

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA

Facultad de Ingeniería

Proyecto de fin de carrera de Ingeniería en Materiales:

**“CONSTRUCCIÓN DE DISPOSITIVO PARA
SOLDAR PLÁSTICOS A TOPE”**

Presentado por:

VESELKA, DIEGO HERNÁN

Directora:

Dra. PATRICIA M. FRONTINI

Co-director:

Ing. JUAN CARLOS BELMONTE



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

ÍNDICE

Capítulo 1: Introducción y conceptos generales

1.1. Introducción.....	4
1.2. Objetivos.....	5
1.3. Conceptos generales	
1.3.1. Soldadura de termoplásticos.....	5
1.3.1.1 . El proceso de soldadura por termofusión: soldadura por termofusión a tope y sus variables principales...	6
1.3.1.2. Ventajas y desventajas de uniones por termofusión.....	8

Capítulo 2: Diseño del dispositivo

2.1. Reconocimiento de la necesidad.....	11
2.2. Definición del problema.....	12
2.3. Diseño del dispositivo.....	13
2.3.1. Tipo de dispositivo.....	13
2.3.2. Sistema de deslizamiento de las partes móviles.....	14
2.3.3. Placa termofusora y sistema de control de temperatura.....	16
2.3.3.1. Proceso de teflonado de la placa.....	17
2.3.4. Sistema de movimiento de placa termofusora.....	18
2.3.5. Sistema de medición y control de carga.....	19
2.3.5.1. Principio de funcionamiento del sistema.....	20
2.3.5.2. Medición de la deformación de los resortes.....	21
2.3.5.3. Diseño del resorte.....	23
2.3.6. Alineación y amarre de las piezas a soldar.....	25

Capítulo 3: Procesamiento

3.1. Características generales del PE.....	27
3.2. Análisis térmico del PE: determinación de la temperatura de fusión.....	28
3.3. Conformado mediante la aplicación de presión	

y temperatura elevada.....	30
3.4. Soldadura por termofusión.....	31
3.5. Elección de las variables de proceso: Diseño de experimento.....	32

Capítulo 4: Comportamiento tensión-deformación (o Caracterización mecánica o Evaluación de propiedades mecánicas)

4.1. Respuesta a la tracción.....	33
4.2. Procedimiento experimental.....	34
4.3. Resultados y discusión.....	34
4.3.1. Eficiencia de soldadura.....	38
4.3.2. Análisis de la varianza: Relación entre las variables de procesamiento y la resistencia mecánica.....	40

Capítulo 5: Conclusiones.....44

Capítulo 6: Bibliografía y referencias.....45

Capítulo 7: Anexos.....46

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS GENERALES

1.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la soldadura de polímeros y compuestos de polímeros son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones. La unión por fusión, o soldadura térmica, es una tecnología que se ha establecido en la industria de los termoplásticos, donde la eficiencia de las juntas soldadas puede aproximarse a las propiedades del material de partida de los componentes a unir.

Con el aumento y la aparición de nuevos materiales plásticos, el estudio de la prestación de las uniones soldadas y la del material base ha sido de gran importancia para poder utilizar las piezas como componentes estructurales. Sin embargo, la mecánica del proceso de soldadura, junto con sus efectos sobre la estructura del material, sigue bajo investigación.

Uno de los métodos más sencillos y utilizados es la unión por termofusión a tope “Hot Plate Welding”. Una vez que las interfaces de las piezas a soldar están suficientemente fundidas o ablandadas, la placa caliente se remueve y las piezas se juntan bajo presión para formar la unión. En el proceso de soldadura se aplica una carga axial a las piezas durante el calentamiento y unión/ciclo de enfriamiento.

Por eso es de suma importancia poseer un equipo a nivel laboratorio para evaluar los parámetros óptimos de soldadura.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto fue la construcción de un dispositivo o máquina que permita estudiar, en un futuro, las condiciones óptimas de soldadura de materiales plásticos para nuevas aplicaciones.

Como ejemplo de aplicación se optimizaron los parámetros de soldadura del Polietileno (PE) de media y alta densidad.

