto al costo e inversión necesaria por método y la justificación. De este modo se busca obtener información relevante para plantear nuevos

métodos alternativos que cuenten con las características, parámetros y consideraciones pertinentes.

A modo de acotar los diferentes métodos que existen y que se siguen desarrollando, se realizara el análisis de los principales 6 métodos de soldadura plástica actualmente utilizados tanto en la alta, mediana industria hasta pequeños talleres, los valores entregados corresponden a cotizaciones hechas para el mercado de EEUU y no consideran los valores de envío, instalación ni la capacitación necesaria para operadores.

#### 2.4.1. Soldadura por Ultrasonido

Este método utiliza vibraciones de alta frecuencia para generar calor por fricción en la interfaz de las piezas a unir. Es ampliamente utilizado en la fabricación de productos de consumo, componentes automotrices y dispositivos médicos debido a su rapidez y capacidad para soldar piezas complejas sin dañar componentes electrónicos cercanos.

La inversión inicial para un sistema básico de soldadura por ultrasonido puede variar entre \$3.000 y \$15.000 USD. Los sistemas más avanzados y con mayor capacidad pueden superar fácilmente los \$30.000 USD.

Equipos mínimos para operar:

- **Generador de ultrasonidos:** Proporciona la energía eléctrica de alta frecuencia necesaria.
- **Transductor de ultrasonidos:** Convierte la energía eléctrica en vibraciones mecánicas.
- **Cuerno o Sonotrodo:** Amplifica las vibraciones y las transfiere a las piezas a soldar.
- **Prensa o soporte:** Sostiene las piezas en posición y aplica presión durante el proceso de soldadura.

#### 2.4.2. Soldadura por Aire Caliente

La soldadura por aire caliente emplea un chorro de aire que ha sido calentado a temperaturas elevadas para fundir las superficies de contacto de los plásticos antes de unirlos. Este método es versátil y se utiliza tanto en talleres pequeños como en aplicaciones industriales para la reparación de piezas plásticas y la fabricación de productos como tanques y contenedores.

Un equipo básico de soldadura por aire caliente puede costar entre \$150 y \$800 USD. Equipos más profesionales y especializados pueden ascender hasta los \$2.000 USD.

Equipos mínimos para operar:

- **Pistola de aire caliente:** El dispositivo principal que genera y dirige el flujo de aire caliente.
- **Boquillas:** Accesorios que se ajustan a la salida de la pistola para controlar el flujo de aire.

### 2.4.3. Soldadura por Extrusión

En la soldadura por extrusión, se utiliza un material de aporte plástico que se alimenta a través de una extrusora portátil, donde se funde y se aplica en la junta a soldar. Este método es ideal para soldaduras de mayor volumen y se utiliza comúnmente en la construcción de tanques y tuberías de plástico.

Los equipos de soldadura por extrusión pueden tener un costo que varía desde \$1.500 hasta \$5.000 USD para modelos portátiles básicos. Los equipos más grandes y especializados para aplicaciones industriales pueden costar más.

Equipos mínimos para operar:

- **Extrusora portátil:** El equipo que funde el material de aporte y lo extruye a través de una boquilla.
- **Boquillas de diferentes tamaños/formas:** Para adaptarse a diferentes tipos de juntas.
- **Rodillo de presión:** Para ayudar a fusionar el material extruido con las piezas a unir.

### 2.4.4. Soldadura por Fricción

La soldadura por fricción implica el movimiento relativo de dos piezas de plástico bajo presión para generar calor por fricción, fundiendo los materiales en la zona de unión. Este método es especialmente útil para unir componentes circulares, como tubos y accesorios.

Para la soldadura por fricción, los equipos básicos empiezan en un rango de \$10.000 a \$50.000 USD. La soldadura por fricción rotativa puede requerir equipos más costosos para aplicaciones industriales.

Equipos mínimos para operar:

- **Máquina de soldadura por fricción:** Incluye el motor y el mecanismo que genera movimiento relativo entre las piezas.
- **Mandril o soporte de piezas:** Mantiene las piezas en su lugar durante el proceso de soldadura.
- **Sistema de control:** Para ajustar los parámetros de soldadura como la velocidad y la presión.

### 2.4.5. Soldadura Láser

La soldadura láser utiliza la energía de un haz láser para fundir los plásticos en la zona de unión. Este método ofrece una alta precisión y control, siendo ideal para soldar piezas pequeñas o con geometrías complejas. Es comúnmente utilizado en la industria electrónica, automotriz y médica.

La inversión para sistemas de soldadura láser comienza en el rango de \$15.000 a \$100.000 USD para equipos básicos. Los sistemas avanzados diseñados para aplicaciones de alta precisión pueden superar los \$250.000 USD.

Equipos mínimos para operar:

- **Fuente láser:** Genera el haz láser necesario para el proceso de soldadura.
- **Sistema óptico:** Dirige y enfoca el haz láser en el punto de soldadura.
- **Sistema de control:** Permite al operador ajustar los parámetros del láser como la potencia, la duración del pulso y la repetición.
- **Sistema de refrigeración:** Mantiene la temperatura adecuada de la fuente láser.

#### 2.4.6. Soldadura por Placa Caliente

Consiste en calentar las piezas a unir mediante una placa metálica caliente hasta que el material se funde. Luego, la placa se retira y las piezas se presionan juntas para formar una soldadura. Este método es efectivo para unir piezas grandes y es ampliamente utilizado en la industria automotriz y en la fabricación de contenedores de plástico.

El costo de implementación para sistemas básicos de soldadura por placa caliente puede estar en el rango de \$5.000 a \$20.000 USD. Equipos más complejos y de mayor capacidad pueden tener costos significativamente más altos.

Equipos mínimos para operar:

- **Placa calefactora:** Elemento que se calienta para fundir las superficies de las piezas plásticas.
- **Prensa o sistema de sujeción:** Mantiene las piezas en posición y aplica presión después de retirar la placa caliente.
- **Controlador de temperatura:** Permite ajustar y mantener la temperatura deseada de la placa caliente.

Como queda expuesto, actualmente se requieren inversiones de al menos 2.000 USD para tener equipos especializados en el ámbito de soldadura plástica, elevando más esa cifra mientras más requerimientos exija la unión, el material a unir o la capacitación del personal necesario para operar. Por otro lado, nuevamente entrega aspectos relacionados a la temperatura, presión, control de añadido de material, entre otros.

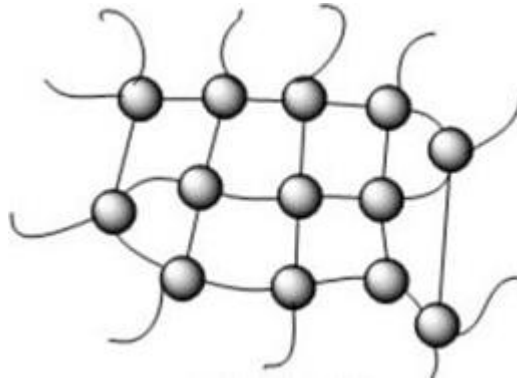
## 2.5. Materiales y propiedades

Por otro lado, la elección de materiales poliméricos para procesos de soldadura plástica requiere una comprensión profunda de las propiedades térmicas, mecánicas y químicas de dichos materiales. La distinción entre polímeros termoestables y termoplásticos es fundamental en este contexto, ya que determina la capacidad de un material para ser soldado mediante técnicas de fusión.

### 2.5.1. Termoestables vs. Termoplásticos: Una Perspectiva Térmica y Mecánica

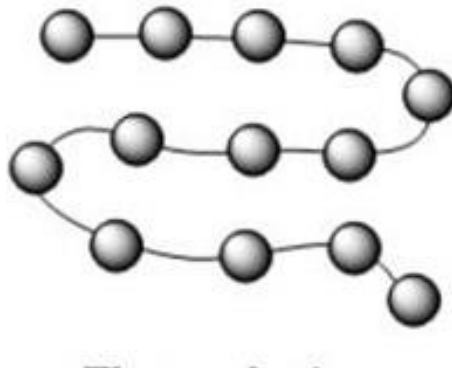
**Termoestables** son polímeros que, una vez curados mediante un proceso de reticulación química inducido por calor, se convierten en materiales infusibles e insolubles. Este proceso

de curado crea una red tridimensional de enlaces químicos que proporciona al material una estructura rígida y una resistencia inherente a la deformación bajo cargas térmicas. Sin embargo, esta misma red hace que los termoestables sean incapaces de fluir nuevamente bajo la aplicación de calor, limitando su utilidad en procesos de soldadura que requieren la fusión del material.



*Ilustración 1 Enlaces químicos - Termoestable*

**Termoplásticos**, por otro lado, carecen de esta red química cruzada, lo que les permite suavizarse y fundirse cuando se exponen a temperaturas elevadas, y solidificarse al enfriarse, sin sufrir cambios químicos irreversibles. Este comportamiento térmico facilita su manipulación y transformación mediante soldadura plástica, aprovechando la ductilidad del material en su estado fundido para crear uniones efectivas. La **ductilidad** en el estado fundido es crucial para permitir una buena fluidez del material en la zona de unión, mientras que la **fragilidad** de algunos polímeros a baja temperatura puede limitar su uso en ciertas aplicaciones de soldadura.



*Ilustración 2 Enlaces químicos - Termoplásticos*

### 2.5.2. Propiedades Clave para la Soldadura Plástica

- **Transferencia de Calor:** La eficiencia con la que un material polimérico conduce y absorbe calor es crítica para su soldabilidad. Una conductividad térmica uniforme asegura una distribución homogénea del calor, crucial para alcanzar el **límite termoplástico** de forma controlada sin degradar el material, para el caso de estudio

se deben considerar la convección y conducción como principales medios de propagación de calor.

- **Zona Afectada por Calor (ZAC):** Durante la soldadura, solo una región específica del material debe ser suavizada o fundida para formar la unión, minimizando las alteraciones en las propiedades mecánicas y químicas del material fuera de esta zona. La gestión efectiva de la ZAC es esencial para mantener la integridad estructural del objeto final.

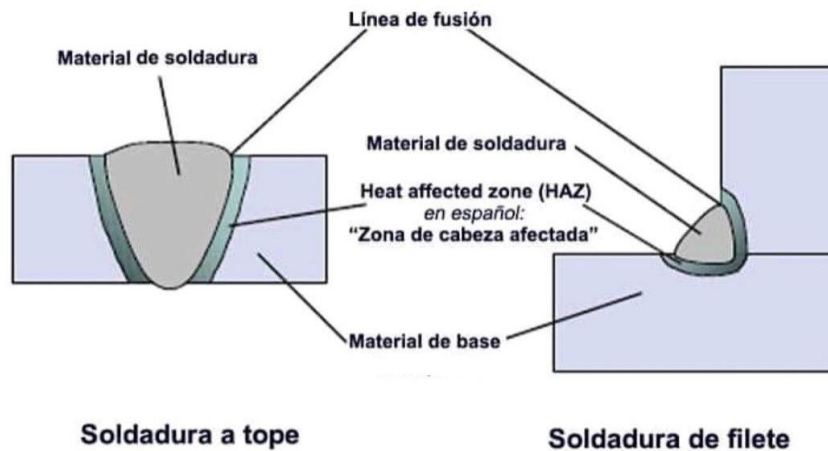


Ilustración 3 Zona afectada por calor

- **Límite Termoplástico:** Se refiere a la temperatura a la cual un termoplástico transita de un estado sólido a un estado maleable o líquido, permitiendo la soldadura. Una comprensión precisa del límite termoplástico es fundamental para aplicar la cantidad correcta de calor, evitando la degradación térmica del material.

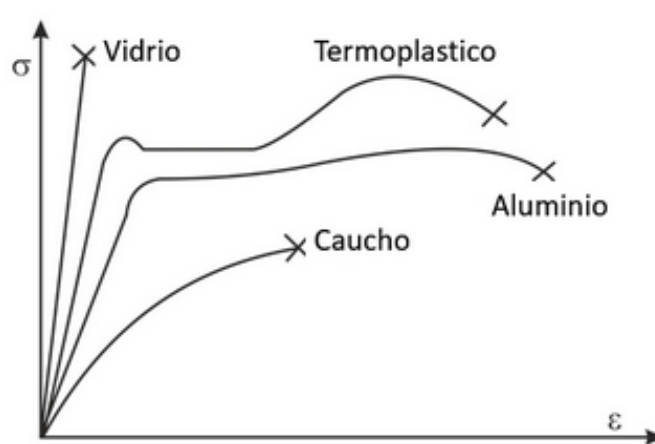


Ilustración 4 Diagrama de tracción

### 2.5.3. Termoplásticos Recomendados para Soldadura Plástica

Teniendo en cuenta estos criterios, varios termoplásticos destacan por su adecuación a la soldadura plástica, incluyendo:

- **Ácido Poliláctico (PLA):** Este bioplástico se funde a temperaturas relativamente bajas, generalmente entre 150°C y 170°C. Empieza a perder propiedades y degradarse a temperaturas superiores a 200°C, lo que requiere una gestión cuidadosa del calor durante la soldadura para evitar la degradación térmica.
- **Polietileno (PE):** Dependiendo de la densidad, el PE de baja densidad (LDPE) tiene un punto de fusión aproximado entre 105°C y 115°C, mientras que el PE de alta densidad (HDPE) se funde entre 120°C y 130°C. La degradación térmica comienza a ocurrir a temperaturas superiores a 150°C para LDPE y 160°C para HDPE, lo que destaca la importancia de controlar la exposición al calor durante la soldadura.
- **Polipropileno (PP):** Este termoplástico se funde en un rango de 160°C a 170°C, con una degradación térmica que comienza a partir de 180°C. Su resistencia química y mecánica, combinada con su capacidad para soldarse eficientemente dentro de este rango de temperatura, lo hacen ideal para una variedad de aplicaciones.
- **Policloruro de Vinilo (PVC):** El PVC típicamente se funde entre 160°C y 210°C, dependiendo de si es rígido o flexible. La degradación térmica y la liberación de ácido clorhídrico pueden comenzar a temperaturas superiores a 240°C, lo que requiere una ventilación adecuada y control preciso de la temperatura durante la soldadura.
- **Poliestireno (PS):** Se funde en un rango de 100°C a 120°C, y la degradación térmica comienza a temperaturas superiores a 230°C. Su facilidad de moldeo y soldadura debe equilibrarse con precaución debido a su relativa fragilidad a temperaturas ambiente bajas.
- **Nylon (Poliamida):** Los diferentes tipos de nylon tienen puntos de fusión que pueden variar significativamente, pero generalmente se encuentran en el rango de 190°C a 265°C. La degradación térmica comienza a temperaturas superiores a 300°C. Considerando su absorción de humedad, es crucial secar previamente el nylon antes de la soldadura para evitar la degradación y asegurar una unión sólida.

La selección de un polímero adecuado para soldadura plástica debe basarse en un balance entre su comportamiento térmico, mecánico y las necesidades específicas de la aplicación. La comprensión detallada de estas propiedades asegura la creación de uniones duraderas y eficaces, maximizando la funcionalidad y vida útil del producto final, sin embargo, tomando en cuenta los parámetros de temperatura anteriormente expresados, se debe tomar en consideración el uso de PLA, PE o PP.

## **2.6. Aplicaciones y casos de estudio**

Dado el contexto actual de la soldadura en polímeros es que se observa un creciente interés de diferentes industrias en adoptar el uso de este método en versiones más económicas, ofreciendo tanto beneficios económicos como ambientales. A continuación, se presentan las principales cuatro industrias que han implementado en las últimas décadas el uso de la soldadura con polímeros, con el fin de poder contrastar el uso real que se le da en la industria y de este modo obtener métodos acordes o similares que permitan realizar uniones de buena

calidad y que entreguen una ventaja competitiva en cuanto a ámbitos económicos y ambientales.

### 2.6.1. Industria del Embalaje

Aplicación de *Soldadura ultrasónica* para cerrar envases de alimentos.

Caso de Estudio:

Empresas de envasado de alimentos han adoptado la soldadura ultrasónica para sellar envases, reemplazando métodos tradicionales que requerían adhesivos o calor aplicado de manera más general. Este cambio ha permitido una mayor velocidad de producción y un sellado más confiable, asegurando la integridad del empaque y la frescura del producto.

Beneficios:

- **Económicos:** Reducción de costos por eliminación de adhesivos y disminución en el consumo energético.
- **Ambientales:** Menor generación de residuos gracias a la eliminación de adhesivos y la posibilidad de utilizar materiales más reciclables.

### 2.6.2. Industria Automotriz

Aplicación de Uniones de componentes plásticos en el interior de vehículos mediante soldadura por aire caliente, por fricción y por contacto.

Caso de Estudio:

Fabricantes de automóviles han implementado soldadura plástica para ensamblar tableros, paneles de puerta y otros componentes internos. La soldadura por fricción, por ejemplo, se ha utilizado para unir partes complejas con mínima deformación, manteniendo la estética y la funcionalidad, por otro lado, la soldadura por contacto permite reparar piezas rotas o trizadas por impactos, siempre y cuando no presenten deformación plástica.

Beneficios:

- **Económicos:** Mejora en la eficiencia del ensamblaje y reducción en el tiempo de producción.
- **Ambientales:** Uso eficiente de materiales y reducción de la necesidad de fijaciones metálicas, facilitando el reciclaje de componentes al final de su vida útil, al mismo tiempo permite extender la vida útil.

### 2.6.3. Industria de Productos de Consumo

Aplicación centrada en fabricación de juguetes de plástico utilizando soldadura ultrasónica y soldadura por contacto.

Caso de Estudio:

Empresas de juguetes han adoptado soldadura ultrasónica y la soldadura por contacto para unir partes plásticas de juguetes, asegurando uniones fuertes y duraderas que cumplen con las estrictas normas de seguridad para niños.

Beneficios:

- **Económicos:** Reducción en el tiempo de producción y aumento en la seguridad y durabilidad del producto, lo que reduce las devoluciones y mejora la satisfacción del cliente.
- **Ambientales:** Menos desperdicio de material y posibilidad de utilizar plásticos reciclados o biodegradables en la producción.

#### 2.6.4. Industria Médica

Aplicación de soldadura por láser de dispositivos médicos desechables, como tubos y bolsas para soluciones.

Caso de Estudio:

La fabricación de componentes médicos desechables ha integrado la soldadura láser para unir piezas de manera precisa, manteniendo la esterilidad y cumpliendo con altos estándares de calidad.

Beneficios:

- **Económicos:** Eficiencia en la producción y reducción de defectos, lo que minimiza el desperdicio y mejora el rendimiento de producción.
- **Ambientales:** La precisión de la soldadura láser reduce el exceso de material y permite el uso de plásticos compatibles con políticas de gestión de residuos hospitalarios.

Como queda expuesto, la soldadura plástica además de un beneficio económico ofrece un beneficio ambiental que puede dar paso a una ventaja competitiva a implementar en los procesos de diferentes industrias de mediana y baja escala.

## 3. Prototipado de soldadura plástica a menor escala

### 3.1. Teoría y consideraciones

#### 3.1.1. Soldadura teórica

La soldadura teórica involucra un proceso utilizado para unir dos piezas de material termoplástico. Sin embargo, a diferencia de trabajar con materiales metálicos que generalmente implica la fusión de los materiales base con o sin material de aporte, la soldadura para materiales plásticos se basa en la aplicación de calor focalizado, y en algunos casos, presión, siendo estos parámetros los principales que se deben tener en cuenta para lograr una unión efectiva entre los mismos.

A diferencia de la soldadura tradicional es necesario cuidar la zona afectada por calor, dado que un mal manejo de la temperatura puede arruinar la calidad superficial, además de quemarlo, lo que induce a una alteración en sus propiedades mecánicas.

Tomando en cuenta lo anterior es necesario contar con una fuente de calor semi/controlada en conjunto con herramientas que permitan realizar presión. Actualmente los equipos industriales cuentan con fuentes de calor como aire caliente, ultrasonidos, láseres específicos para cada plástico, o herramientas de soldadura por fricción diseñadas para plásticos.

Por seguridad, también es necesario contar con ventilación en el área de trabajo, para evitar inhalar gases nocivos (dependiendo del tipo de plástico).

El tipo de unión establece si existe la necesidad de añadido de material o no. Para los casos a estudiar se define la necesidad de abordar ambos casos, es decir el realizar soldadura plástica con añadido de material y sin añadido de material (fundido de material superficial).

### 3.1.2. Selección del material de trabajo

Para poder realizar soldaduras estándar, se utilizará el PLA como material base de estudios, de este modo, las siguientes pruebas se realizarán con dicho material.

Como se menciona anteriormente el Ácido Poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés) es un polímero termoplástico alifático derivado de fuentes renovables, como el almidón de maíz, la caña de azúcar, o la tapioca. Es uno de los materiales biodegradables más populares utilizados en la fabricación de plásticos biobasados y es ampliamente conocido por su uso en la impresión 3D, el embalaje, y en aplicaciones médicas, entre otros.