1.3. CONCEPTOS GENERALES

1.3.1. Soldadura de termoplásticos

Se han desarrollado muchos medios de soldadura de plásticos, cada uno con ventajas propias. Se pueden hacer juntas soldadas de una gran variedad de materiales, geometrías y tamaños. Además, se pueden unir materiales distintos si son compatibles.

Todas las técnicas de soldadura se desarrollan a través de tres etapas comunes:

- *Primera etapa:* implica la formación de un material fundido (capa de material fundido) en las superficies a unir. Esta capa no necesita ser grande en volumen, pero debe existir para que las cadenas del polímero se fundan en la unión.
- *Segunda etapa:* las partes se unen bajo presión. Al ejercer presión sobre el volumen fundido se asegura la homogeneización a través de la mezcla del material en la línea de soldadura.
- *Tercera etapa:* el producto de la fusión se deja enfriar, mientras que la presión se debe mantener para evitar vacíos dentro de la soldadura.

Los procesos de soldadura de plásticos pueden dividirse en dos grandes grupos según Stokes (Stokes, 1989):

- Procesos que involucran movimiento mecánico – soldadura por ultrasonido “ultrasonic welding”, soldadura por fricción “friction welding”, soldadura por vibración “vibration welding”.

- Procesos que involucran calentamiento externo – soldadura por termofusión “hot plate welding”, soldadura con gas caliente “hot gas welding” y soldadura con insertos de metales “implant welding”

1.3.1.1. El proceso de soldadura por termofusión: soldadura por termofusión a tope y sus variables principales

El principio de la *soldadura por termofusión* consiste en calentar dos superficies hasta una temperatura superior a la T_g (temperatura de transición vítrea para plásticos amorfos) o T_m (temperatura de fusión para plásticos semi-cristalinos) del polímero a soldar para garantizar que las superficies se ablanden o fundan.

El proceso de *soldadura por termofusión a tope* consiste en calentar las partes de las piezas a soldar con una placa termofusora controlada termoestáticamente hasta que sus superficies se fundan, como muestra la Figura 1.1.a. Esto se debe hacer con bajas presiones, dado que, las superficies ablandadas se deforman fácilmente por exceso de presión. Las piezas luego son retiradas del calor (alejadas de la placa termofusora) como se observa en la Figura 1.1.b. Las superficies ablandadas se juntan por medio de una fuerza externa, Figura 1.1.c – el exceso de presión en este paso haría que el material fundido se desplace y forme así una “mala” unión.

La presión aplicada durante el proceso hace que fluyan los extremos fundidos de las piezas, se mezclen y se fusionen. En el enfriamiento de las uniones, las moléculas recuperan el arreglo molecular que poseían en estado sólido (amorfo o semicristalino), las interfaces originales desaparecen y, finalmente, las dos piezas se convierten en una sola pieza homogénea.

Este proceso se utiliza comúnmente para soldar extremos de tubos de plásticos utilizados en el sector del gas, distribución de agua y en las industrias químicas; en elementos de usos diarios como carcasas de aspiradoras, componentes para lavadoras y lavavajillas, partes de automóviles tales como, embases de líquidos de freno, luces traseras, luces indicadoras; entre otras aplicaciones.

(Joshi, <http://www.metalwebnews.com/howto/plastics/welding-plastics.pdf>)

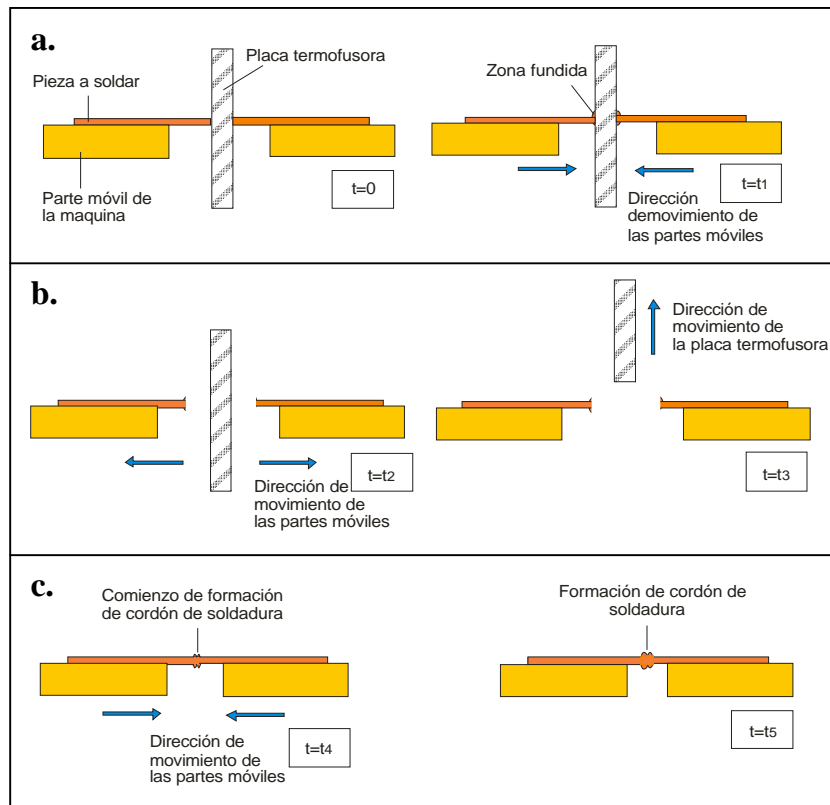


Figura 1.1: Proceso de soldadura por termofusión a tope.

Las operaciones que se realizan durante el proceso de unión son (Mistry, 1997):

- *Corte:* Los extremos de las piezas deben cortarse de manera que las superficies queden limpias, paralelas y parejas para que se ubiquen de manera perpendicular a la línea central de las piezas.
- *Sujeción:* Procedimiento mediante el cual se sujetan las piezas con firmeza, alineadas axialmente.
- *Alineación:* Los extremos de las piezas deben estar alineados entre sí para evitar un mal acoplamiento o errores de espesor en las paredes de la pieza final.
- *Calentamiento:* Los extremos de las piezas deben calentarse hasta lograr una zona fundida. El calentamiento se realiza con una placa termofusora.
- *Unión:* Las piezas con los extremos fundidos deben unirse con una fuerza determinada. La fuerza debe ser constante alrededor de la zona de la interfaz.
- *Sujeción:* Se debe inmovilizar la unión fundida con una fuerza determinada hasta que se enfríe.

Los principales parámetros de soldadura son: temperatura de la placa termofusora, tiempo de calentamiento, presión de soldadura y ciclo de enfriamiento. Las condiciones dependen mucho del tamaño del área de la junta y del tipo de plástico que se va a soldar.

1.3.1.2. Ventajas y desventajas de uniones por termofusión a tope

Las ventajas y desventajas que presentan las uniones por termofusión son según Molinaro (Molinaro, 2000):

- *Materiales adicionales:* La soldadura por termofusión no necesita elementos adicionales tales como material de aporte, sujetador, inserto, preformas electromagnéticas, adhesivos o solventes. Por lo tanto, su costo es más bajo que otros métodos que cumplen con los mismos requisitos.
- *Facilidad de montaje:* La soldadura por termofusión solo requiere la colocación de las dos partes de la pieza en el soporte de la soldadura.
- *Tipo de unión:* La soldadura por termofusión crea uniones del tipo permanentes que no pueden ser reabiertas sin dañar las partes. Bajo condiciones ideales, se puede obtener uniones con resistencias equivalentes a las paredes adyacentes.
- *Materiales:* El proceso permite soldar la mayoría de los materiales termoplásticos incluyendo los semicristalinos. En algunos casos se pueden soldar materiales disímiles utilizando dos placas termofusoras a distintas temperaturas (por ejemplo se puede soldar PEI con PC, PC con PBT).
- *Calidad de Sellos:* La soldadura crea excelentes sellos herméticos, que suelen ser un requisito para sus aplicaciones.
- *Atmósfera limpia:* Contrariamente a los sistemas de unión con adhesivos y solvente, no son necesarios equipos de ventilación para remover humos tóxicos

con la mayoría de los materiales que se sueldan a baja temperatura por termofusión.