Propiedades Mecánicas y térmicas	
Punto de fusión	205 - 230 °C
Punto de reblandecimiento	50 °C
Dureza (según Rockwell)	R70-R90
Alargamiento relativo en el descanso	3.8%
Resistencia a la flexión	55,3 [MPa]
Resistencia a la tracción	57,8 [MPa]
Módulo elástico a tensión	3,3 [GPa]
Módulo de elasticidad a la flexión	2,3 [GPa]
Temperatura de transición vítrea	60 - 65 °C
Densidad	1,23-1,25 [g/cm <sup>3</sup> ]

Tabla 1 Propiedades Mecánicas y térmicas PLA

### 3.2. Métodos de soldadura

Se definen tres métodos alternativos a los métodos tradicionales de soldadura plástica, considerando una inversión de capital menor para obtener resultados y evaluar la factibilidad de cada uno en base al análisis cualitativo y cuantitativo del desempeño en cada una de las uniones.

### 3.2.1. Método basado en Pistola de Calor & accesorios

#### Equipo y accesorios

La Pistola de Calor EINHELL TE-HA 2000E es un dispositivo eléctrico diseñado para aplicaciones que requieren la transferencia de calor controlada hacia materiales específicos, tales como termoplásticos, para procesos como la eliminación de pintura, o el moldeado y doblado de materiales. Este instrumento opera mediante la conversión de energía eléctrica en energía térmica, utilizando un elemento calefactor interno que calienta el aire circundante, el cual es luego dirigido hacia el material objetivo a través de una boquilla.



*Ilustración 5 Pistola de Calor & Accesorios*

La TE-HA 2000E se caracteriza por su capacidad de ofrecer un control preciso de la temperatura, que puede ser ajustada entre un rango que generalmente abarca desde temperatura ambiente hasta aproximadamente 550°C. Este rango permite la adaptación óptima a la temperatura de fusión específica de diferentes polímeros, asegurando la minimización del riesgo de degradación térmica del material debido a un exceso de calor.

El control de flujo de aire es también una característica destacada, permitiendo ajustar el volumen de aire que pasa a través de la pistola. Esta capacidad es esencial para manejar la zona afectada por calor, asegurando que el área de material que experimenta elevación térmica sea confinada estrictamente a la región deseada para la fusión o reformado, y minimizando la influencia térmica en las áreas circundantes que deben permanecer intactas.

Los parámetros semi-controlables corresponden a la cantidad flujo de aire y la temperatura de este. Sin embargo, es necesario considerar la distancia boquilla-unión que es importante definir para poder suministrar calor de manera uniforme durante el proceso de soldadura. Al mismo tiempo se debe elegir entre las boquillas disponibles, ya que algunas por la misma forma permiten realizar presión en la zona.

Las boquillas disponibles incluyen un cabezal que permite adaptar las boquillas específicas para añadido de material (diámetro máximo 5 mm), algunas incluyen solo el depositador y otras incluyen una extensión que permite moldear superficialmente la unión.



*Ilustración 6 Conjunto de boquilla focal - Pistola de Calor*

#### Procedimiento

1. **Preparación de las Superficies:** Es necesario asegurar que las superficies a unir estén limpias, secas, y libres de contaminantes. Se recomienda el uso de alcohol isopropílico para limpiar la zona en caso de estar contaminada.
2. **Selección de la Boquilla Adecuada:** Se debe escoger entre la boquilla focalizada o la personalizada.
3. **Configuración de la Temperatura:** Se debe ajustar la pistola de calor a la temperatura óptima para el tipo de plástico a soldar (para el caso de estudio es el PLA). Esto es crucial para evitar la degradación del material, lo que implica una alteración en las propiedades mecánicas. Las temperaturas generalmente oscilan entre 150°C y 300°C, dependiendo del tipo de plástico (para el PLA se utilizan temperatura entre 170°C y 210°C).
4. **Calentamiento de las Superficies:** Se debe aplicar calor de manera uniforme a lo largo de la junta, moviendo la pistola de calor de un lado a otro para evitar el sobrecalentamiento en un punto. La distancia entre la boquilla y el material debe ser tal que permita un calentamiento efectivo sin quemar el plástico, al mismo tiempo se debe cuidar la distancia “boquilla – junta”. En este proceso, se debe utilizar solo el flujo base de la pistola de calor, de otro modo se puede calentar demasiado rápida la

superficie y cambiar las propiedades. Se aconseja la utilización de la pistola durante al menos 3 – 4 segundos sobre el inicio de la unión, de este modo se precalienta la zona donde se continuará realizando la unión.

5. **Aplicación del Material de Aporte:** Si se utiliza, el material de aporte compatible debe ser introducido en la junta mientras las superficies aún están calientes. Este material se fundirá y mezclará con los plásticos base, formando la unión al enfriarse. Para ello es necesario ocupar breves segundos la pistola de calor con flujo alto, para poder fundir rápidamente y luego pasar al flujo base para terminar de dar forma o presionar la unión.
6. **Fusión y Presión:** Una vez que el material de aporte está en su lugar, se puede aplicar una presión suave para asegurar una mezcla y adhesión de los materiales. Mientras se esté en el proceso de fusión del material, se debe continuar aplicando calor según sea necesario para mantener el plástico en estado fundido durante este proceso.
7. **Enfriamiento:** Una vez finalizado, es necesario que la unión se enfríe naturalmente al aire. Se debe evitar aplicar agua o aire fríos para acelerar el proceso, ya que esto puede introducir tensiones residuales en la soldadura.
8. **Inspección y Acabado:** Una vez que la unión se ha enfriado y solidificado, inspeccione visualmente la calidad de la soldadura. Puede ser necesario realizar un acabado adicional, como el lijado, para asegurar una superficie lisa y uniforme, en caso de ser necesario.

### 3.2.2. Método basado en el uso de Cautín con boquilla o punta de lápiz

#### Equipo y accesorios

Un cautín tipo lápiz de 80W es una herramienta eléctrica diseñada específicamente para soldar dispositivos electrónicos a una escala menor, que funciona bajo el principio de conversión de energía eléctrica en calor mediante un elemento calefactor resistivo. Este elemento, ubicado en el interior del cautín, se calienta al aplicarle corriente eléctrica, transmitiendo este calor hacia la punta de metal del cautín. La punta, entonces, se utiliza para derretir el material de aporte (como el estaño) en la junta entre dos componentes a soldar, permitiendo su fusión y solidificación al enfriarse, creando así una conexión eléctrica y mecánica sólida entre ellos.



*Ilustración 7 Cautín, boquilla y punta de lápiz*

Este tipo de cautín es particularmente valorado en la ingeniería mecánica y electrónica por su capacidad de alcanzar temperaturas elevadas de manera rápida y precisa, lo que lo hace ideal para trabajar en circuitos impresos, ensamblajes electrónicos, y reparaciones delicadas donde se requiere precisión. Los rangos de temperatura alcanzables varían, pero típicamente este equipo puede operar entre 160°C y 480°C, dependiendo de la marca y el modelo.

El uso de un cautín de 80W sin control de temperatura directo requiere habilidad y experiencia para manejar la herramienta a una temperatura adecuada, basándose en la duración de la aplicación del calor y la naturaleza del trabajo a realizar. La capacidad de manejar este rango de temperatura lo hace adecuado no solo para soldadura de metales sino también para la soldadura plástica, donde controlar el calor aplicado es crucial para evitar dañar los componentes.

Para la soldadura plástica, el cautín puede ser utilizado tanto con boquilla como sin ella, y con o sin añadido de material, dependiendo del tipo de plástico y la naturaleza de la reparación o conexión a realizar. El proceso varía ligeramente en función de estas variables, pero en general, la secuencia de uso implica la limpieza de la zona a trabajar, el calentamiento del cautín hasta alcanzar una temperatura adecuada para el tipo de plástico, la aplicación del calor de manera controlada para fundir el plástico base o el material de aporte, y finalmente, la unión y solidificación del material para formar una soldadura sólida.

Es necesario establecer rangos de temperatura asociados a tiempo de encendido en el caso de que el cautín en cuestión no cuente con regulación de temperatura. Para tener una mejor comprensión es necesario recordar que para realizar soldadura plástica en PLA, el rango útil corresponde desde los 160°C hasta los 230°C, para asegurar el acondicionamiento, fundición y solidificado del material.

- **30 segundos:** Al cabo de los primeros 30 segundos, el cautín podría alcanzar rápidamente temperaturas en el rango de **150°C a 250°C**. Este rápido ascenso inicial refleja la eficiente conversión de energía eléctrica en calor por el elemento calefactor, aún con mínima disipación térmica al entorno.
- **1 minuto:** Aproximadamente al minuto de haber sido encendido, la temperatura del cautín podría estar en el rango de **200°C a 300°C**. En este punto, la tasa de incremento de temperatura comienza a disminuir a medida que la punta empieza a disipar calor más efectivamente al aire.
- **2 minutos:** Alrededor de los dos minutos, el cautín ya debería haber superado los 300°C por lo que no es del interés de la soldadura plástica analizar desde esta temperatura en adelante.

Por lo tanto, dado el caso del cautín sin regulación de temperatura, para un trabajo continuo de dos minutos de soldadura, es necesario dejar encendido/enchufado el cautín durante al menos 2 minutos. Luego desconectar y dejar pasar 30 segundos antes de comenzar a utilizar.

Como accesorios se dispone de la punta tipo lápiz (hecho de acero, incluido con el cautín) y la boquilla para añadido de material (elaboración manual). Ambos accesorios cuentan con un diámetro de 5/8 de pulgada, para el caso del accesorio elaborado se utilizó un tubería de cobre

de las dimensiones anteriormente mencionadas para aprovechar las propiedades térmicas del material que permiten una mejor conductividad del calor.



*Ilustración 8 Conjunto de boquilla y punta de lápiz*



### 3.2.3. Soldadura sin/con añadido de material

Procedimiento - Cautín con boquilla

#### Preparación

1. **Inspección:** Es necesario verificar que la boquilla de cobre de 3/4 de pulgada de diámetro exterior esté adecuadamente fijada al cautín y que la pequeña abertura esté libre de obstrucciones para el ingreso del plástico.
2. **Limpieza:** Se debe procurar que tanto la boquilla como la superficie plástica a soldar estén limpias y libres de grasa o suciedad.
3. **Calentamiento:** Una vez conectado el cautín a la fuente de energía y alcance la temperatura adecuada para fundir el plástico de aporte sin degradar el material base. Esta temperatura variará según el tipo de plástico, varía de 180°C hasta los 400°C (para el caso del PLA el rango útil es desde los 160°C hasta los 250°C).
4. **Material de aporte:** Es necesario preparar el material de aporte que se va a utilizar para la soldadura, cortando el plástico en tiras o utilizando varillas diseñadas para este propósito (en el caso del PLA, se utilizan varillas de filamento de un largo de 10 [cm] con un diámetro de 1,75 [mm], es decir el PLA comercial).

#### Proceso de Soldadura

1. **Fijar los elementos:** Es necesario realizar puntos de "tacking" o fijación en los extremos de la pieza a soldar para mantenerla en posición durante la soldadura.
2. **Aplicación de calor:** Se debe deslizar la boquilla a lo largo de la unión, aplicando calor de manera uniforme y controlada.
3. **Añadido de material:** Para el añadido de material, se introduce el material de aporte a través de la abertura de la boquilla, asegurando que se funda adecuadamente y se mezcle con el material base para formar una unión homogénea.
4. **Fusión:** Para asegurar la correcta fusión del material es necesario mover el cautín a lo largo de la unión, permitiendo que el plástico de aporte se funda y fluya, llenando el espacio entre las piezas a unir.
5. **Consolidación:** Después de avanzar un tramo, se debe detener el avance para permitir que el material consolidado se enfríe y solidifique, asegurando una unión fuerte.
6. **Inspección:** Durante todo el proceso de soldadura y a medida que se avanza en la unión, es necesario inspeccionar la soldadura para verificar la calidad y la ausencia de burbujas o huecos.

## Posterior a la soldadura

1. **Enfriamiento:** Una vez completada la soldadura, se debe dejar enfriar la unión naturalmente sin aplicar agua o aire frío, ya que esto podría introducir tensiones por enfriamiento no uniforme.
2. **Revisión:** Verifica la solidez de la soldadura aplicando una leve tensión y observando que no haya signos de debilidad o separación.
3. **Limpieza:** Limpia la boquilla del cautín y la superficie soldada para eliminar residuos.

Procedimiento - Cautín con punta

## Preparación

1. **Inspección:** Es necesario verificar que la punta de 3/4 de pulgada de diámetro esté adecuadamente fijada al cautín.
2. **Limpieza:** Se debe procurar que tanto la “punta de lápiz” como la superficie plástica a soldar estén limpias y libres de grasa o suciedad.
3. **Calentamiento:** Una vez conectado el cautín a la fuente de energía y alcance la temperatura adecuada para fundir el plástico de aporte sin degradar el material base. Esta temperatura variará según el tipo de plástico, varía de 180°C hasta los 400°C (para el caso del PLA el rango útil es desde los 160°C hasta los 250°C).
4. **Material de aporte:** En caso de ser necesario el material de aporte, este debe ser preparado previamente, cortando el plástico en tiras o utilizando varillas diseñadas para este propósito en el caso del PLA, se utilizan varillas de filamento de un largo de 10 [cm] con un diámetro de 1,75 [mm], es decir el PLA comercial).



*Ilustración 9 Cautín con punta de lápiz*

## Proceso de Soldadura

1. **Fijar los elementos:** Es necesario realizar puntos de "tacking" o fijación en los extremos de la pieza a soldar para mantenerla en posición durante la soldadura.
2. **Aplicación de calor:** Se debe deslizar la "punta de lápiz" a lo largo de la unión, aplicando calor de manera uniforme y controlada sin ejercer demasiada presión sobre la superficie.
3. **Añadido de material:** Para el añadido de material en caso de ser necesario, se acondiciona acercando el material de aporte hacia la unión, donde finalmente se funde en contacto con el caudín y resto de material, es necesario añadir parcialmente el material para asegurar que se funda adecuadamente y se mezcle con el material base para formar una unión homogénea.
4. **Fusión:** Para asegurar la correcta fusión del material es necesario mover el caudín a lo largo de la unión, permitiendo que el plástico de aporte se funda y fluya, llenando el espacio entre las piezas a unir.
5. **Consolidación:** Después de avanzar un tramo, se debe detener el avance para permitir que el material consolidado se enfríe y solidifique, asegurando una unión fuerte.
6. **Inspección:** Durante todo el proceso de soldadura y a medida que se avanza en la unión, es necesario inspeccionar la soldadura para verificar la calidad y la ausencia de burbujas o huecos.

## Posterior a la soldadura

1. **Enfriamiento:** Una vez completada la soldadura, se debe dejar enfriar la unión naturalmente sin aplicar agua o aire frío, ya que esto podría introducir tensiones por enfriamiento no uniforme.
2. **Revisión:** Verifica la solidez de la soldadura aplicando una leve tensión y observando que no haya signos de debilidad o separación.
3. **Limpieza:** Limpia la "punta de lápiz" del caudín y la superficie soldada para eliminar residuos.

## 3.3. Probetas

### 3.3.1. Norma ASTM D638

Para el desarrollo de ensayos de tracción, antes se debe contar con las diferentes probetas que permitan probar la soldadura plástica de diferentes métodos. Sin embargo, la forma de la probeta se entrega bajo una norma internacional que más se adecue para lo que se busca estudiar, en este caso lo principal a realizar prueba de tracción en plásticos con análisis en parámetros como resistencia a la tracción, desplazamiento, tiempo de ensayo, etc.

La norma ASTM D638 representa un estándar crucial en la industria de los materiales, especialmente en la evaluación de las propiedades mecánicas de los plásticos, incluido el ácido poliláctico (PLA). Este estándar es de particular importancia para la investigación, el estudio y aplicación de la soldadura plástica, ya que permite una evaluación precisa y reproducible de la resistencia y el comportamiento de las uniones soldadas bajo carga de tracción. La elección de ASTM D638 para evaluar las capacidades mecánicas de la soldadura

plástica utilizada para unir probetas de PLA se justifica por varias razones fundamentales que abarcan la estandarización, la comparabilidad, la calidad y el desarrollo de productos.

### **Justificación de la Utilización de ASTM D638**

#### Estándar de Estandarización y Reproducibilidad

La ASTM D638 proporciona un protocolo detallado para la preparación de la muestra, la ejecución del ensayo y la interpretación de los resultados. Esta uniformidad es esencial para garantizar la reproducibilidad de los resultados de los ensayos de tracción, permitiendo comparaciones válidas entre diferentes estudios o tipos de unión.

#### Comparabilidad Internacional

Dado que ASTM D638 es reconocido globalmente, su uso asegura que los resultados de los ensayos sean comparables a nivel internacional. Esto es particularmente valioso en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías de soldadura plástica, ya que permite comparar sus resultados con los estándares globales y facilita la colaboración internacional.

#### Control de Calidad

La aplicación de la norma ASTM D638 en el contexto de la soldadura plástica para PLA es una herramienta poderosa para el control de calidad. Permite a los fabricantes verificar que las uniones soldadas cumplan con los requisitos mecánicos necesarios para su aplicación prevista. Esto es crucial en sectores donde la fiabilidad y la seguridad son prioritarias, como en la industria médica, automotriz y de embalaje.

#### Fomento del Desarrollo e Innovación

El uso de esta norma facilita el desarrollo y la optimización de técnicas de soldadura para el PLA, impulsando la innovación en el campo de los bioplásticos. Al comprender cómo las diferentes variables afectan las propiedades mecánicas de las uniones soldadas, los investigadores pueden innovar en la creación de soldaduras más fuertes y duraderas.

### **Descripción General de la Norma ASTM D638**

La norma ASTM D638 especifica el método para determinar las propiedades de tracción de plásticos mediante probetas estándar sometidas a un ensayo de tracción controlado. Este método abarca aspectos como la preparación de las muestras, la velocidad de ensayo, la maquinaria utilizada y la interpretación de los datos obtenidos, tales como la resistencia a la tracción, el alargamiento y el módulo de elasticidad.

#### Preparación de las Muestras

Las probetas se preparan de acuerdo con las dimensiones y formas especificadas en la norma, lo que permite la uniformidad en los ensayos y facilita la comparación de resultados. En el contexto de la soldadura plástica, esto implica que las uniones soldadas deben formar parte integral de la probeta sometida a tracción.

#### Realización del Ensayo

El ensayo se realiza aplicando una fuerza de tracción axial a la probeta hasta que esta falle. Durante el ensayo, se registran datos que reflejan la resistencia y la deformación del material, proporcionando información valiosa sobre el comportamiento mecánico de la soldadura plástica en el PLA.

### Interpretación de Resultados

Los resultados obtenidos permiten evaluar la calidad de la soldadura plástica, incluyendo su resistencia a la tracción máxima, alargamiento en la ruptura y en algunos casos el punto de fluencia. Estos datos son fundamentales para entender la eficacia de diferentes métodos de soldadura y para optimizar los procesos y métodos desarrollados de soldadura con PLA.

### Consideraciones de la Norma ASTM D638

Velocidad de prueba, la cual viene determinada luego de que se establece el material PLA como rígido/semirrígido. La norma nos entrega en su página 14, una clasificación donde detalla las velocidades según sea el caso del material.

**TABLE 1 Designations for Speed of Testing<sup>a</sup>**

Classification <sup>b</sup>	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain <sup>c</sup> Rate at Start of Test, mm/mm·min (in./in.·min)
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1
		50 (2) ± 10 %	1
	IV	500 (20) ± 10 %	10
		5 (0.2) ± 25 %	0.15
		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15
	V	1 (0.05) ± 25 %	0.1
		10 (0.5) ± 25 %	1
		100 (5) ± 25 %	10
		500 (20) ± 10 %	10
Nonrigid	III	50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
	IV	50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15

Ilustración 10 Tabla 1 Designación de velocidad de prueba - Norma ASTM D638

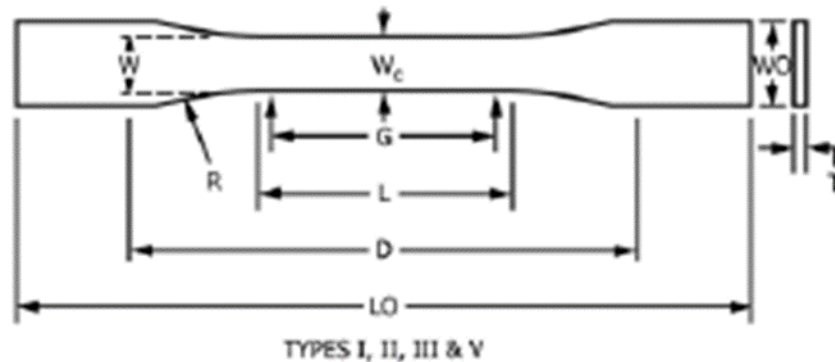
Por lo que para este caso la Ilustración 10, indica que corresponde a una **velocidad de prueba de 5 [mm/min]**.

En cuanto a la forma y dimensiones de la probeta, de la misma manera se utiliza la norma ASTM D638, por lo que finalmente se obtiene que puede ser una probeta tipo I o tipo III.