- *Velocidad de producción:* Puede trabajarse a altas velocidades de producción con piezas pequeñas, sobre todo si se sueldan múltiples piezas en cada ciclo.
- *Libertad de proceso:* Se pueden soldar por termofusión una gran variedad de piezas termoplásticas. Si bien los rellenos (cargas) y los aditivos pueden afectar la soldabilidad de las piezas.
- *Proceso silencioso:* No se encuentra presente el ruido asociado con las soldaduras de ultrasonido, vibración y “spin”.
- *Limitaciones geométricas:* Este proceso permite soldar grandes piezas y paredes internas. El tamaño de la pieza está limitado solamente por el tamaño de la placa termofusora. Además, se puede hacer prácticamente cualquier forma de pieza incluyendo paredes finas.
- *Costo energético:* La soldadura por termofusión tiene aparejado un alto costo en la energía utilizada comparada con otros procesos de soldadura.
- *Puesta en marcha:* En la puesta en marcha, se debe esperar que la placa termofusora alcance la temperatura de trabajo y se estabilice. El tiempo puede oscilar entre 15 y 30 minutos, durante el cual el calor no es utilizado en la producción.
- *Tensionado de piezas:* El proceso puede causar tensiones residuales en el área de unión y generar fisuras. Sin embargo, otros métodos como ultrasonido y “spin” producen una cantidad mayor aún de fisuras.
- *Residuo generado:* En la superficie de la placa se acumula material fundido y se debe limpiar para no interferir en la soldadura de otros materiales.

- *Costo del equipo:* Los equipo de soldadura por termofusión son menos costosos que los equipos de producción de soldadura por vibración para tamaños de piezas equivalentes. En cambio, tienen un costo más elevado que los equipos de soldadura por ultrasonido y por rotación “spin”

Capítulo 2: DISEÑO DEL DISPOSITIVO

2.1. RECONOCIMIENTO DE LA NECESIDAD

La unión o el montaje de componentes poliméricos es un paso crítico en la fabricación de piezas poliméricas complejas que no pueden ser procesadas por otro método (Figura 2.1). Con el aumento de la demanda de plásticos y sus compuestos utilizados como componentes estructurales, los requerimientos de unión entre ellos han aumentado. La unión por fusión, o soldadura térmica, es una tecnología que se ha establecido en la industria de los termoplásticos, donde la eficiencia de las juntas soldadas pueden aproximarse a las propiedades del material de partida de los componentes a unir (Stokes, 1989).

Los termoplásticos se utilizan cada vez más en aplicaciones en las que están sometidos a cargas durante largos períodos de tiempo. En varias de estas aplicaciones hay juntas de termoplásticos fusionados como parte de estructuras, por lo que la resistencia e integridad a largo plazo dependen, en parte, de la resistencia de la junta fusionada. La elección apropiada del material y las condiciones en el proceso de unión deben, por lo tanto, garantizar que la estructura o artefacto mantenga la integridad para la vida del diseño deseado (Bowman, 1997).



Figura 2.1: Piezas soldadas por termofusión.

Con el fin de realizar un estudio preciso y sistemático de las variables de soldadura óptimas para cada material y aplicaciones particulares es necesario disponer de un dispositivo que permita variar y controlar todos los parámetros en el proceso de unión.

2.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El dispositivo que se construirá para soldar por termofusión a tope a nivel laboratorio deberá ser capaz de:

- Simular el proceso de soldadura realizada en campo, teniendo además, un control minucioso de las condiciones y parámetros de soldadura.
- Soldar piezas de diversos espesores.
- Poseer una herramienta encargada de proporcionar calor para la fusión, con un área adecuada para cubrir los extremos de las piezas a soldar.
- Controlar la temperatura de fusión del material a soldar, con un error menor al 1%.
- Evitar que el material se adhiera a la superficie de la herramienta.
- Efectuar una presión interfacial suficiente.
- Poseer un sistema que permita controlar todas las presiones de proceso.
- Poder manejar los mismos tiempos de proceso que los utilizados en la práctica, ya que estos son fundamentales para lograr una soldadura óptima.
- Ser práctica y de fácil uso.
- Permitir la construcción a un costo razonable.

2.3. DISEÑO DEL DISPOSITIVO

2.3.1. Tipo de dispositivo

El primer punto a tener en cuenta cuando se diseña un dispositivo (Shigley, 1983) que va a aplicar fuerzas o presiones, y además, cuantificar los esfuerzos, es definir el sistema de control. Este puede establecerse por carga o por desplazamiento. En un principio se analizó la idea de controlar por desplazamiento, pero en el momento de unir las piezas se produce un desalajo de material fundido (formación del cordón de soldadura). Esta acción apareja un desplazamiento que no debe ser tenido en cuenta en la medición, por lo que se optó por el control por carga.

En este sistema de control por carga la fuerza la imponen 4 resortes de constante conocida. Mediante la ecuación de los resortes y sabiendo el desplazamiento de los mismos podemos inducir la fuerza que se quiere aplicar. Es decir, si se desea aplicar una fuerza “F” en las placas a soldar, se debe girar la manivela hasta que los resortes se compriman una longitud $\bullet = F/k$, donde “k” es la constante del resorte.

Luego de definir el sistema de control y las dimensiones de las piezas a soldar se procedió a diseñar las partes que van a componer el dispositivo para su posterior construcción. Ver Figura 2.2 y 2.3.

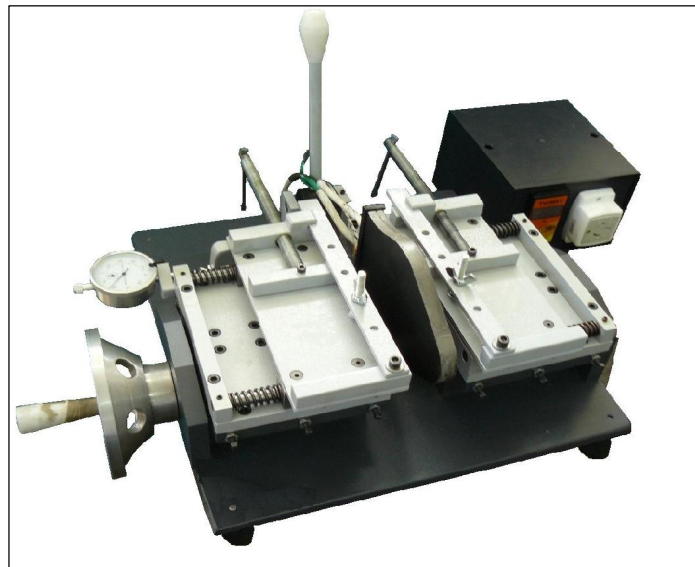


Figura 2.2: Foto del dispositivo terminado.