Specimen Dimensions for Thickness, T, mm (in.)<sup>a</sup>

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under			Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), Incl		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV <sup>b</sup>	Type V <sup>c,d</sup>	
W—Width of narrow section <sup>e,f</sup>	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) <sup>g,h</sup>
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02) <sup>c</sup>
WO—Width overall, min <sup>g</sup>	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+6.4 (+0.25)
WO—Width overall, min <sup>g</sup>	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+3.18 (+0.125)
LO—Length overall, min <sup>h</sup>	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G—Gage length <sup>i</sup>	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) <sup>c</sup>
G—Gage length <sup>i</sup>	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) <sup>j</sup>	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) <sup>c</sup>
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)

Dado que en ambos casos sirven para plásticos rígidos/semirrígidos, además de aquello, comparten las dimensiones de la zona donde se efectúa la prueba.

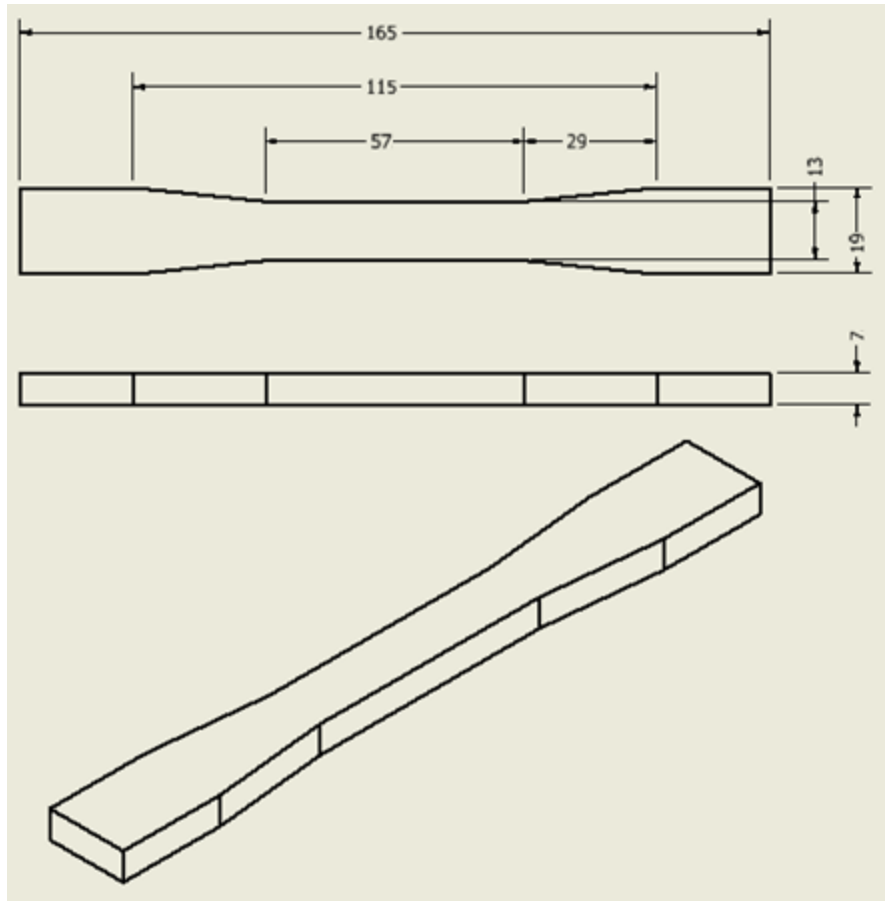


*Ilustración 11 Cotas dimensionales para probetas tipo I, II, III, V*

Como se aprecia, teniendo dos opciones, se opta por realizar una combinación (optimizando el uso de material sin perjudicar el ensayo) dejando como base principal la probeta tipo III y solo conservando el largo total de la probeta tipo I. La justificación está en que se optaría por la probeta tipo I sin embargo el espesor máximo de la misma es de 3 [mm] por lo que al intentar realizar la soldadura es probable que se penetre la zona demasiado rápido quemando el material. Al mismo tiempo la zona afectada porcentualmente es mayor si se utiliza un bajo espesor. Por otro lado, el largo de la probeta tipo III es excesivo considerando que las mordazas planas no cambian el agarre de la probeta y la zona de interés donde ocurren los fenómenos del ensayo dimensionalmente es la misma.

De este modo se conserva el largo máximo como 165 [mm] y las demás características son exactamente iguales a las probetas del tipo III, con un espesor de probeta igual a 7 [mm].

La elección del Tipo 3 de probeta según la norma ASTM D638 para ensayos de tracción en materiales como el PLA se basa en características específicas que hacen que esta selección sea adecuada para evaluar las propiedades mecánicas del material. La norma ASTM D638 describe varios tipos de probetas, cada uno con dimensiones y formas diseñadas para aplicaciones específicas o características del material. La probeta Tipo 3 es una de las más comunes utilizadas en ensayos de tracción para plásticos, y sus características están diseñadas para proporcionar una medición precisa y fiable de las propiedades de tracción del material.



*Ilustración 12 Cotas dimensionales Probeta de prueba - Norma D638*

### **Razones para la Selección del Tipo 3 para PLA**

- **Sensibilidad a la Deformación:** El PLA, al ser un termoplástico biodegradable, puede tener un rango específico de propiedades mecánicas que incluyen sensibilidad a la velocidad de deformación y temperatura. La forma y dimensiones de la probeta Tipo 3 permiten un control más preciso de las condiciones de ensayo, lo cual es crucial para obtener resultados representativos y reproducibles para el PLA.
- **Representatividad de las Propiedades Mecánicas:** Dado que el PLA se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, desde empaques hasta aplicaciones biomédicas y de impresión 3D, es fundamental evaluar sus propiedades mecánicas de manera precisa. La probeta Tipo 3, con su diseño estandarizado y sus dimensiones específicas, proporciona una base sólida para evaluar la resistencia a la tracción y el alargamiento en la ruptura, lo cual es esencial para el diseño y la selección de materiales en estas aplicaciones.
- **Uniformidad en la Aplicación de Cargas:** La geometría de la probeta Tipo 3 asegura que la carga aplicada durante el ensayo sea uniforme a lo largo de la zona de medición. Esto es particularmente importante para materiales como el PLA, donde la

distribución uniforme de la carga es crucial para evaluar con precisión el comportamiento mecánico del material y la calidad de las uniones soldadas.

Requisitos de acondicionamiento y condiciones ambientales definidos en ASTM D638

El cumplimiento de los requisitos de acondicionamiento y de las condiciones ambientales establecidos en relación con la temperatura y la humedad del aire es de especial importancia para la comparabilidad de los resultados del ensayo.

Los tiempos definidos para el acondicionamiento se encuentran generalmente en las normas del material plástico a ensayar. Además, en el marco del ensayo de materiales de moldeo, las probetas deberán almacenarse al menos durante **16 horas en un clima normalizado**.

- ✓ Las probetas se mantuvieron almacenadas en condiciones normalizadas a 18 °C selladas en una bolsa al vacío con bolsitas de Silica gel, permitiendo absorber la humedad y evitar que se dañe o alteren las probetas.

Si los ensayos se llevan a cabo en un clima normalizado, se refiere a un clima estandarizado especificado en la norma ASTM D618.

Clima templado:	23	±	2	°C
Clima subtropical:	27 ± 2 °C			

- ✓ Los días de ensayo (22, 23 y 25 de Enero 2024) las condiciones ambientales eran normales entre 16 °C y 19°C.

### 3.3.2. Diseño y Producción de las probetas

Una vez dimensionada la probeta, se define que la producción se efectuara con la ayuda de la impresión 3D, esto dado que el PLA es uno de los más utilizados en la impresión y al mismo tiempo es el material bajo el cual se formaron los métodos descritos en este trabajo, es barato, ofrece un punto de fusión a temperaturas interesantes para la soldadura plástica, entre otros atributos.

Para realizar comparación entre las probetas soldadas bajo el mismo método (en cada caso), se define necesario realizar una cantidad mínima de 3 ensayos por cada método en las uniones que se involucre la “Unión en V” y “Unión en traslapo con esfuerzo combinado”, además de la realización de 3 ensayos con los dos métodos que involucran el Cautín en la “Unión en traslape”. Al mismo tiempo es necesario realizar un primer ensayo que involucre una probeta completa (sin soldadura añadida), de este modo, se obtiene una representación del comportamiento del material base bajo el ensayo de tracción. Finalmente se requiere un total de 25 probetas, de las cuales se debe otorgar una forma que permita probar la soldadura, la penetración y eficacia del añadido de material en diferentes tipos de unión.

Con la cantidad de probetas definida se procede a la modificación de las geometrías, para que permitan realizar las uniones soldadas. Las modificaciones pertinentes se guardan en el archivo de inventor, el cual se encarga de acondicionar para transformarlo en archivo(.stl), siendo este el tipo de archivo que reciben la mayoría de software dedicados a la impresión 3D, en este caso PrusaSlicer 2.7.1.

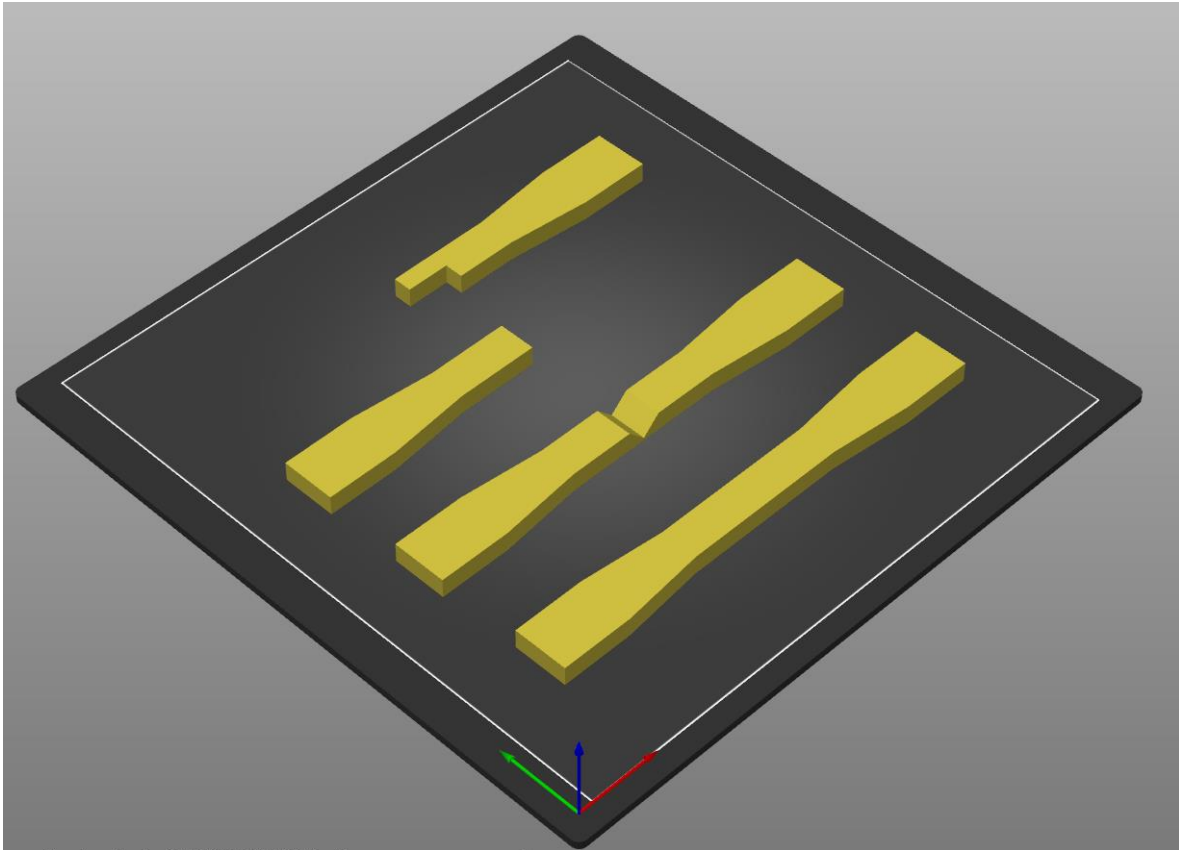


Ilustración 13 Conjunto de probetas para diferentes tipo de uniones - Norma D638

Parámetros e información de producción	
Impresora	Creality Ender 3Neo v2
Material	PLA
Temperatura cabezal	205 °C
Cama templada	60 °C
Cabezal	0,4 [mm]
Altura primera capa	0,15 [mm]
Altura de capa	0,2 [mm]
Relleno	90 %
Perímetros	3
Velocidad perímetros	40 [mm/s]
Velocidad rellenos	40 [mm/s]
Velocidad relleno sólido	40 [mm/s]
Tiempo promedio de impresión c/probeta	105 – 110 [min]
Peso promedio de probeta completa	22 – 24 [gr]

Tabla 2 Parámetros de impresión 3D

## 4. Pruebas de soldadura

### 4.1. Equipo utilizado

La realización del ensayo depende de la utilización de un equipo de tracción con mordazas planas, dada la configuración inicial de las probetas seleccionadas e impresas. Finalmente se realizan los ensayos en el LTMEC con la asistencia de los docentes para la utilización del equipo Instron Ttcn-10 el cual, por medio de un software asociado al equipo, permite extraer los parámetros necesarios para poder evaluar la resistencia a la tracción de las uniones que se generaron a partir de la soldadura plástica.



*Ilustración 14 Equipo para ensayos de tracción Instron TTCN - 10*

Para realizar un posterior análisis cuantitativo, debemos definir los parámetros más importantes que estén involucrados dentro de los ensayos a realizar, establecer las unidades de medida de cada uno de ellos para tener logar un mejor entendimiento analítico posteriormente.

## 4.2. Consideraciones

Para tener un concepto preciso de lo que se quiere analizar, se debe recordar la ley de Hooke y el módulo de Young, dos conceptos que se logran apreciar mejor en los gráficos de esfuerzo-deformación. La importancia de estos conceptos radica en que se está analizando un material definido como “rígido”, con un comportamiento que se presume en un principio elástico y posteriormente uno plástico antes de llegar a la fractura.

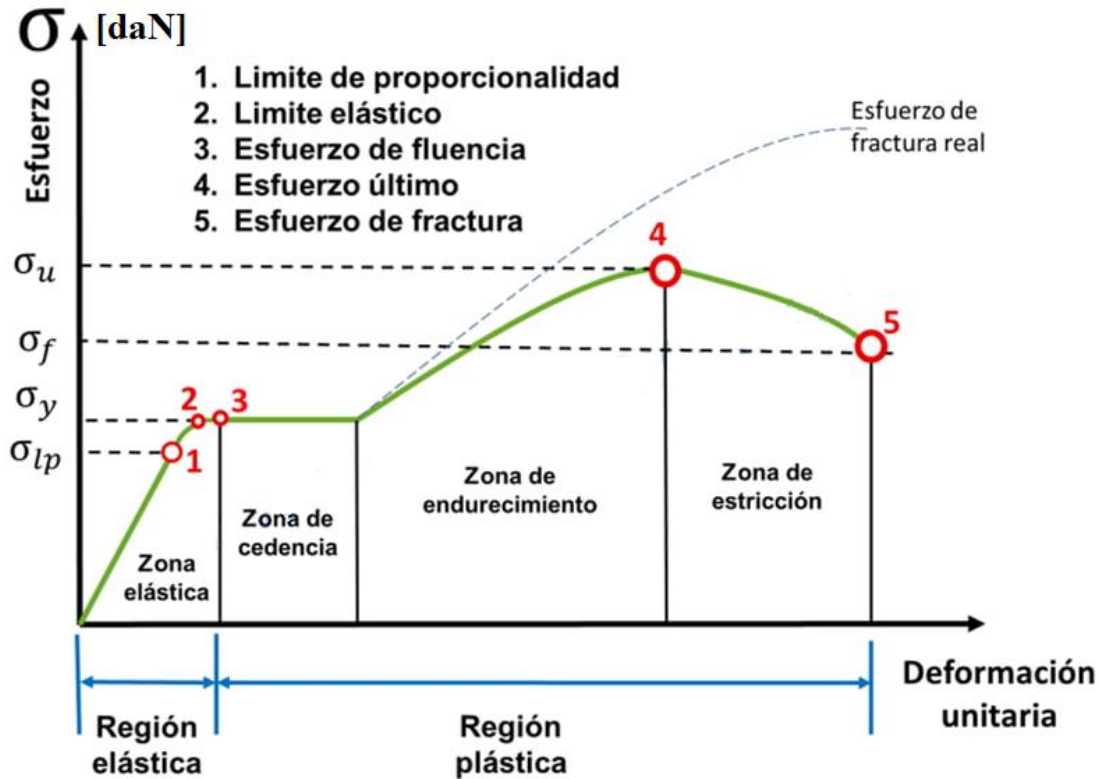


Ilustración 15 Gráfico Esfuerzo v/s Deformación

Parámetros entregados

Fuerza máxima ( $\sigma_u$ )

La fuerza máxima se refiere al valor más alto de carga o tensión que una muestra puede soportar antes de fallar o romperse durante un ensayo de tracción. Este parámetro es crucial para determinar la resistencia a la tracción de la unión soldada, ya que indica la capacidad máxima de la unión para resistir esfuerzos externos sin experimentar una fractura. La fuerza máxima entregada por el equipo esta medida en decanewtons [daN] y proporciona una medida directa de la resistencia mecánica de la unión bajo condiciones controladas de tracción.

Desplazamiento

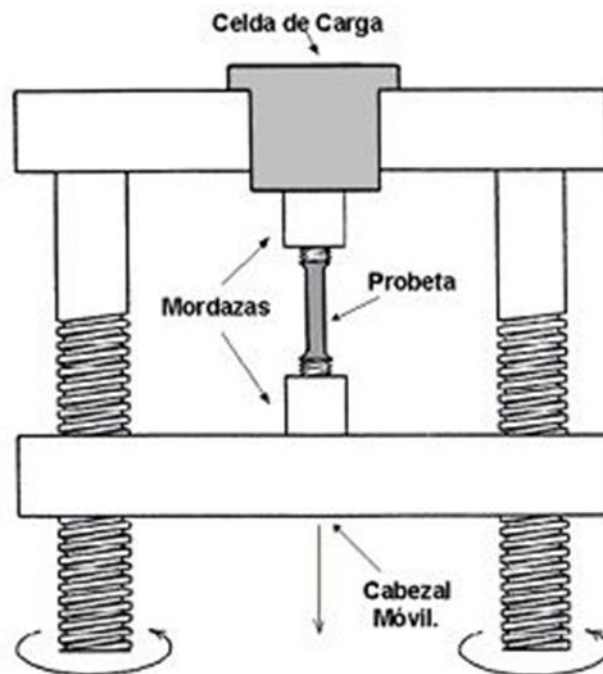
El desplazamiento máximo antes de la ruptura o falla describe la distancia que se extiende o deforma la muestra desde el inicio del ensayo hasta el momento justo antes de que ocurra la

falla. Este parámetro es un indicador de la deformación que la unión soldada puede soportar bajo carga y es fundamental para entender el comportamiento elástico y plástico del material, en este caso PLA. El desplazamiento se mide generalmente en milímetros (mm) y proporciona información sobre la flexibilidad y la capacidad de elongación de la unión antes de alcanzar su punto de ruptura.

#### Fluencia ( $\sigma_{y3}$ )

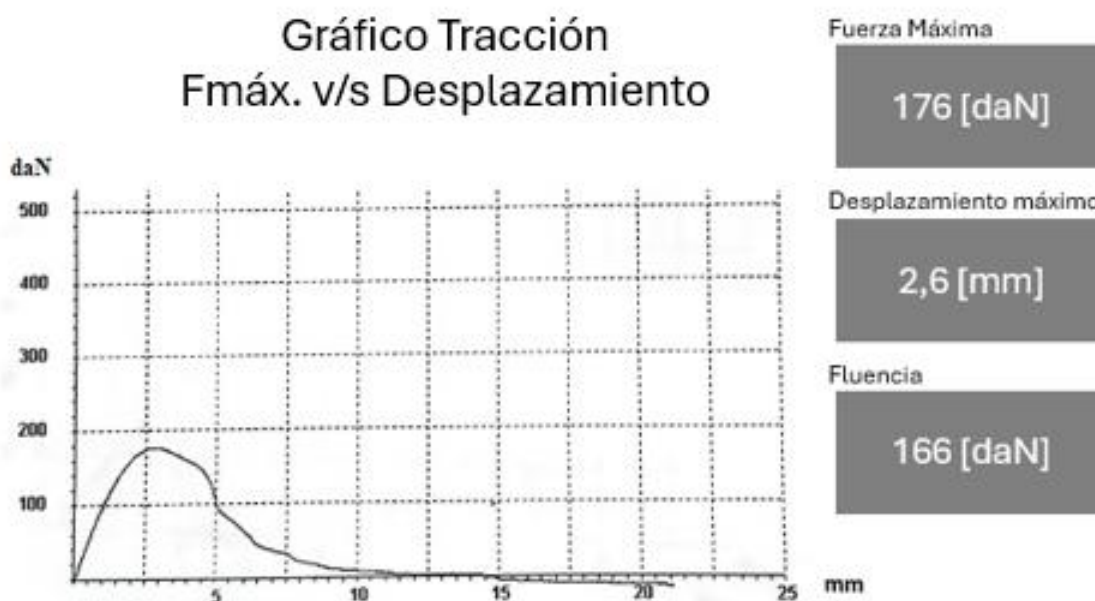
El punto de fluencia se define como la tensión en la cual un material pasa de un comportamiento elástico a un comportamiento plástico, indicando el inicio de la deformación permanente bajo una carga constante. El equipo a utilizar nos entrega este parámetro en decanewtons [daN] para efectos de comparar la cantidad máxima de fuerza antes de cambiar su comportamiento.

Para comenzar con los ensayos previamente se montan las mordazas planas las cuales van a permitir sujetar correctamente ambos extremos de la probeta. Una vez encendido el equipo, se posiciona la probeta en el entorno de ensayo, siendo esta sujeta por ambos extremos. Finalmente se deben seleccionar parámetros y rellenar información básica en el software del equipo, tales como magnitud del escalado, velocidad de avance, largo inicial y otros datos de ensayo. Una vez definido los parámetros importantes se da inicio al ensayo de tracción, en esta primera instancia, de la probeta solidada al 90% de PLA sin uniones generadas (obteniendo así un punto de referencia para futuras comparaciones).



*Ilustración 16 Ensamble y funcionamiento*

### 4.3. Ensayo tracción probeta normal



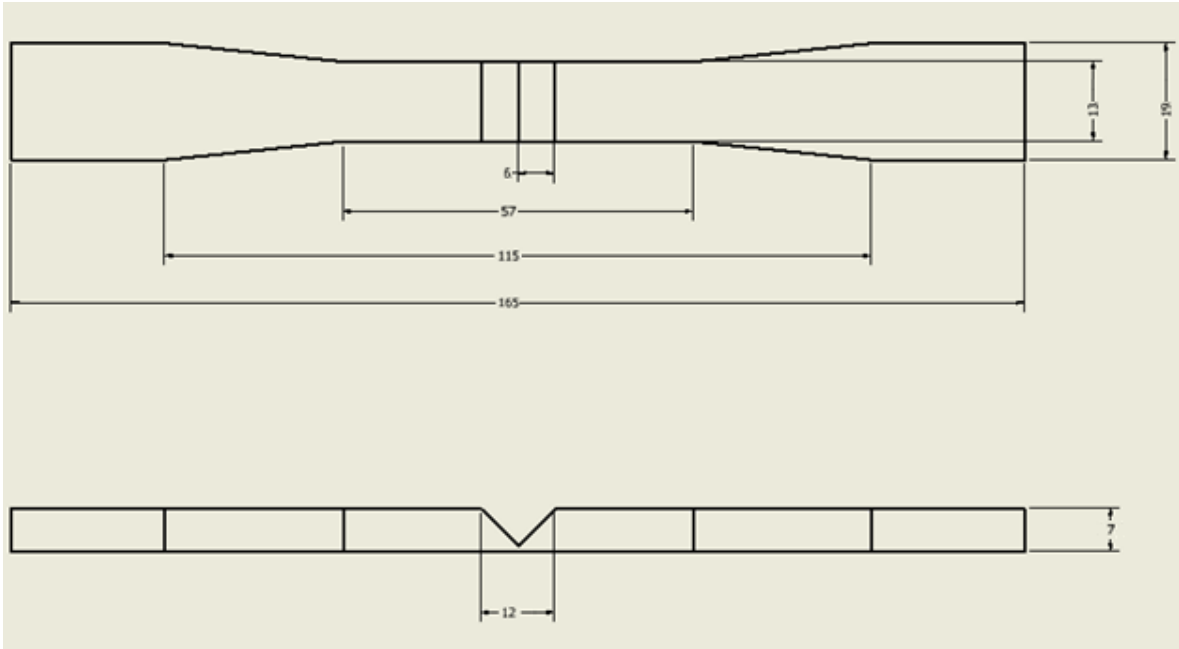
*Ilustración 17 Gráfico Ensayo de tracción - Probeta de prueba*

Como se observa, la probeta de PLA en cuestión alcanza una fuerza máxima de 176 [daN], la cual fue alcanzada cuando el desplazamiento tenía un valor de 2,6 [mm], con una fluencia de  $\sigma_{y3} = 166$  [daN]. Sin embargo, del gráfico se extrae más información, tal como que el desplazamiento total fue de un poco más de 20 [mm] y tuvo una deformación elástica hasta que alcanza el valor de  $\sigma_u = 176$  [daN], pasado dicho punto se comporta de manera plástica, la curva describe una rápida transición desde la zona de endurecimiento a la zona de estricción, donde finalmente decae la curva, siendo explicado por una elongación del material bajo cada vez menos tensión, hasta llegar al desplazamiento total donde se da por finalizado el ensayo de tracción.

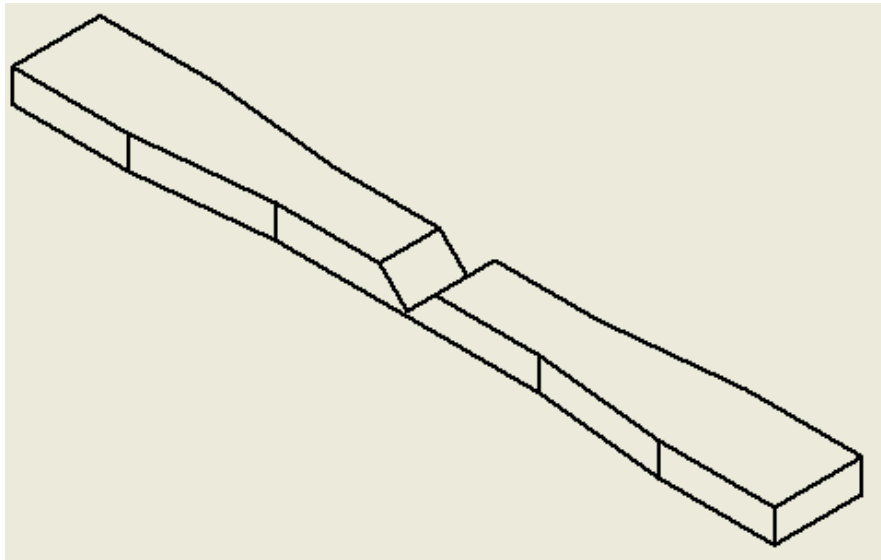
Teniendo los resultados base, se realizarán ensayos con dos diferentes tipos de uniones, cambiando algunas configuraciones que permitan la aparición de fenómenos visibles que permitan llegar a conclusiones respecto a dichas uniones, el método, la efectividad, etc.

### 4.4 Ensayo de tracción - Unión en V

La soldadura en V es una técnica que se emplea para unir dos piezas mediante la creación de un canal o surco en forma de "V" en los bordes a unir. Este método se puede aplicar tanto en soldadura de materiales metálicos como plásticos y otros materiales, enfocándose en el proceso y la preparación de las piezas más que en el tipo de soldadura en sí (tradicional o plástica).



*Ilustración 18 Dimensiones de Probeta para Unión en V*



*Ilustración 19 Probeta para Unión en V*

Para llevar a cabo la unión, se deben considerar ciertos pasos previos y algunas consideraciones respecto al proceso mismo de soldadura:

#### 4.4.1. Preparación de la Junta

Forma en V: Se preparan los bordes de las piezas a unir, cortándolos en un ángulo específico para formar una V. Este ángulo puede variar según el espesor del material y el tipo de soldadura a aplicar.

Limpieza: Es crucial limpiar bien los bordes a soldar para eliminar contaminantes que puedan afectar la calidad de la soldadura.

#### 4.4.2. Proceso de Soldadura

Aplicación del Calor: Se aplica calor (o energía) en la zona de unión para fundir los materiales en los bordes de la V. En la soldadura plástica empleada, se ocuparán los métodos propuestos anteriormente,

Material de Aporte: En muchos casos, se agrega un material de aporte compatible con los materiales a unir para llenar el surco de la V y facilitar la unión, en este caso se ocupará el mismo PLA que se utilizó para la impresión de las probetas, con el fin de disminuir la brecha entre diferentes materiales según su origen.

Presión: En algunos métodos de soldadura que se proponen, también se aplica presión para mejorar la fusión de los materiales.

Dado que con la soldadura incluida la probeta posee las mismas dimensiones que la primera probeta, se debe realizar el mismo montaje, quedando de este modo alineada y lista para la puesta en marcha de los ensayos (todos los que lleven unión en V).

#### 4.4.3. Ensayo para método con pistola de calor (PCx)

El resultado de los ensayos se expresa de igual manera que el gráfico y parámetros entregados en el de la probeta normal. Sin embargo, para simplificar la lectura de datos, se recopilan los parámetros más importantes para expresar los resultados de una manera más visual a la hora de comparar con la probeta normal.

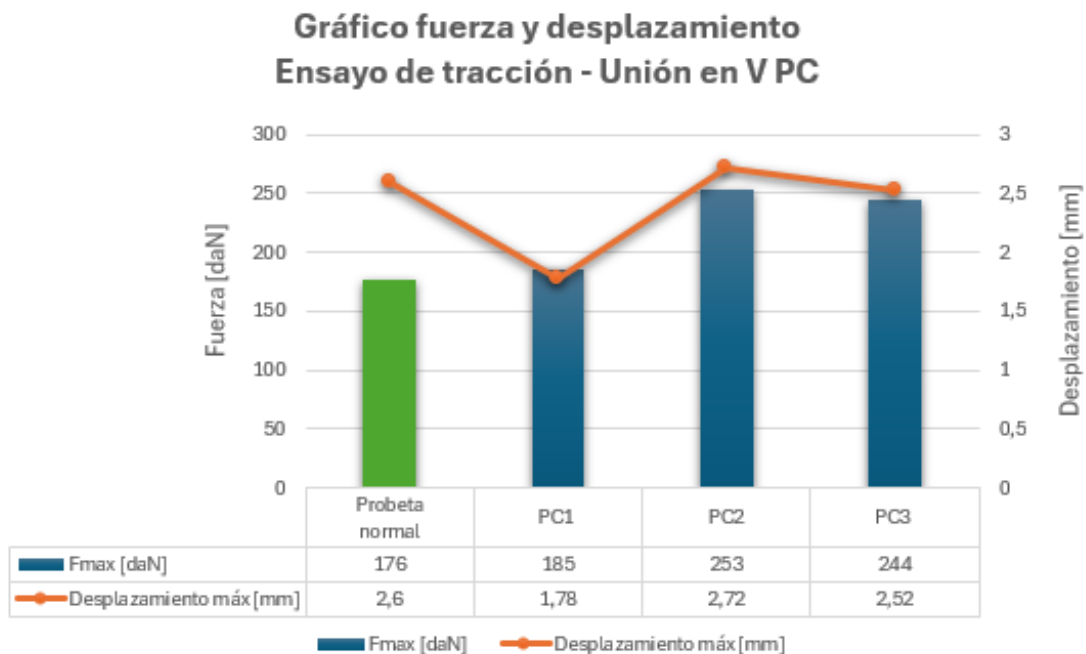
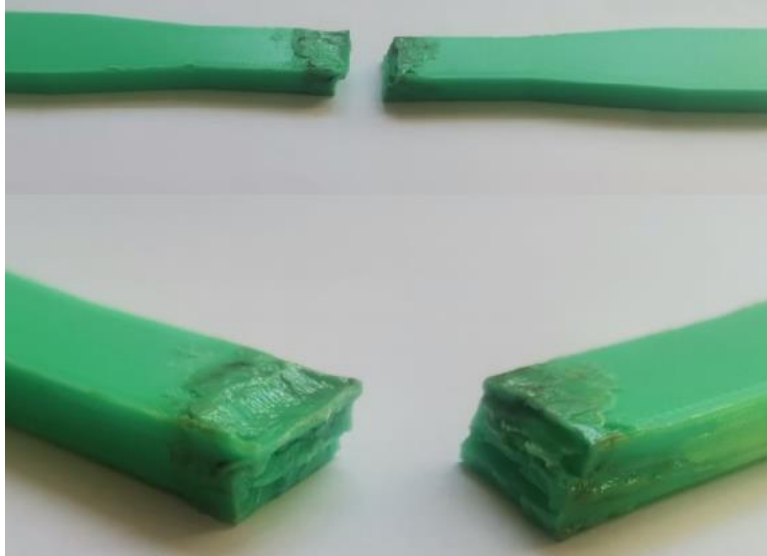


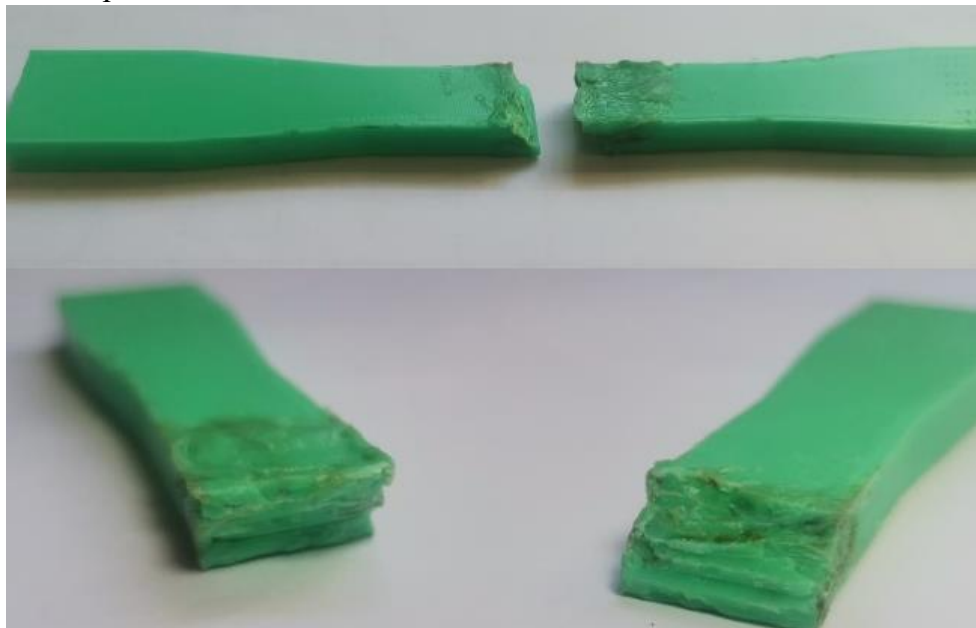
Ilustración 20 Gráfico fuerza y desplazamiento - Ensayo de tracción, Unión en V (PC)

Como se aprecia, las resistencias a la tracción indican que las probetas soldadas con el método basado en la pistola de calor con añadido de material tuvieron una unión fuerte, dejando como resultado una capacidad de soportar hasta 253 [daN] en el caso de la probeta PC2 presentando luego una fractura en la zona de añadido de material, además la unión generada permitió un desplazamiento máximo de 2,72 [mm].



*Ilustración 21 Fractura probeta PC2 - Unión en V*

Cabe destacar que en las probetas PC1 y PC3 presentan una fractura que al analizar indica poca penetración de la soldadura, lo que dificulta una buena mezcla entre el material base y el material de aporte.



*Ilustración 22 Fractura probeta PC1 – Unión en V*

Por otro lado, la calidad superficial indica un chamuscado del material verde, que presentaba tonalidades oscuras, lo que indica que alcanzó la temperatura máxima soportada por el material por la cantidad de tiempo expuesto, distancia boquilla unión o temperatura utilizada.

4.4.4. Ensayo para método con caudín con boquilla (C1x)

Los datos recopilados, se expresan en el gráfico fuerza y desplazamiento, para un análisis visual que permita la comparación con los resultados de la probeta normal.

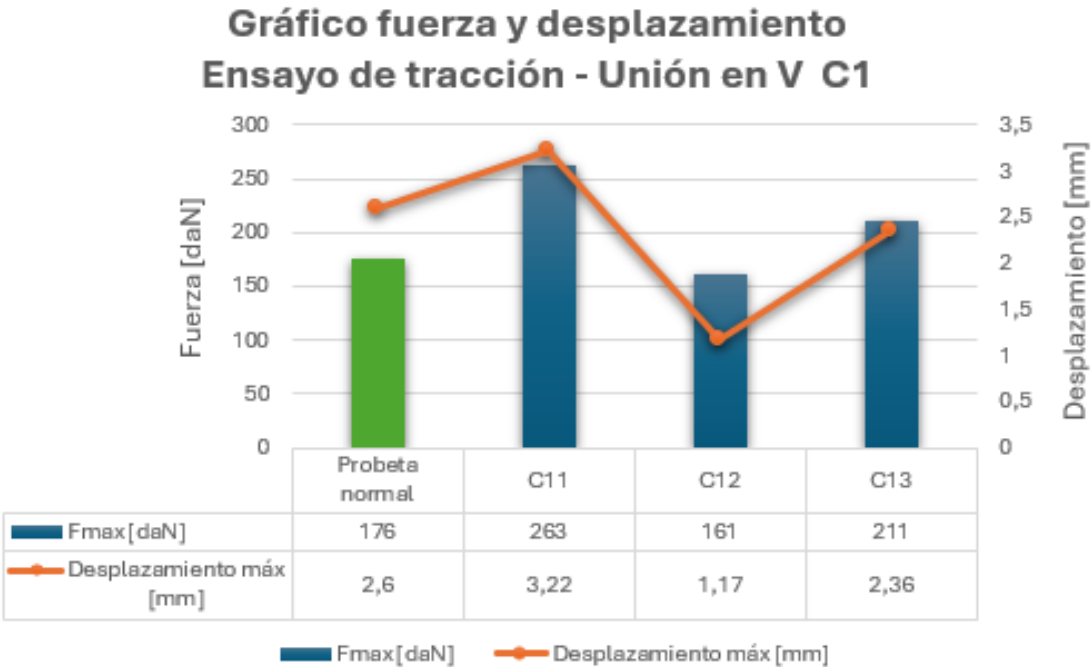


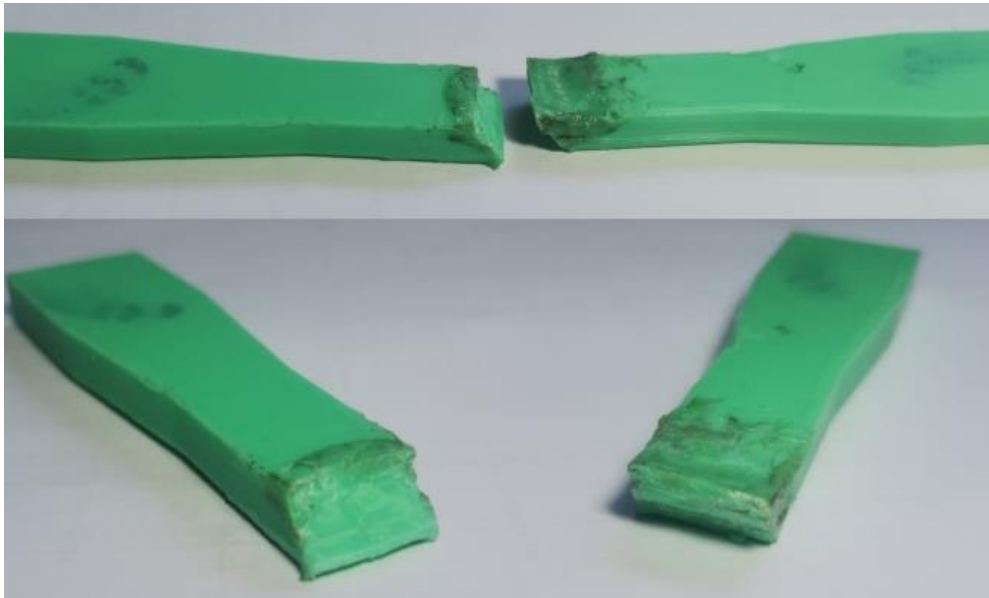
Ilustración 23 Gráfico fuerza y desplazamiento - Ensayo de tracción, Unión en V (C1)

Los resultados obtenidos no muestran tendencias similares. Sin embargo, esto se explica al revisar las uniones y las fracturas en las probetas C12 y C13, en ambos casos, las probetas presentaban espacios vacíos en el interior de la unión, lo cual puede explicarse por la manera en que la boquilla deposita el material.