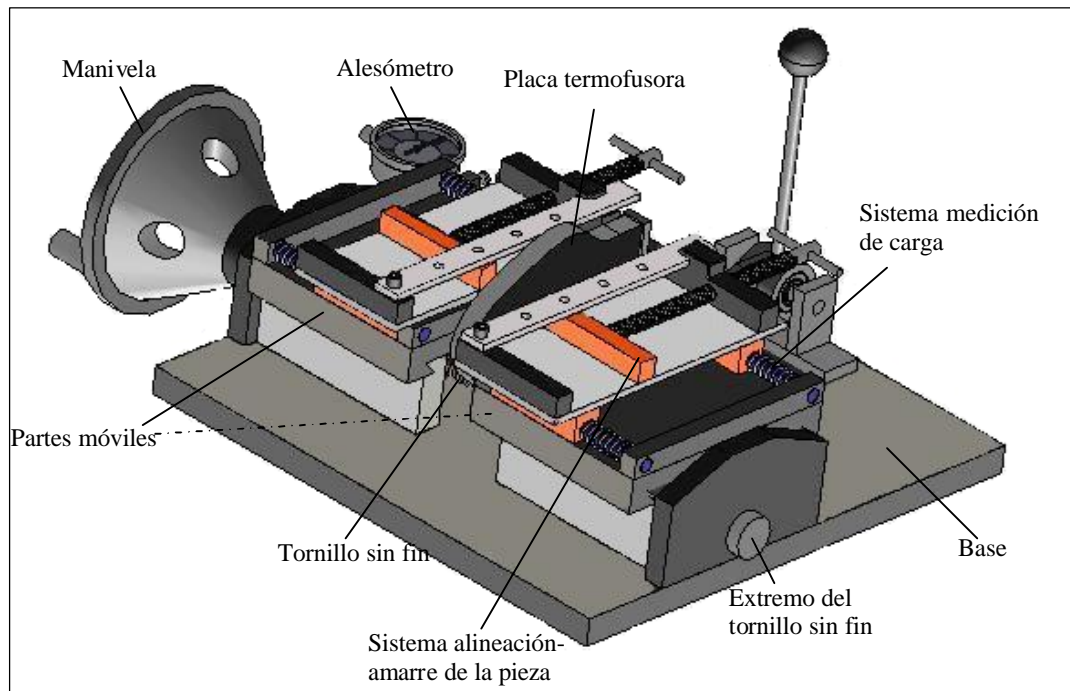


Figura 2.3: Imagen del dispositivo con la descripción de todas las partes

2.3.2. Sistema de deslizamiento de las partes móviles

El sistema de deslizamiento está constituido principalmente, por un tornillo “sin fin de doble sentido”, dos placas móviles y cuatro guías. El sistema garantiza la linealidad de las piezas a soldar.

El tornillo “sin fin de doble sentido” posee la mitad del tornillo con paso de rosca en sentido positivo a las agujas del reloj y la otra mitad en sentido contrario o negativo a las agujas del reloj. Este permite que las dos partes móviles se puedan acercar o alejar cuando se hace girar la manivela de aluminio que se encuentra en el extremo del tornillo, como se puede observar en la Figura 2.4.

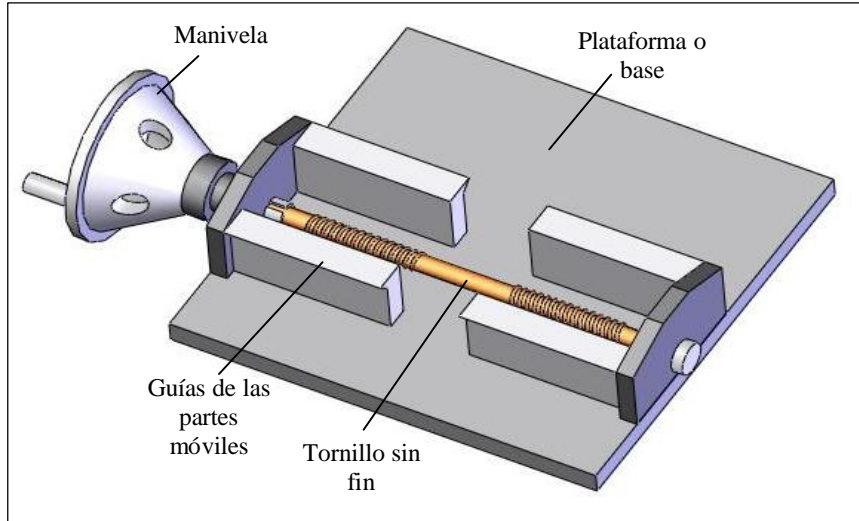


Figura 2.4: Base y sistema de deslizamiento de las partes móviles.

Se adherieron chapas de bronce a las guías que hacen contacto con las partes móviles para disminuir la fricción y permitir un mejor deslizamiento de las mismas. (Figura 2.5).

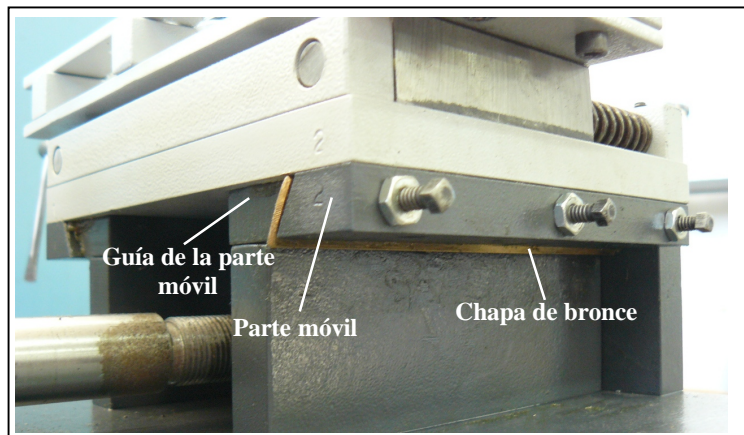


Figura 2.5: Foto de la guía con la chapa de bronce adherida.