*Ilustración 24 Fractura probeta C12 - Unión en V*

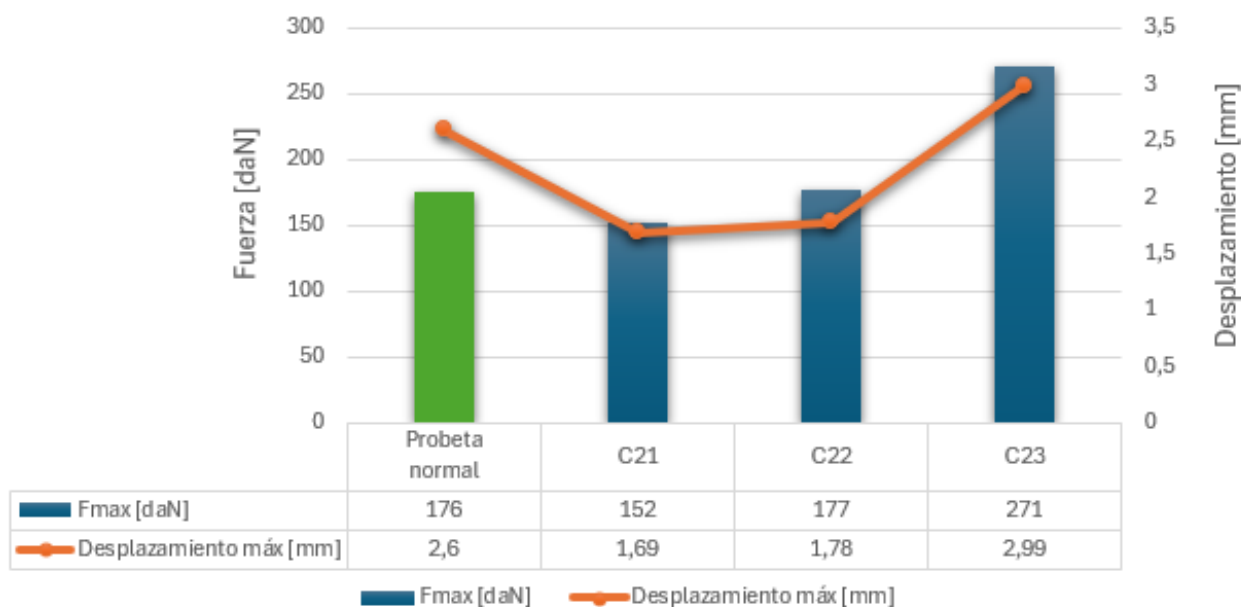
Al mismo tiempo las uniones del método C1 presentan un poco menos de material chamuscado y en el caso C11 y C13 se alcanzó una mayor resistencia a la tracción. Por último, es necesario destacar que la unión C11 alcanzó un desplazamiento máximo de 3,22 [mm] y una resistencia a la tracción máxima de 263 [daN], lo cual indica que hubo una buena unión y que es posible su realización en términos cuantitativos.



*Ilustración 25 Fractura probeta C13 - Unión en V*

#### 4.4.5. Ensayo para método con cautín “punta de lápiz” (C2x)

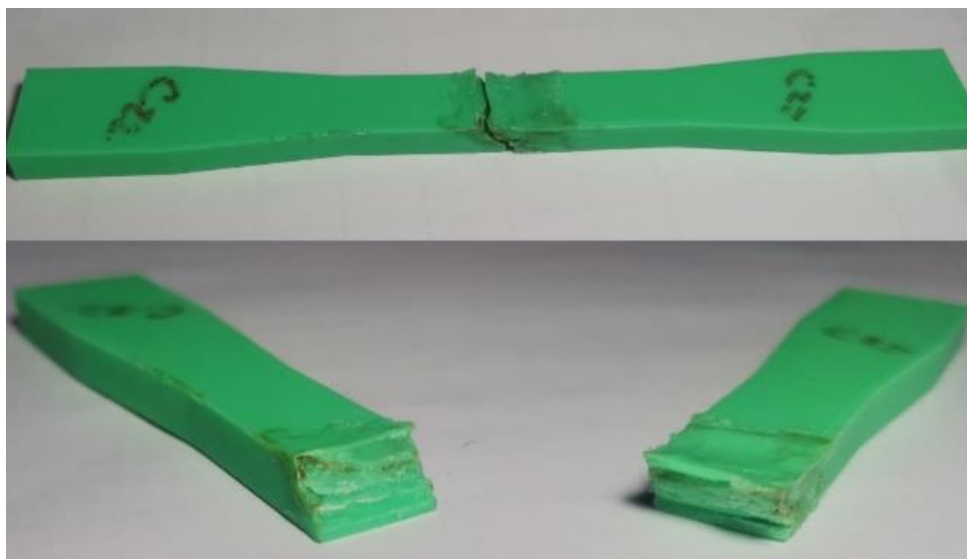
**Gráfico fuerza y desplazamiento  
Ensayo de tracción - Unión en V C2**



*Ilustración 26 Gráfico fuerza y desplazamiento - Ensayo de tracción, Unión en V (C2)*

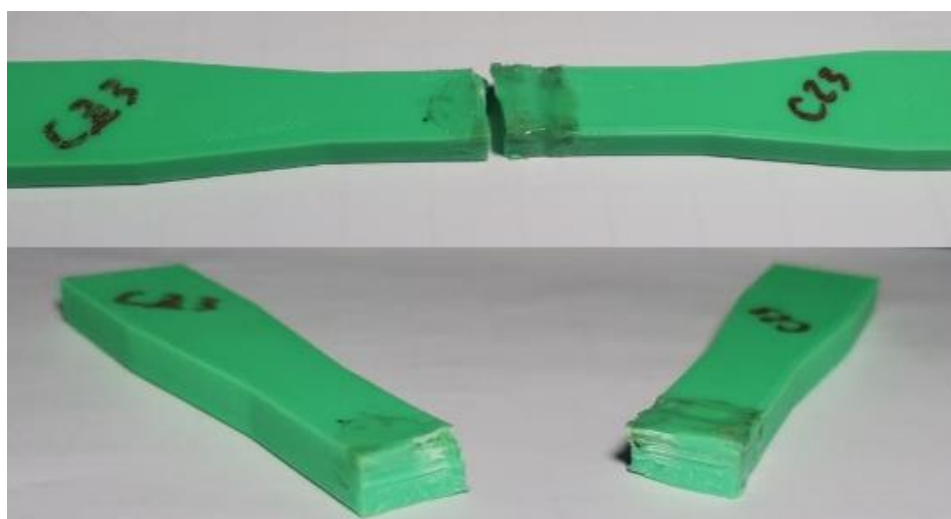
Del gráfico se desprenden diferentes escenarios, lo principal es indicar que C22 y C23 tuvieron resistieron una fuerza máxima mayor a la que resistió la probeta normal, sin embargo, en dos de las tres uniones no se alcanza el desplazamiento máximo que tuvo la probeta con la que se realizan las comparaciones.

Sin embargo, es importante destacar que en los casos de C21 y C22 al analizar las fracturas se puede ver falta de penetración en la unión de C21, por lo que el añadido de material en algunas partes fue superficial y no tuvo la profundidad necesaria (lo que indica falta de temperatura o falta de presión) y en C22 se observan espacios vacíos, lo que facilita la fractura.



*Ilustración 27 Fractura probeta C22 - Unión en V*

Por último, en la probeta C23 se aprecia una penetración en la unión adecuada, casi sin espacios vacíos en el interior de la unión.

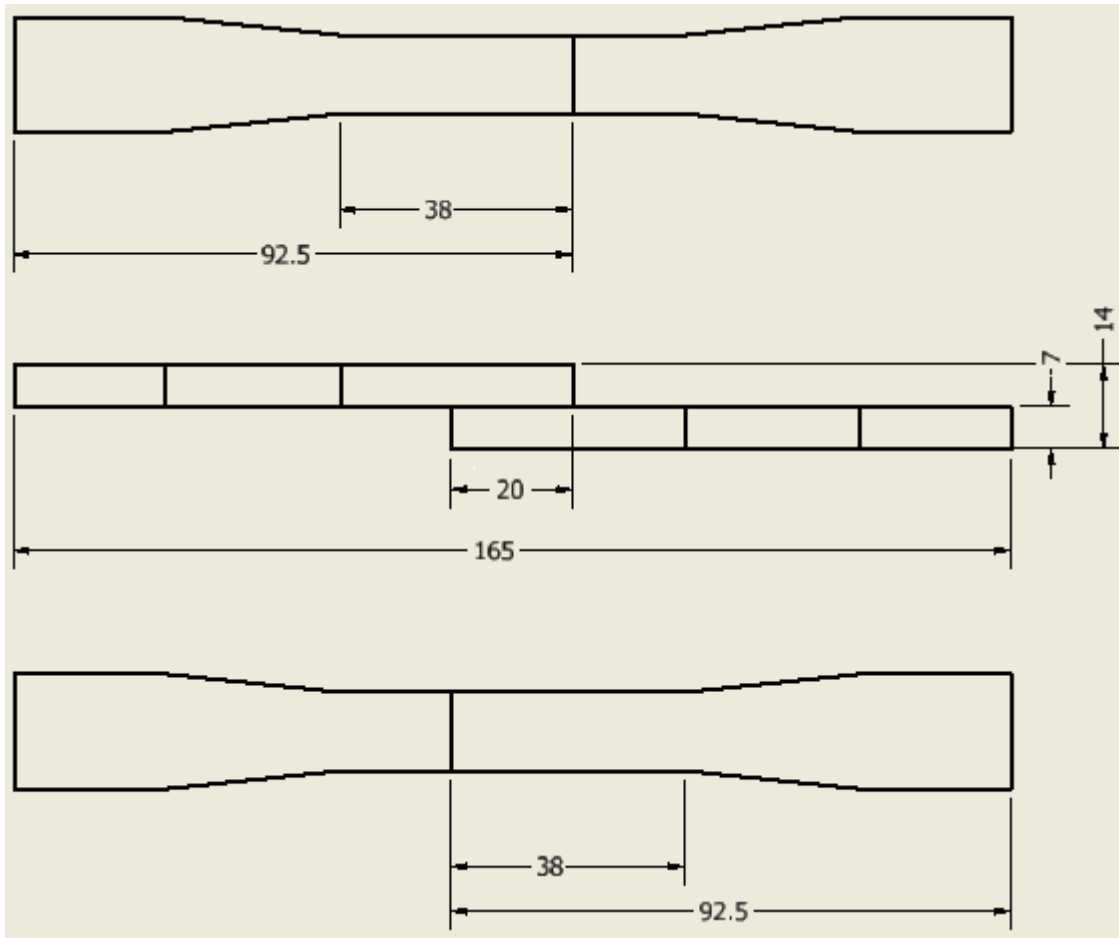


*Ilustración 28 Fractura probeta C23 - Unión en V*

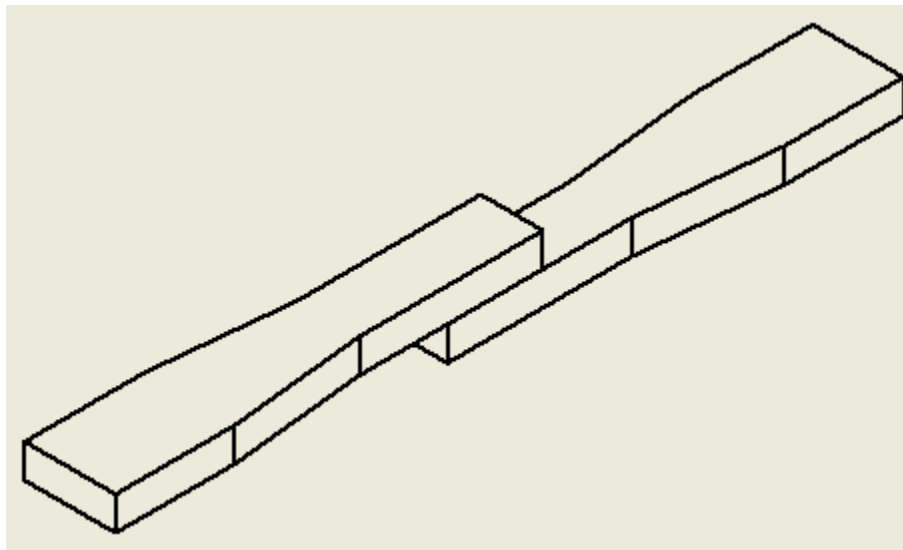
#### **4.5. Ensayo de tracción - Unión en traslape con E.C.**

La unión en traslape, es un método de soldadura donde dos piezas se superponen parcialmente una sobre la otra y se sueldan en la zona de superposición. Este método es valorado por su simplicidad y eficacia en muchas aplicaciones de soldadura.

Para el primer conjunto de ensayos en traslape, se ocuparon probetas que al momento del montaje no permitían tener un eje vertical alineado a la dirección de tracción, por lo que teóricamente existirá una torción que finalmente dará paso a esfuerzos combinados (E.C.), en la zona de unión. Se continúa con el ensayo para apreciar resultados y algunos fenómenos.



*Ilustración 29 Dimensiones de probeta para Unión en traslape con Esfuerzo combinado*



*Ilustración 30 Probeta para Unión en traslape con Esfuerzo combinado*

#### 4.5.1. Preparación de las Piezas

**Superposición de los Materiales:** Las piezas a unir se superponen en el área donde se realizará la soldadura. La cantidad de superposición depende del grosor de los materiales y del tipo de carga que la unión deberá soportar, para efectos del ensayo se debe modificar la probeta, de modo que esta luego de ser soldada tenga un largo de 165 [mm].

**Limpieza:** La limpieza de las superficies a soldar es crucial para eliminar cualquier contaminante que pueda afectar la calidad de la soldadura.

#### 4.5.2. Proceso de Soldadura

**Aplicación del Calor:** Se aplica calor en la zona de superposición para fundir el material de las piezas a unir. En este caso el añadido de material es mínimo, con el fin de evaluar netamente la fuerza de la unión del material de las piezas.

**Presión:** La aplicación de presión puede ser necesaria para asegurar una buena fusión entre las piezas, además la presión puede afectar en la forma final de la unión, hay que recordar la gran cantidad de temperatura con la que se trabaja.

### 4.5.3. Ensayo para método con pistola de calor (PCx)

Los datos recopilados, se expresan en el gráfico fuerza y desplazamiento, para un análisis visual que permita la comparación con los resultados de la probeta normal.

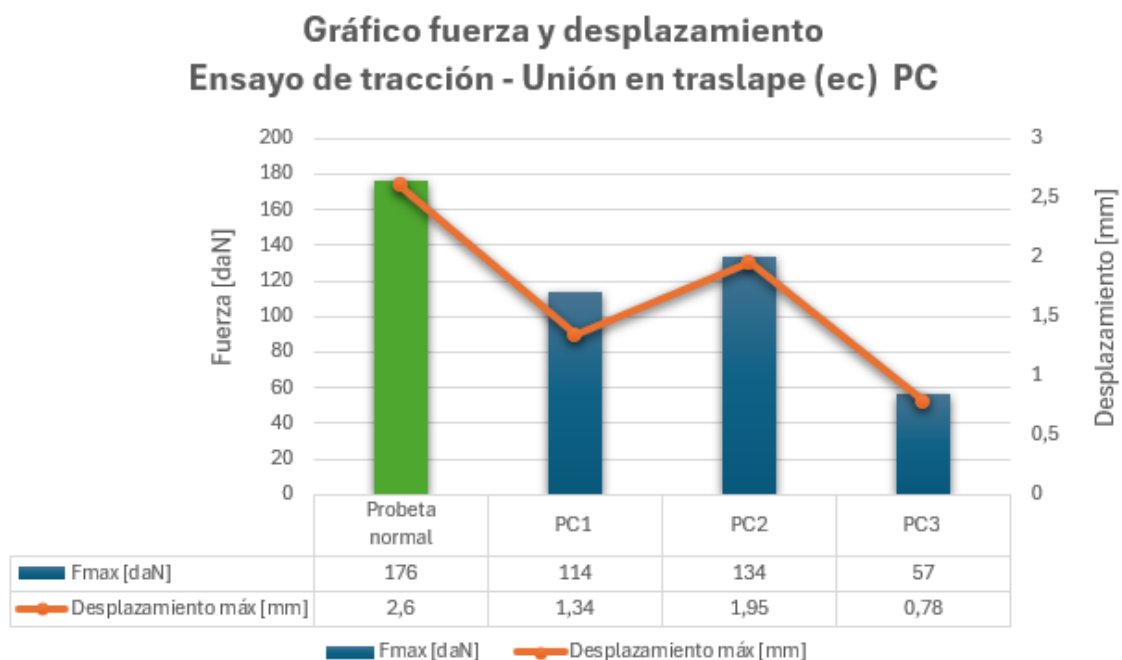


Ilustración 31 Gráfico fuerza y desplazamiento - Ensayo de tracción, Unión en traslape con E.C. (PC)

El gráfico muestra que las uniones no alcanzan ni la resistencia que tuvo la probeta normal ni el desplazamiento. Al analizar las uniones se puede observar que existen muy poca penetración en la unión.



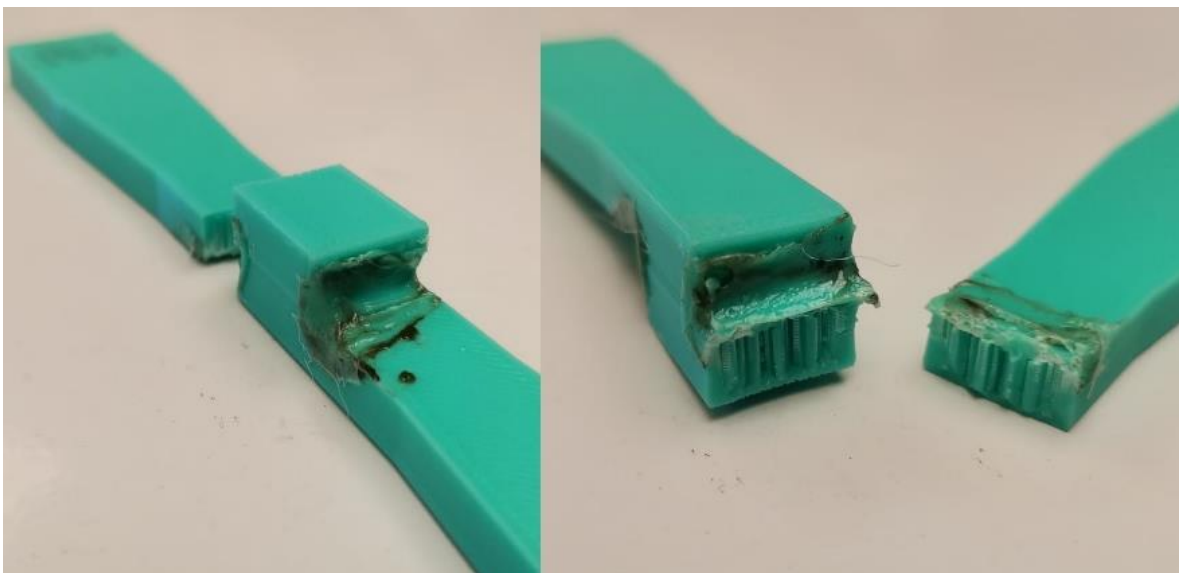
Ilustración 32 Fractura probeta PCI - Unión en traslape con E.C.

Al mismo tiempo se observa en las uniones que al ser un espacio tan pequeño donde debe actuar la boquilla, se producen quemaduras en el material, el cual toma tonalidades oscuras y negras en algunas zonas (alterando sus propiedades mecánicas).



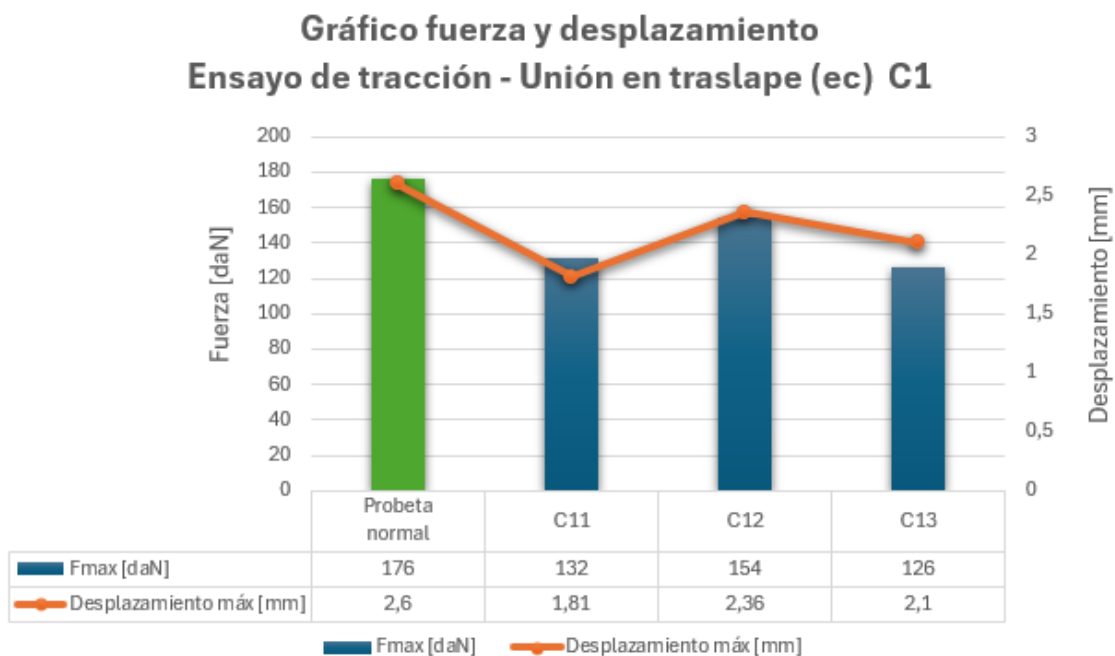
*Ilustración 33 Fractura probeta PC2 - Unión en traslape con E.C.*

En la probeta PC3 ocurrió el fenómeno de fractura fuera de la unión, lo que podría indicar una buena penetración en la unión, la cual resistió más que la misma probeta. Sin embargo, se ve chamuscada la zona de la unión lo que indica un exceso de temperatura o demasiado tiempo de exposición a la misma.