Las placas móviles se diseñaron con un ángulo de amarre entre las guías y la base por donde sujeta al tornillo (Figura 2.6) para facilitar el desplazamiento y asegurar la linealidad.

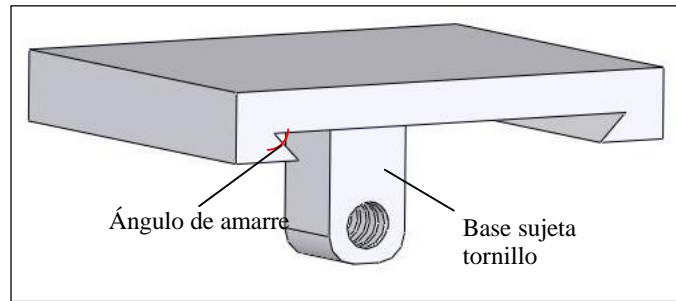


Figura 2.6: Placa móvil.

2.3.3. Placa termofusora y sistema de control de temperatura

Se eligió una placa termofusora comercial de fundición de aluminio la cual posee una resistencia en su interior y un controlador de temperatura por medio de una termocupla. El sistema de calefacción y control se realiza mediante un pirómetro TW 201 (marca Tarewa) el cual tiene una precisión de 0,5 % con fondo de escala +/- 1 °C.

Es de suma importancia que las caras de la placa termofusora se encuentren paralelas entre sí, dado que, cuando se ejerce la presión de las piezas a soldar contra la herramienta caliente puede que:

- Parte de la pieza no quede en contacto con la herramienta (Figura 2.7, a y b).
- Quede una zona con mayor presión provocando que el material se desplace cuando se produce la fusión del mismo, dando como resultado una soldadura incompleta (Figura 2.7, c y d).

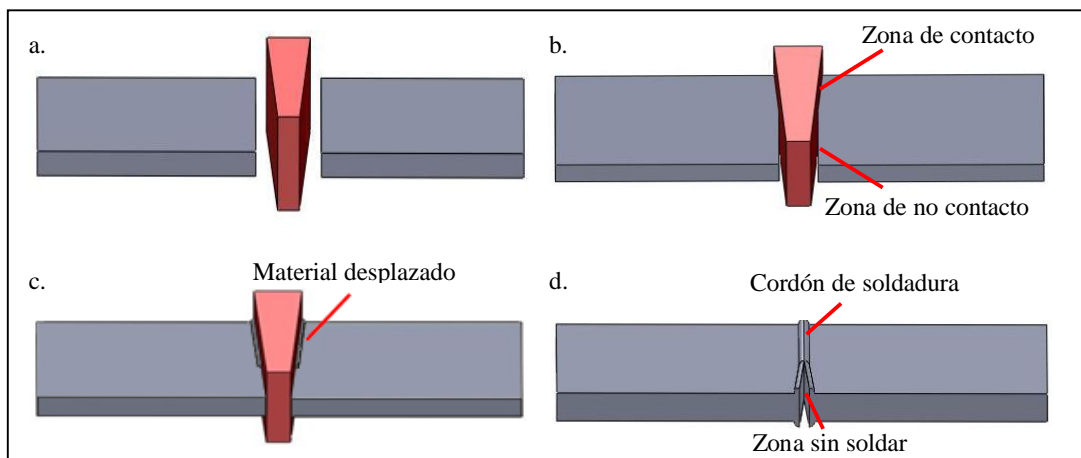


Figura 2.7: a- Momento inicial. b- Momento en que se ejerce presión en la pieza quedando zonas de contacto y zonas que no. c- Zonas con desplazamiento de material en momento de fusión del mismo. d- Soldadura no completa de la pieza.

Corridas preliminares revelaron que la placa presentaba un defecto de fabricación no admisible: sus caras no eran paralelas. Se rectificó ambas superficies y se las recubrió con teflón “PTFE” para evitar que el material se adhiera a la placa calefactora y facilitar la extracción de la misma.