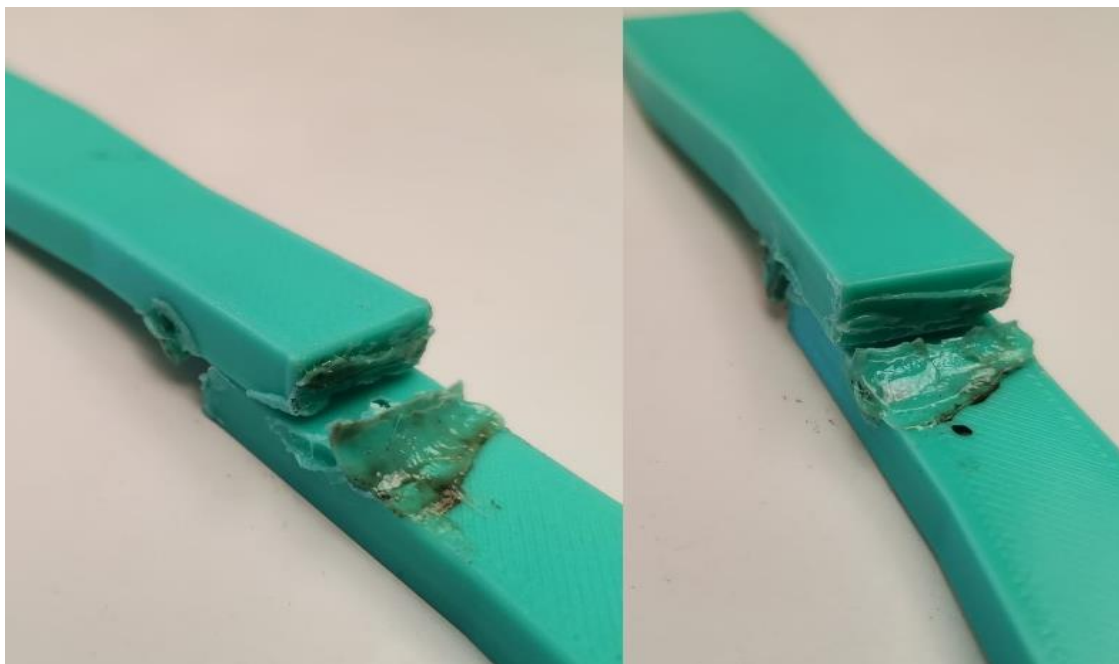
*Ilustración 34 Fractura probeta PC3 - Unión en traslape con E.C.*

#### 4.5.4. Ensayo para método con caudín con boquilla (C1x)



*Ilustración 35 Gráfico fuerza y desplazamiento - Ensayo de tracción, Unión en traslape con E.C. (C1)*

El gráfico desprende que nuevamente la probeta normal resistió una fuerza mayor que las probetas soldadas con el método de caudín con boquilla. Sin embargo, visualmente existe menos material chamuscado, lo que indica un mejor control de la temperatura, pero poca penetración en la zona de la unión.



*Ilustración 36 Fractura probeta C11 – Unión en traslape con E.C.*

Al mismo tiempo en la probeta C12, se observa una fractura fuera de la unión, por lo que la adhesión de material fue efectiva, al mismo tiempo esta fue la probeta que tuvo mejor desempeño en el ensayo, resistiendo una fuerza máxima de 154 [daN] y un desplazamiento máximo de 2,36 [mm], ambos valores considerablemente cercanos a los de la probeta normal considerando la presencia de esfuerzos combinados de por medio.

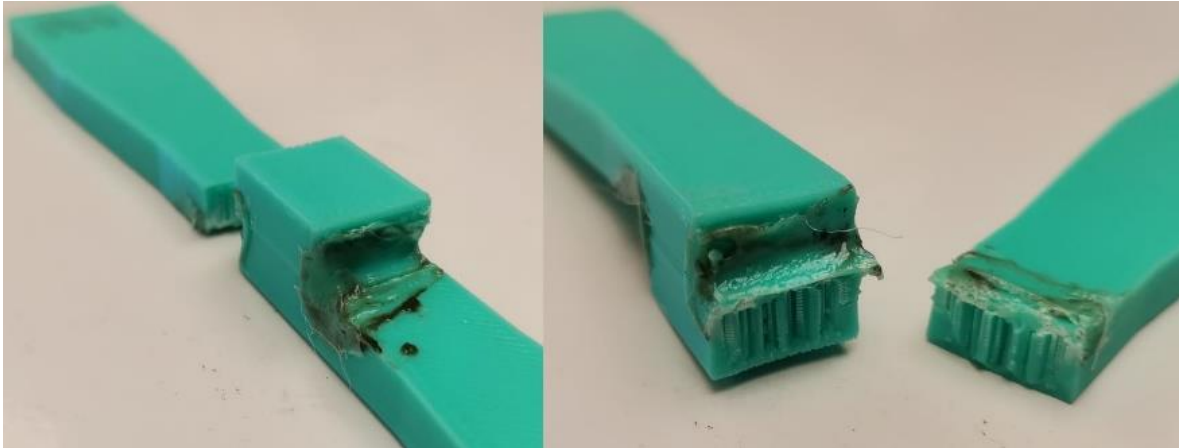


Ilustración 37 Fractura probeta C12 - Unión en traslape con E.C.

#### 4.5.5. Ensayo para método con cautín con “punta de lápiz” (C2x)

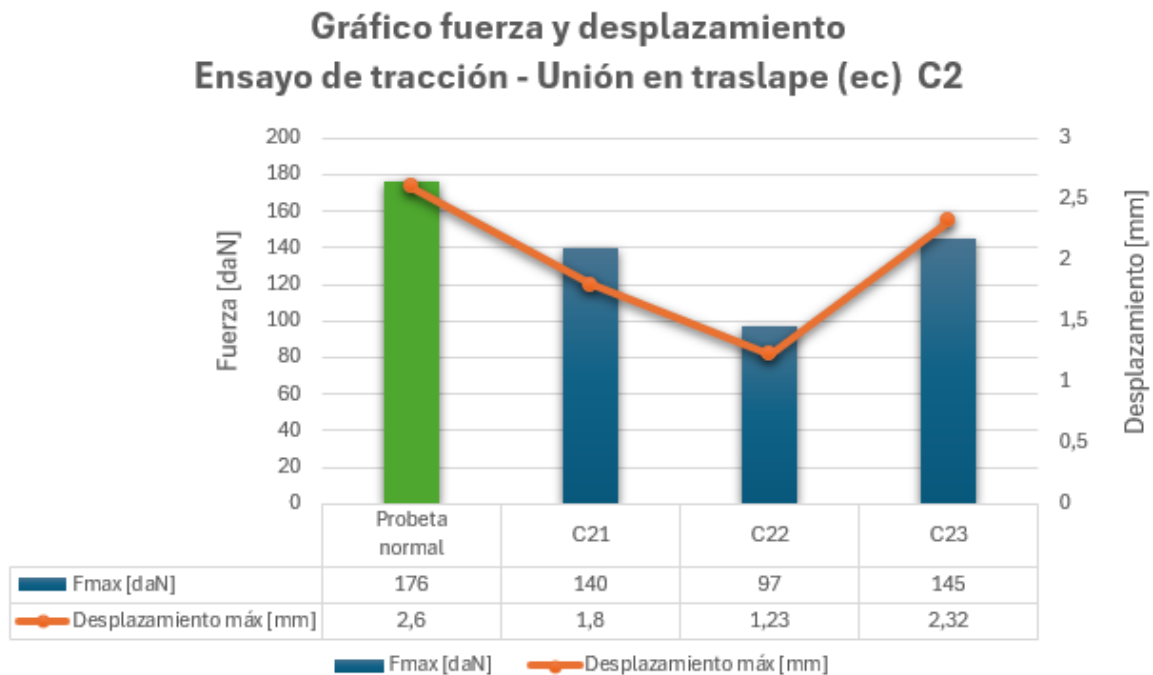
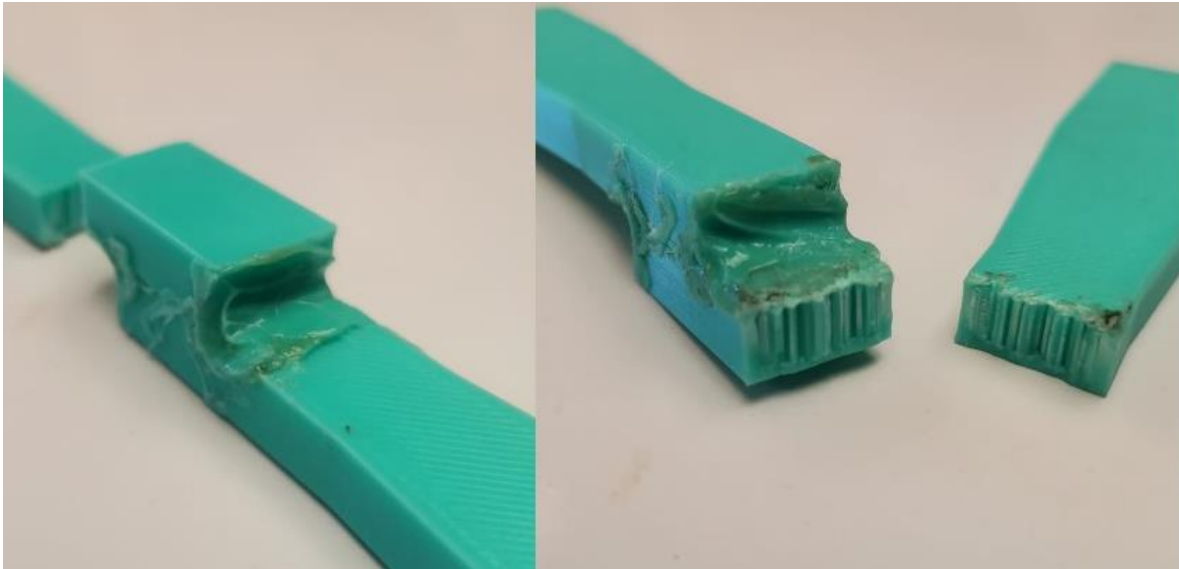


Ilustración 38 Gráfico fuerza y desplazamiento - Ensayo de tracción, Unión en traslape con E.C. (C2)

Como se observa, nuevamente la probeta normal tuvo un mejor desempeño que las probetas sujetas a esfuerzos combinados. Por otro lado, es necesario prestar atención a los fenómenos ocurridos en C21 y C22, los cuales corresponden a fracturas en áreas cercanas a la unión.



*Ilustración 39 Fractura probeta C21 - Unión en traslape con E.C.*

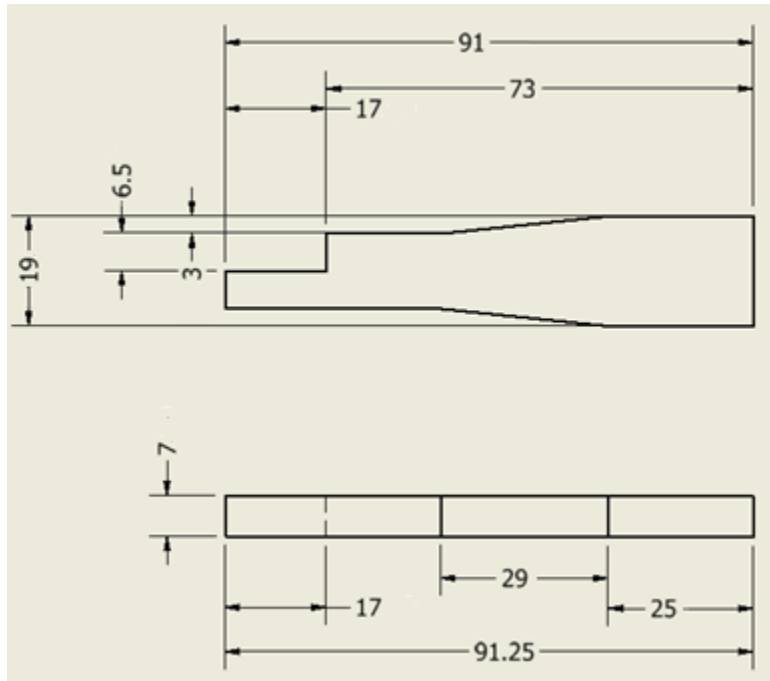
Por otro lado, C23 alcanzó 145 [daN] y un desplazamiento de 2,32[mm], valores considerables para una probeta sujeta a esfuerzos combinados. Y es necesario destacar que bajo el método de “cautín con punta de lápiz”, se obtiene una calidad superficial mejor, además de un mayor control sobre la temperatura que se traduce en menos material/superficie chamuscada



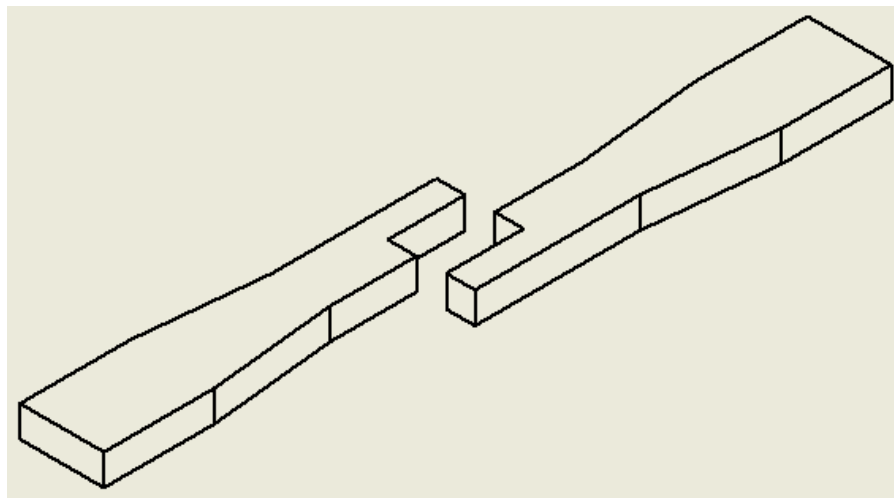
*Ilustración 40 Fractura probeta C23 - Unión en traslape con E.C.*

#### **4.6. Ensayo de tracción - Unión en traslape**

Para este conjunto de ensayos se toma la consideración de una nueva probeta acorde a la norma y que al mismo tiempo no presente esfuerzos combinados. Dado que la unión y el montaje es similar, se da paso a la realización de los ensayos.



*Ilustración 41 Dimensiones de probeta para Unión en traslape*



*Ilustración 42 Probeta para Unión en traslape*

#### 4.6.1. Preparación de la Junta

Traslape: Se preparan las piezas fijándolas de modo que encajen y formen una probeta de largo 165[mm].

Limpieza: Es crucial limpiar bien los bordes a soldar para eliminar contaminantes que puedan afectar la calidad de la soldadura.

#### 4.6.2. Proceso de Soldadura

**Aplicación del Calor:** Se aplica calor (o energía) en la zona de unión para fundir los materiales en los bordes de ambas zonas en traslape. De este modo se asegura una unión que asegure las piezas entre sí en dos zonas.

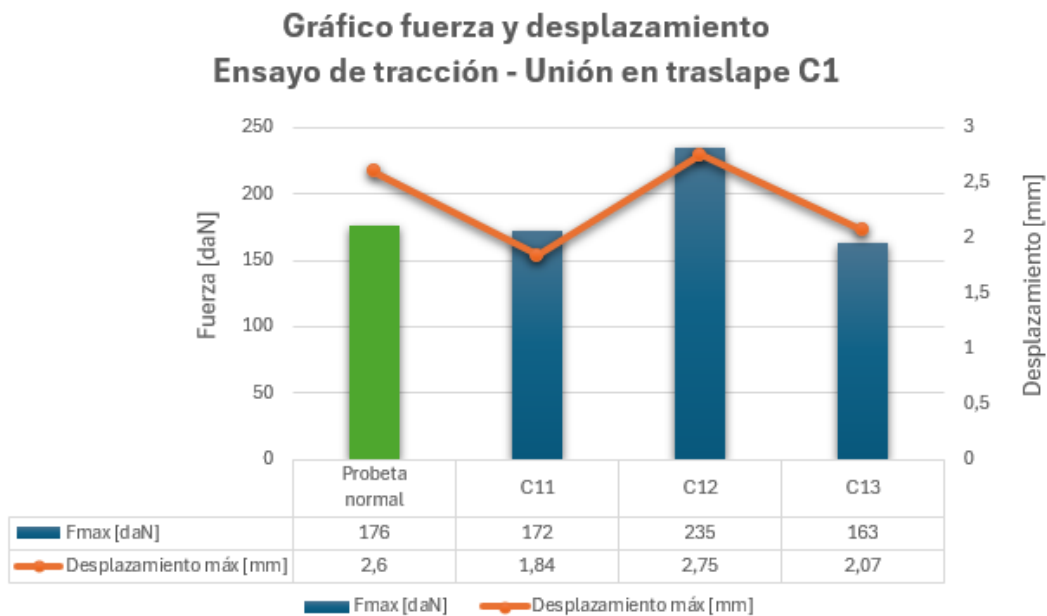
**Material de Aporte:** En este caso el material de aporte es opcional, y para efectos de los ensayos no se utilizó. Esto con el fin de visualizar la efectividad de la unión entre ambas piezas sin añadido externo.

**Presión:** Es necesario ejercer presión en la zona de la unión para asegurar la integridad y forma de la probeta.

El montaje de la probeta es el mismo que para la probeta normal y aquellas con unión en V.

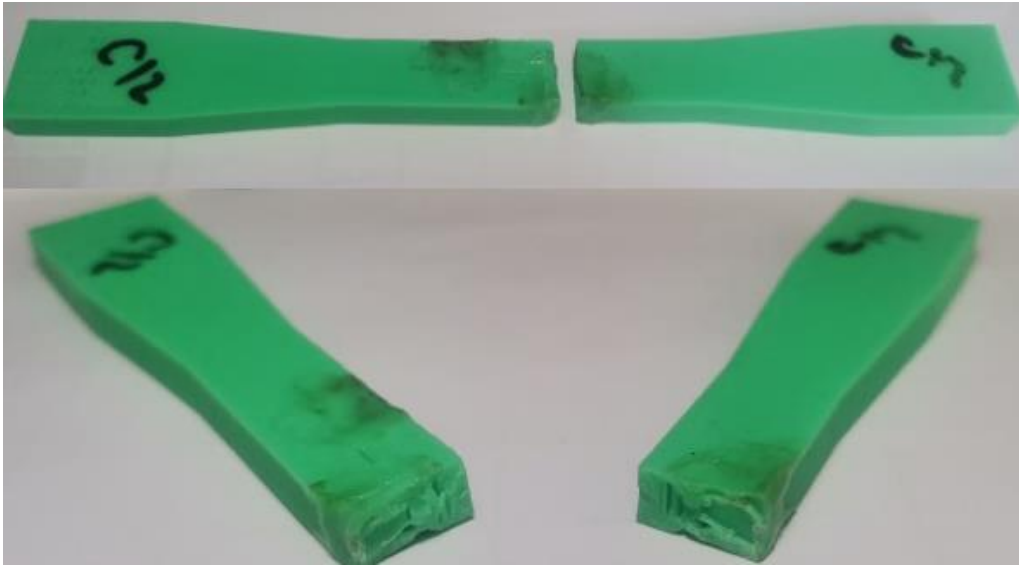
#### 4.6.3. Ensayo para método con cautín con boquilla (C1x)

Los datos recopilados, se expresan en el gráfico fuerza y desplazamiento, para un análisis visual que permita la comparación con los resultados de la probeta normal.



*Ilustración 43 Gráfico fuerza y desplazamiento - Ensayo de tracción, Unión en traslape (C1)*

La información que desprende el gráfico indica que, con el método de cautín con boquilla, los valores de fuerza máxima resistida son parecidos a los de la probeta normal. Por otro lado, solo en el caso de C12 se alcanzó un mayor desplazamiento, llegando a 2,75[mm].



*Ilustración 44 Fractura probeta C12 - Unión en traslape*

Además, las uniones resultaron con una mejor calidad superficial, lo que demuestra un correcto control de la temperatura, tiempo de exposición y presión. Sin embargo, las zonas de fracturas se encuentran en uno de los extremos soldados.



*Ilustración 45 Fractura probeta C11 - Unión en traslape*

#### 4.6.4. Ensayo para método con cautín con “punta de lápiz” (C2x)

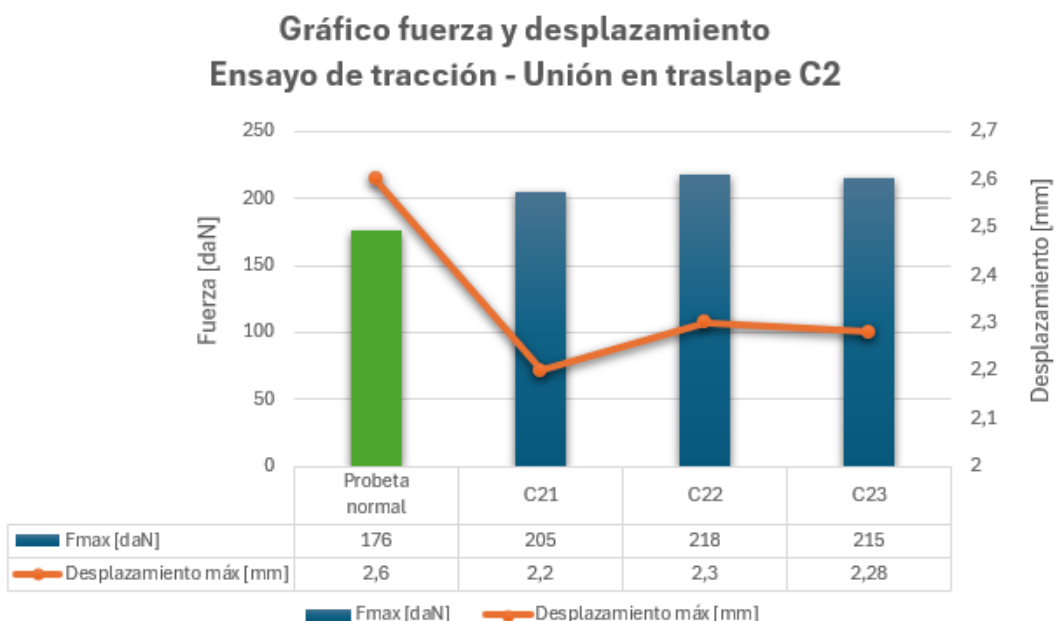


Ilustración 46 Gráfico fuerza y desplazamiento - Ensayo de tracción, Unión en traslape C2

Los valores gráfico indican que el método “cautín con punta de lápiz”, para este caso de unión es traslape es efectivo en cuanto a la fuerza máxima que es capaz de soportar, sin embargo, existe un punto importante, el cual tiene que ver con que en ningún caso se logró obtener un valor igual al de desplazamiento que experimento la probeta normal.

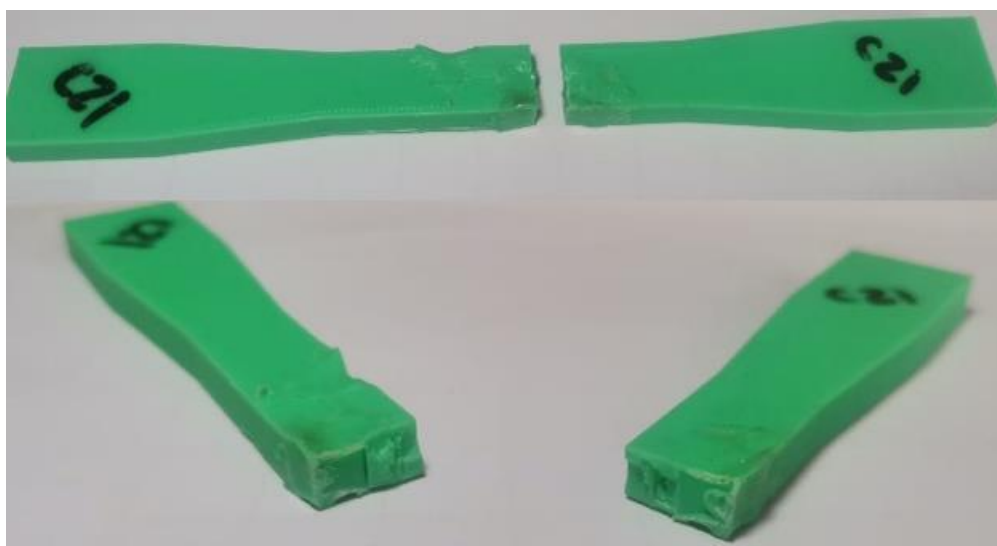
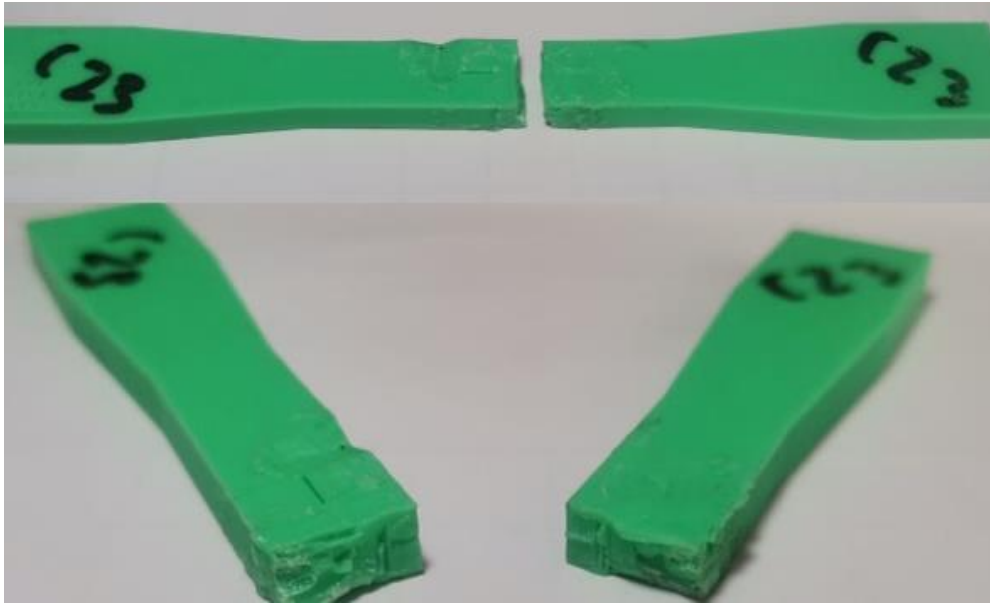


Ilustración 47 Fractura probeta C21 - Unión en traslape

Al igual que el método de cautín con boquilla, las probetas presentan un buen acabado superficial, con pocas áreas chamuscadas y casi manteniendo el mismo color base. Esto indica un correcto uso de la temperatura y buena penetración de la soldadura.



*Ilustración 48 Fractura probeta C23 - Unión en traslape*

## 5. Análisis de resultados

### 5.1. Calidad superficial

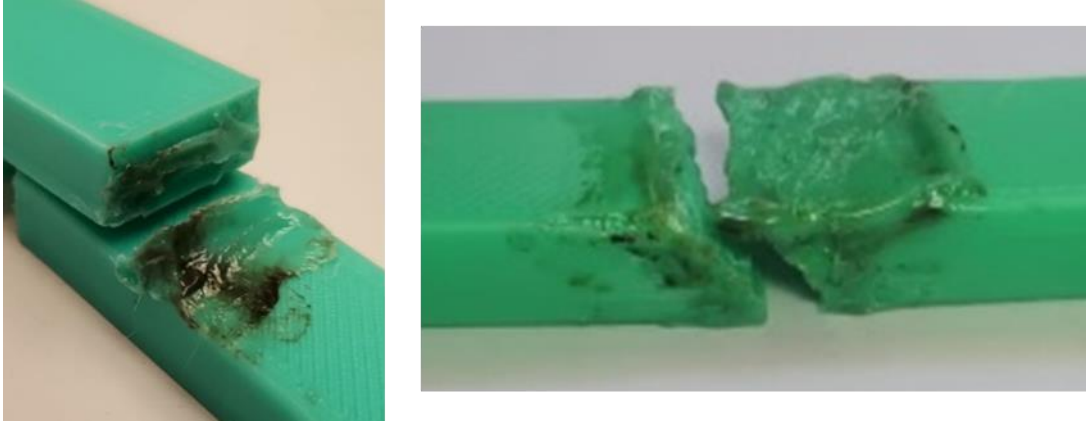
Al momento de realizar un análisis de la calidad superficial, se deben tomar en cuenta los siguientes factores para tener un criterio establecido con el cual sea posible comparar de manera imparcial. Los ensayos de tracción mostraron ciertas tendencias a medida que se cambiaban los tipos de unión o los métodos entre sí.

Criterio	Que observar	Método PC	Método C1	Método C2
Uniformidad	Ausencia de irregularidades como burbujas, quemaduras o inconsistencias en la textura de la soldadura.	3/6	6/9	5/9
Integridad de la unión	No debe haber grietas, porosidades, o inclusiones visibles; contorno alineado y consistente.	5/6	8/9	8/9
Adherencia y Cohesión	Resistencia a la tensión sin despegarse o romperse. Buen mezclado del material en la interfaz de soldadura, verificado mediante pruebas o análisis.	5/6	7/9	7/9
Propiedades del material	Sin degradación notable del color, flexibilidad o resistencia del material cerca de la soldadura.	2/6	5/9	7/9
Estabilidad dimensional	No hay deformaciones o distorsiones que afecten la funcionalidad del ensamblaje.	6/6	9/9	9/9
Estética	Apariencia adecuada de la soldadura, especialmente en productos donde la estética es importante.	0/6	5/9	7/9

*Tabla 3 Evaluación general de calidad superficial - Criterios v/s Métodos desarrollados*

Es necesario por otro lado realizar un análisis de diferentes fenómenos observados estableciendo como diferenciación, cada uno de los métodos utilizados para realizar la soldadura.

**Método Pistola de calor:** Las tendencias indican que al trabajar en uniones donde el área de impacto sea mayor, tiende a chamuscar y quemar la zona de la unión. Esto se puede verificar en las uniones de los ensayos en traslape con esfuerzos combinados. Al mismo tiempo, en las uniones en V, al final de la unión el material tenía una textura áspera y tonos quemados, lo que indica un exceso de exposición a la fuente de calor.



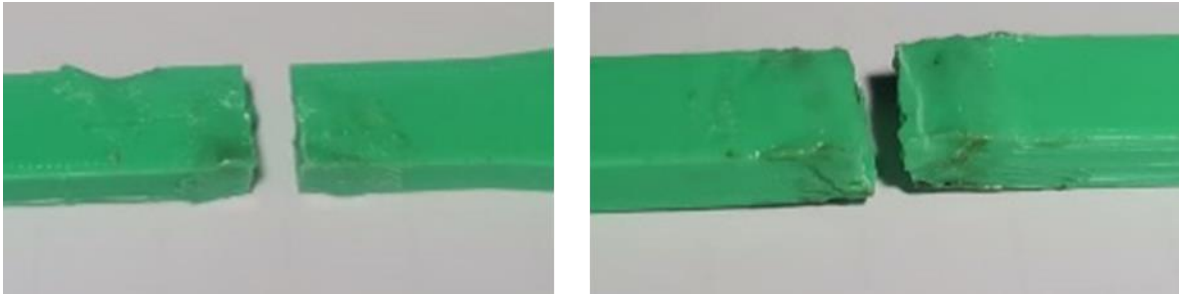
*Ilustración 49 Zona chamuscada en probetas bajo método Pistola de Calor.*

**Método Cautín con boquilla:** Los resultados a los diferentes ensayos mostraron un comportamiento que involucra el sobrecalentado del material añadido esto ya que, al ingresar el material en la entrada de la boquilla, existe la posibilidad que se atasque dentro de la misma, calentando el material más de lo necesario, modificando sus propiedades y colores. Sin embargo, la textura en la superficie es mucho mejor que la del método por pistola de calor. Si bien el color se altera levemente, al tacto es muy parecido al filamento como tal(liso).



*Ilustración 50 Calidad superficial y terminaciones en probetas bajo método Cautín con boquilla.*

**Método Cautín con punta:** Se presenta como el método que mejor calidad superficial alcanza, en los diferentes tipos de unión generalmente alcanza un acabado liso, sin embargo, se puede justificar por la forma de la punta. De los métodos propuestos fue aquel que menos alteraba la textura del filamento y el color de este, lo cual se aprecia visualmente en casi todas las probetas por el método de Cautín con punta.



*Ilustración 51 Calidad superficial y terminaciones en probetas bajo el método de Cautín con "punta de lápiz".*

## 5.2. Fenómenos apreciados

### 5.2.1. Elongación

Como se logró demostrar bajo los diferentes métodos y uniones asociadas a la soldadura plástica, existen diferentes factores por los cuales algunas probetas no alcanzaron el valor de deformación que tuvo la probeta de prueba, sin embargo, es importante resaltar aquellas probetas que demostraron tener una unión más resistente y que les permitió llegar incluso a desplazamiento máximo de 3,22 [mm] superando por más de medio milímetro a la probeta de prueba con 2,6 [mm]. Así mismo, es destacable el hecho de que en más de un método de soldadura o unión hubo casos donde el desplazamiento máximo fue superior al de la probeta de prueba, lo que finalmente indica que si es posible alcanzar una unión más dúctil si se perfecciona la técnica y control de cada método.

Por otro lado, también es destacable aquellas probetas que alcanzaron una mayor resistencia en la unión, pero una menor ductilidad. Esto puede explicarse por varios factores asociados a la temperatura de añadido del material, el tiempo de exposición a la fuente de calor y la penetración de la soldadura como principales elementos, sin embargo, estos no son factores intrínsecos al proceso, por lo que un correcto uso de los parámetros operacionales puede disminuir o evitar estos desperfectos que afectan la integridad de la unión.

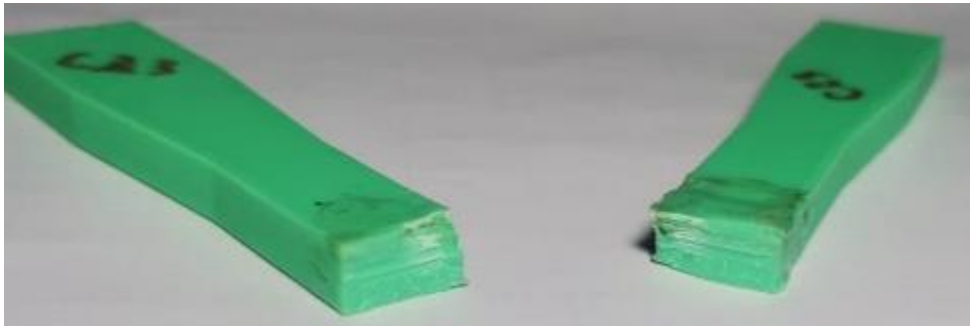
### 5.2.2. Modo de falla

Al realizar los diferentes ensayos, se encontraron diferentes métodos de falla para probetas con las mismas condiciones (método de unión y forma), por lo que se debe categorizar dependiendo de la zona donde ocurrió la falla.

- Cohesiva dentro del material soldado

Como se observaron en aquellas probetas con mejor desempeño en unión en V y traslape (sin e.c.), la falla se produjo dentro del material de la soldadura, lo cual puede suele ser indicativo

de una buena unión. En aquellos casos las probetas luego de la fractura exhibían una unión bien lograda, sin espacios interiores y donde el material interior mantenía el color del filamento añadido.



*Ilustración 52 Falla cohesiva en probeta C23 - Unión en V*

➤ Adhesiva en la interfaz

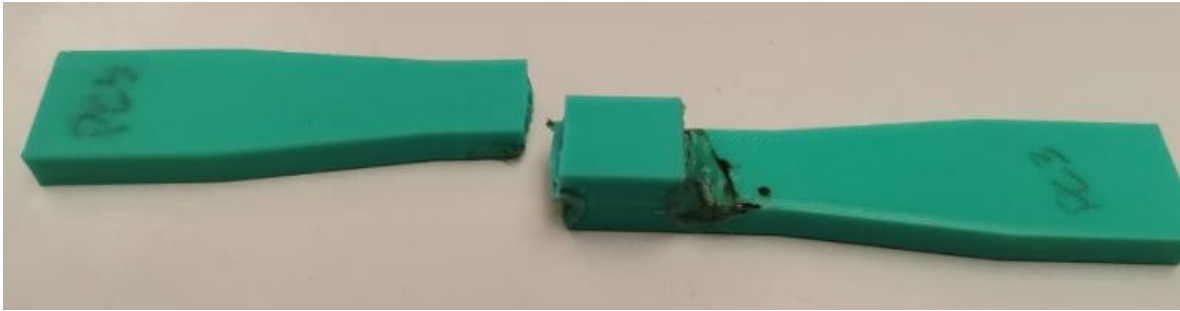
Los ensayos entregaron resultados que indican en varios casos (independiente del método) la falta de adhesividad en la interfaz de la unión lo cual se puede observar en las fracturas ocurridas en la junta de los materiales soldados. Esto indica falta de penetración de la soldadura, la cual puede ser por falta de temperatura o presión, ambos factores que involucran falta de experiencia y técnica.



*Ilustración 53 Falla adhesiva en la interfaz en probeta C12 - Unión en traslape con E.C.*

➤ En el material base

En esta categoría se encuentran aquellas probetas cuya fractura ocurrió fuera de la zona de soldadura, en el material base, lo que indica que la soldadura es más fuerte que el propio material, que es finalmente lo que se busca.



*Ilustración 54 Falla en el material base en probeta PC3 - Unión en traslape con E.C.*

### **5.3. Deformación plástica y elástica**

La deformación, ya sea plástica o elástica es un parámetro importante que nos indica la capacidad del material de soldadura para deformarse bajo carga. Las deformaciones estudiadas indican que para el material PLA se debe asumir una deformación plástica, lo que indicaría una deformación permanente en la unión luego de someterla a carga.

Esto se observa en todas las probetas, incluso en la probeta de prueba, la cual pasado el ensayo se deforma de manera permanente, sin embargo, en el caso de las probetas soldadas, existe la posibilidad de rehacer la unión, fundiendo el material, pero para ello se debe realizar un estudio que permita establecer cuanto se afectan las propiedades del material al procesar nuevamente la zona a altas temperaturas.



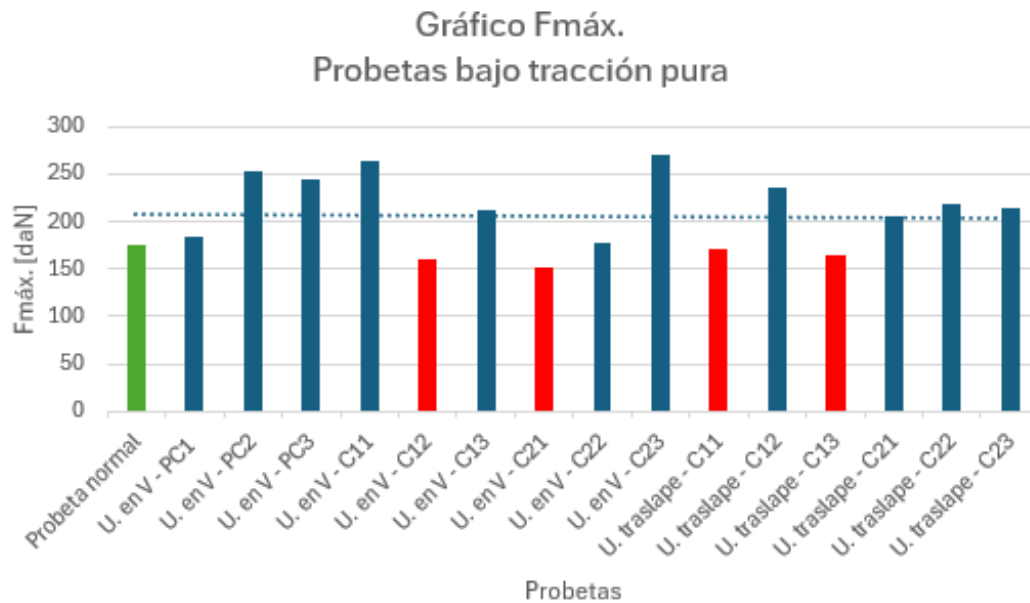
*Ilustración 55 Resultado del ensayo de tracción - Probeta de prueba*

## 6. Conclusiones

### 6.1. Conclusiones cuantitativas

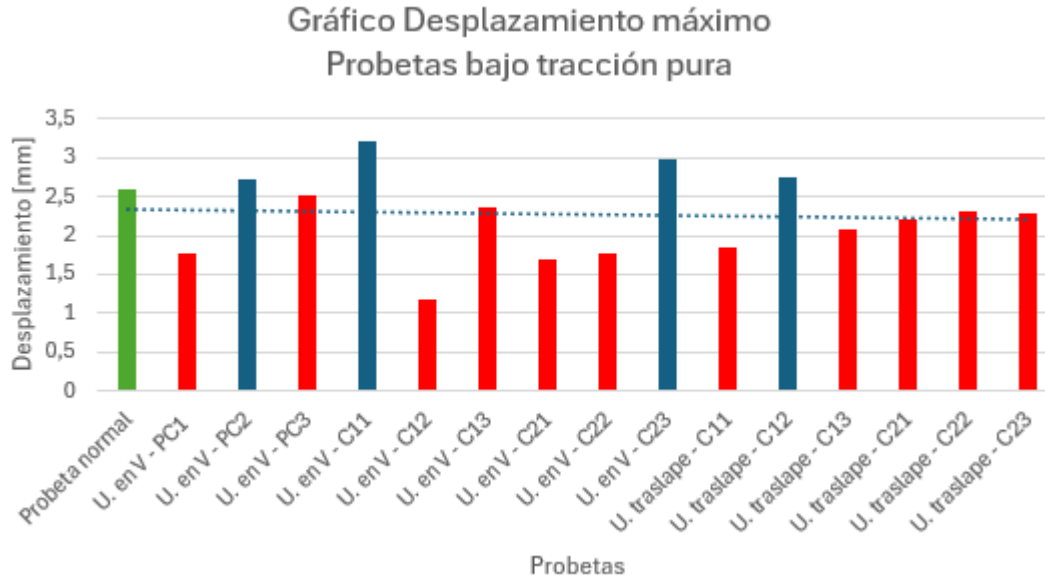
De manera cuantitativa podemos analizar los resultados de los ensayos centrado la atención en la fuerza máxima que resistió cada una de las probetas, solo tomando en los valores obtenidos en cada ensayo también se puede realizar una línea de tendencia que puede ayudar a tener una visión más clara del panorama.

#### 6.1.1. Ensayo en probetas bajo tracción pura



*Ilustración 56 Gráfico F<sub>máx.</sub> - Probetas bajo tracción pura*

El gráfico muestra la Fuerza máxima resistida, entrega visiblemente un panorama positivo en cuanto a los valores alcanzados por las probetas bajo tracción pura. Como tal la línea de tendencia resume que la soldadura plástica realizada por los tres métodos en las diferentes probetas alcanza un valor de resistencia a la tracción mayor que la probeta normal. Sin embargo, esta línea de tendencia no quita el hecho de que cuatro probetas en diferentes métodos no lograron equiparar la fuerza máxima resistida por la probeta normal.

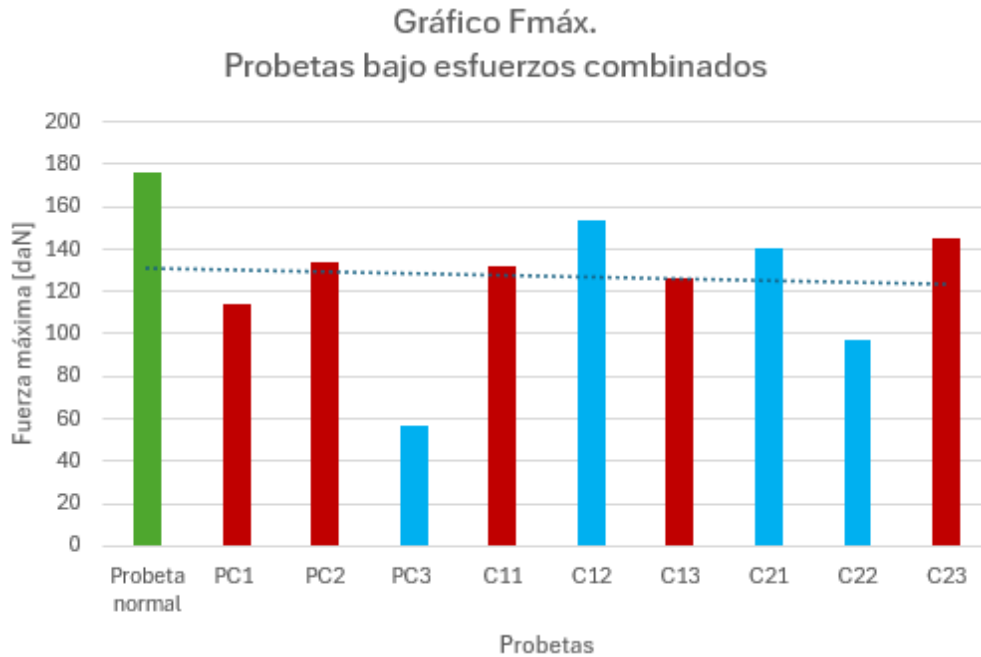


*Ilustración 57 Gráfico desplazamiento máximo - Probetas bajo tracción pura*

En cuanto al gráfico de desplazamiento máximo, la línea de tendencia que, si bien se está cerca de igualar el valor obtenido por la probeta normal, la tendencia es a tener un menor desplazamiento (posiblemente por la ZAC) en las diferentes uniones realizadas. Sin embargo, es necesario también considerar que en cada uno de los métodos se logró al menos un caso de unión con una capacidad de deformar su longitud más de lo que soportó la probeta normal, por lo que es posible alcanzar una mayor deformación si es que se tiene un mayor control de los parámetros al momento de realizar la unión.

### 6.1.2. Ensayo con probetas sometidas a esfuerzos combinados

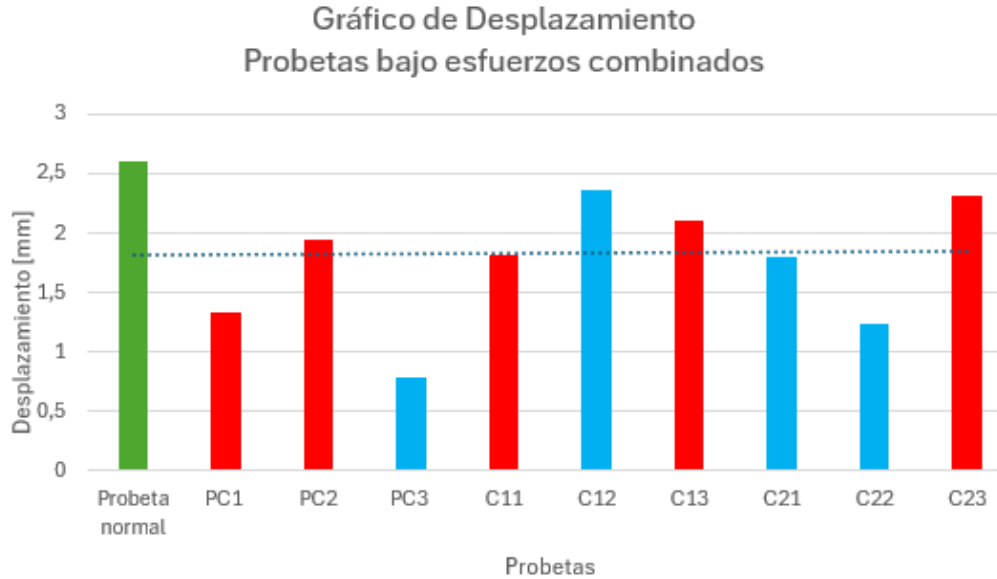
Al tomar en consideración las probetas sometidas a esfuerzo combinado, se busca analizar el comportamiento físico del material sometido además de los fenómenos que puedan ocurrir. De este modo, en los gráficos siguientes se utiliza el color celeste para denotar aquellas probetas donde la fractura fue fuera de la zona de unión.



*Ilustración 58 Gráfico F<sub>máx.</sub> - Probetas bajo esfuerzo combinado*

Como se observa en el gráfico, lo primero a interpretar es que ninguna probeta logró alcanzar el valor de fuerza máxima resistida por la probeta normal. Además de ello también se observa una línea de tendencia que señala uno 130 [daN] de tendencia. Sin embargo, en cada método se encuentra al menos un caso donde la fractura de la probeta fue en un lugar diferente al de la zona de unión, lo que finalmente implica una unión más firme que el mismo material.

Por otro lado, también se observa que en las uniones generadas por los métodos que involucran el uso de cautín con o sin boquilla existe un mejor desempeño en los ensayos generados, en el caso de C12 alcanzando casi 160 [daN] y para C23 un valor muy cercano a 150 [daN].



*Ilustración 59 Gráfico de desplazamiento - Probetas bajo esfuerzo combinado*

El gráfico de desplazamiento entrega como resultado una media de desplazamiento máximo inferior al obtenido por la probeta normal. Nuevamente se repiten diferentes casos que logran un desempeño mayor y por sobre la media, los cuales corresponden a las mismas probetas C12 y C23, llegando a un valor cercano a 2,5 [mm], que finalmente demuestra la posibilidad de lograr mejores uniones, que tengan una resistencia a la tracción y un desplazamiento cercano al que tendría una probeta normal, considerando que para estos casos se trató de probetas bajo esfuerzos combinados.

Finalmente, los gráficos muestran que, para comportamientos bajo tracción pura, los métodos propuestos muestran un buen comportamiento en relación capacidad soportada versus desplazamiento, lo cual queda demostrado en todas aquellas probetas que tuvieron una unión de mejor calidad y con parámetros mejor controlados.

Por otro lado, los ensayos para probetas bajo esfuerzos combinados, se demostró una significativa baja en los parámetros que se buscaba observar, y aun así en algunas probetas se logró una unión tan resistente que finalmente desencadena una fractura fuera de la zona de unión. Es necesario recalcar la presencia de esfuerzos combinados que finalmente es lo que afecta la capacidad de resistir a una mayor fuerza de tracción o soportar un mayor desplazamiento antes de la fractura.

## 6.2. Conclusiones cualitativas

### 6.2.1. Calidad Superficial

- ✓ **Uniformidad:** Las soldaduras realizadas con cautín con punta de lápiz presentaron una calidad superficial más uniforme, con menos irregularidades como burbujas y quemaduras en comparación con los otros métodos.
- ✓ **Textura y Apariencia:** La soldadura con cautín con punta de lápiz mostró una textura más lisa y una mejor conservación del color original del material, lo que indica un mejor control del proceso.

### 6.2.2. Integridad de la Unión

- ✓ **Fallas Adhesivas:** Se observaron fallas adhesivas en la interfaz de la unión en varias probetas, especialmente con la pistola de calor y cautín con boquilla, indicando problemas de penetración y adherencia del material.
- ✓ **Fallas Cohesivas:** Las fallas dentro del material soldado fueron más comunes en las uniones realizadas con cautín con punta de lápiz, lo que sugiere una buena calidad de unión interna.

### 6.2.3. Adherencia y Cohesión

- ✓ **Penetración Adecuada:** Las probetas soldadas con cautín con punta de lápiz mostraron una penetración adecuada en la mayoría de los casos, proporcionando una unión más resistente.
- ✓ **Espacios Vacíos:** Se encontraron espacios vacíos en algunas uniones realizadas con cautín con boquilla, afectando negativamente la integridad y la resistencia de la soldadura.

### 6.2.4. Propiedades del Material

- ✓ **Degradación Térmica:** La pistola de calor tendió a sobrecalentar el material, causando quemaduras y cambios en el color del material, lo que indica una degradación térmica significativa.
- ✓ **Control de Temperatura:** El método con cautín con punta de lápiz permitió un mejor control de la temperatura, resultando en menos material chamuscado y una conservación superior de las propiedades del material.

### 6.2.5. Estabilidad Dimensional

- ✓ **Deformaciones:** La mayoría de las probetas soldadas presentaron cierta deformación, pero las realizadas con cautín con punta de lápiz mantuvieron una mejor estabilidad dimensional.

- ✓ **Resistencia a la Tracción:** Aunque la pistola de calor generó algunas uniones fuertes, la variabilidad en los resultados y las deformaciones significativas reducen la confiabilidad del método.

#### 6.2.6. Estética

- ✓ **Apariencia Final:** Las soldaduras realizadas con cautín con punta de lápiz resultaron en una mejor apariencia final, con menos quemaduras y una superficie más homogénea, adecuada para aplicaciones donde la estética es importante.

### 6.3. Conclusiones de los métodos

#### 6.3.1. Pistola de Calor con Boquilla (PCx)

##### Ventajas:

- **Alta Resistencia:** La probeta PC2 mostró una capacidad de soportar hasta 253 [daN], indicando que este método puede producir uniones fuertes si se optimizan los parámetros.
- **Desplazamiento Significativo:** Algunas probetas, como PC2, alcanzaron un desplazamiento máximo de 272 [mm], demostrando buena ductilidad en ciertos casos.

##### Desventajas:

- **Quemaduras y Chamuscado:** La calidad superficial se ve comprometida por tonalidades oscuras y quemaduras, indicando que la exposición prolongada y el exceso de temperatura pueden degradar el material.
- **Penetración Inadecuada:** Probetas como PC1 y PC3 presentaron poca penetración de la soldadura, lo que dificulta una buena mezcla entre el material base y el de aporte.
- **Inconsistencia en Resultados:** La variabilidad en los resultados sugiere que el control preciso de la temperatura y el tiempo de exposición es crítico y difícil de mantener.

##### Aspectos Cualitativos:

- **Facilidad de Uso:** La pistola de calor es relativamente fácil de manejar, pero requiere un control preciso de la distancia y el tiempo de exposición para evitar sobrecalentamientos y chamuscar el material.
- **Costo y Accesibilidad:** Generalmente accesible y de bajo costo, lo que la hace una opción viable para aplicaciones donde la precisión no es crítica.
- **Versatilidad:** Puede ser utilizada en una variedad de situaciones y materiales, aunque es más adecuada para uniones que no requieran una alta precisión.

### 6.3.2. Cautín con Boquilla (C1x)

#### Ventajas:

- **Buena Resistencia y Desplazamiento:** Probetas como C11 alcanzaron una resistencia a la tracción de 263 [daN] y un desplazamiento máximo de 3,22 [mm], mostrando que este método puede producir uniones fuertes y dúctiles.
- **Mejor Control de Temperatura:** Comparado con la pistola de calor, este método produce menos material chamuscado, indicando un mejor control de la temperatura.

#### Desventajas:

- **Espacios Vacíos:** En algunas probetas (C12 y C13), se observaron espacios vacíos en las uniones, lo que afecta negativamente la integridad.
- **Sobrecalentamiento Local:** Existe la posibilidad de sobrecalentamiento del material dentro de la boquilla, lo que puede alterar sus propiedades.

#### Aspectos Cualitativos:

- **Precisión:** El cautín con boquilla permite una mayor precisión en la aplicación de calor y material, lo cual es beneficioso para uniones más delicadas.
- **Control de Parámetros:** Requiere un manejo cuidadoso para evitar sobrecalentamientos, pero generalmente ofrece un control más uniforme comparado con la pistola de calor.
- **Costo y Mantenimiento:** Es una herramienta económica y fácil de mantener, aunque puede requerir más atención en la limpieza de la boquilla para evitar atascos.

### 6.3.3. Cautín con Punta de Lápiz (C2x)

#### Ventajas:

- **Mejor Calidad Superficial:** Este método resultó en la mejor calidad superficial, con menos alteraciones en la textura y color del material.
- **Buena Penetración y Adherencia:** Probeta C23 mostró una buena penetración en la unión, alcanzando valores considerables de resistencia (145 [daN]) y desplazamiento (2,32 [mm]).

#### Desventajas:

- **Penetración Inconsistente:** En algunas probetas (C21 y C22), la penetración fue superficial o presentaron espacios vacíos, indicando la necesidad de un control preciso de la temperatura y la presión.
- **Resistencia Variable:** Aunque algunas probetas mostraron buena resistencia, otras no alcanzaron los valores deseados debido a la falta de penetración o temperatura adecuada.

### Aspectos Cualitativos:

- **Precisión y Control:** El cautín con punta de lápiz permite una aplicación muy precisa del calor, lo que es ideal para uniones detalladas y delicadas.
- **Calidad Estética:** Produce un acabado superficial liso y mantiene el color del material, lo que es beneficioso para aplicaciones donde la estética es importante.
- **Adaptabilidad:** Puede ser adaptado para diferentes tipos de uniones con una buena capacidad de penetración y control térmico.

## 6.4. Conclusiones Generales sobre la Soldadura Plástica

### 6.4.1. Ventajas

- **Versatilidad en Métodos:** La soldadura plástica ofrece una variedad de métodos que pueden ser adaptados a diferentes aplicaciones y necesidades específicas. Esto permite a los ingenieros seleccionar el método más adecuado según las propiedades deseadas de la unión.
- **Capacidad de Personalización:** Los métodos pueden ser optimizados mediante ajustes en parámetros como temperatura, tiempo de exposición y presión, lo que permite obtener uniones de alta calidad y resistencia mecánica.
- **Potencial de Mejora:** Los resultados indican que, con un control adecuado de los parámetros operacionales, es posible obtener uniones plásticas que superen las propiedades mecánicas del material base.

### 6.4.2. Aspectos a mejorar

- **Control Crítico de Parámetros:** La calidad de la soldadura plástica es altamente dependiente del control preciso de los parámetros operativos. Pequeñas variaciones pueden resultar en defectos significativos como quemaduras, penetración inadecuada y espacios vacíos que decantan en una fractura prematura y menor resistencia a la tracción.
- **Variabilidad en Resultados:** Los métodos evaluados mostraron una variabilidad considerable en los resultados de resistencia y desplazamiento, lo que sugiere que se necesita más estandarización y experiencia para obtener resultados consistentes.
- **Sensibilidad al Calor:** La soldadura plástica es sensible al calor excesivo, lo que puede llevar a la degradación del material y alteraciones en sus propiedades mecánicas y estéticas.

### 6.4.3. Consideraciones

- **Desempeño de acuerdo con la inversión:** Los resultados de la soldadura plástica sugieren que los tres métodos se pueden adaptar para el uso en ámbitos profesionales

con resultados aceptables y con la capacidad de regularizar las buenas uniones mediante la experiencia.

- **Requiere Experiencia:** La soldadura plástica, especialmente con métodos más precisos como el cautín con punta de lápiz, requiere una cierta cantidad de habilidad y experiencia para obtener resultados consistentes y de alta calidad.
- **Aplicaciones Diversas:** Es aplicable en una amplia gama de industrias y productos, desde componentes industriales hasta piezas decorativas, gracias a su adaptabilidad y capacidad de personalización.
- **Innovación Continua:** La tecnología de soldadura plástica está en constante evolución, y hay un gran potencial para innovaciones que mejoren aún más la eficiencia, precisión y calidad de las uniones plásticas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. <https://www.aristegui.info/que-es-la-soldadura-de-plasticos/>
2. <https://www.aristegui.info/que-son-los-termoplasticos/>
3. [https://www.linkedin.com/posts/cuauhtemoc-medina-70287a170\\_weldingworld-sharedknowledge-engineering-activity-7053112838478856192-9FzS/?trk=public\\_profile\\_like\\_view&originalSubdomain=es](https://www.linkedin.com/posts/cuauhtemoc-medina-70287a170_weldingworld-sharedknowledge-engineering-activity-7053112838478856192-9FzS/?trk=public_profile_like_view&originalSubdomain=es)
4. <https://www.youtube.com/watch?v=jdwKKbVnIe4>
5. <https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>
6. <https://3dlaboratorio.es/plastic-pla.htm>
7. [https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-1321396147-boquillas-de-soldadura-rapida-para-soplado-de-aire-caliente-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-1321396147-boquillas-de-soldadura-rapida-para-soplado-de-aire-caliente-_JM)
8. <https://www.einhell.cl/p/4520195-te-ha-2000-e/>
9. <https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110254682/Cautin-tipo-lapiz-80W/110254683?exp=sodimac>
10. <https://www.aristegui.info/category/soldadura-toldos-pvc/>
11. <https://www.aristegui.info/las-publicaciones-mas-leidas-de-nuestro-blog-i/>
12. <https://www.aristegui.info/proceso-de-soldadura-manual-de-lamina-de-pvc-video/>
13. <https://www.instron.com/es-ar/testing-solutions/astm-standards/astm-d638#:~:text=La%20norma%20ASTM%20D638%20es,resistencia%20mec%C3%A1nica%20de%20sus%20materiales.>
14. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/plasticos/termoplasticos-y-materiales-termoendurecibles/propiedades-de-traccion-astm-d638/>
15. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/ensayo-de-materiales/ensayo-de-traccion/resistencia-a-la-traccion/>
16. <https://deingenierias.com/el-acero/diagrama-esfuerzo-deformacion/>
17. Grewell D.A.; Benatar A.; Park J.B. (2003). **“Plastics and Composites Welding Handbook”**. Hanser Publishers, Munich. [Este libro trata diferentes metodos de soldadura, aportando También un estudio en los parámetros utilizados ].
18. Osswald T.A.; Baur E.; Brinkmann S.; Oberbach K.; Schmachtenberg E. (2006). **“International Plastics Handbook”**. Hanser Publishers, Munich. [Este libro aporta información de los diferentes tipos de plasticos más utilizados, su procesado y sus aplicaciones].
19. Rotheiser J. (2004). **“Joining of Plastics”**. Hanser Publishers, Munich. [Este libro aporta técnicas de unión en plásticos].
20. Slobodan Kralj, Branko Bauer. “Welding Engineering and Technology” – Capítulo 11 [Este libro aporta información de diferentes tipos de unión].

## ANEXOS

1. Norma ASTM D638 - <https://drive.google.com/drive/folders/1Y-rLqy-QPtTrbAHjystvdhtSaUZee-AE?usp=sharing>
2. Archivo Inventor Probetas Traslape - <https://drive.google.com/drive/folders/1Y-rLqy-QPtTrbAHjystvdhtSaUZee-AE?usp=sharing>
3. Archivo Inventor Probetas en V - <https://drive.google.com/drive/folders/1Y-rLqy-QPtTrbAHjystvdhtSaUZee-AE?usp=sharing>
4. Archivo Inventor Probetas en Traslape con Esfuerzo combinado - <https://drive.google.com/drive/folders/1Y-rLqy-QPtTrbAHjystvdhtSaUZee-AE?usp=sharing>
5. Archivo Inventor Probeta Norma ASTM D638 - <https://drive.google.com/drive/folders/1Y-rLqy-QPtTrbAHjystvdhtSaUZee-AE?usp=sharing>
6. STL Probetas - <https://drive.google.com/drive/folders/1Y-rLqy-QPtTrbAHjystvdhtSaUZee-AE?usp=sharing>