2.3.3.1. Proceso de recubrimiento con teflón de la placa

El proceso de recubrimiento con Teflón implica cuatro etapas bien diferenciadas: desengrase, arenado, aplicación y curado.

Desengrase: Se debe eliminar cualquier resto orgánico o inorgánico que pueda afectar a la adherencia del recubrimiento al sustrato. El desengrase se puede realizar bajo medio alcalino ó ácido, con disolventes o mediante pirolisis controlada. El método a utilizar depende del tipo de pieza, las cantidades y la naturaleza de la contaminación, en este caso se realizó un desengrase alcalino.

Arenado: Después del desengrase se prepara la superficie a recubrir para garantizar la adherencia del Teflón. Esto se consigue mediante un chorreado con óxido de aluminio (corindón). El arenado genera en la superficie a tratar una rugosidad determinada que constituye la base óptima para una adherencia mecánica y química.

Aplicación: Una vez arenada la pieza se procede a recubrir la misma. La aplicación del Teflón se efectúa mediante una pistola de polvo. Durante el proceso se pueden aplicar varias capas de producto.

Curado: Para que el Teflón tenga todas sus propiedades, se polimeriza el recubrimiento. Para polimerizar el Teflón se necesita alcanzar alrededor de los 380 °C (temperatura del metal) durante 10 minutos.

2.3.4. Sistema de movimiento de placa termofusora

El sistema está compuesto principalmente por un soporte, fijo a la placa termofusora en un extremo y a un rodamiento de doble efecto en el otro extremo. Por el interior del rodamiento pasa un eje que está sujeto a dos bases (soportes de eje), Figura 2.8.

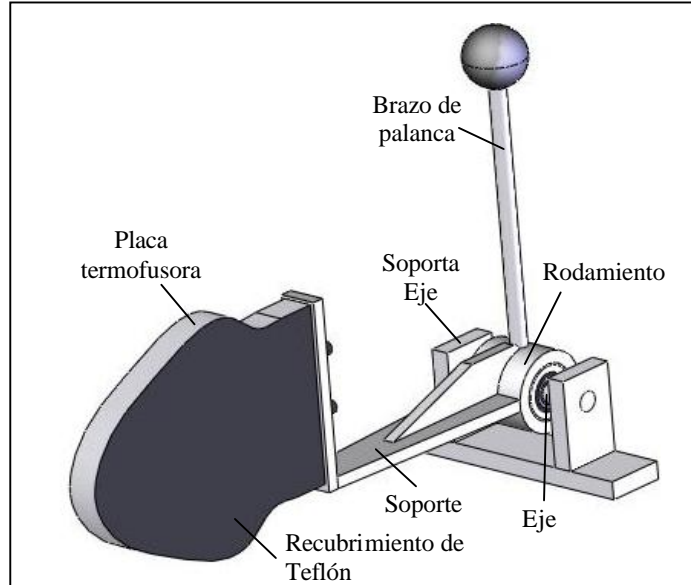


Figura 2.8: Esquema detallado del sistema de movimiento de la placa termofusora

El rodamiento de doble sentido permite a la placa calefactora realizar movimientos en dos direcciones: vertical y horizontal (Figura 2.9).

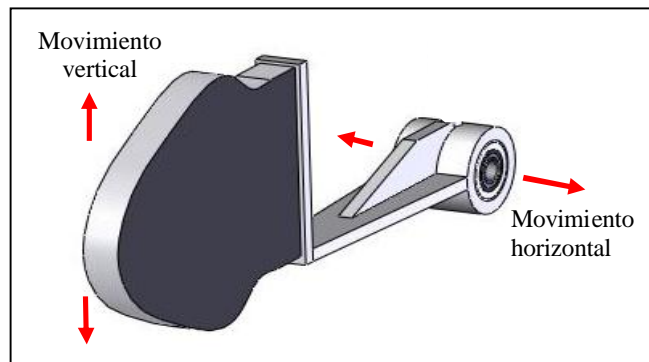


Figura 2.9: Direcciones de movimiento de la placa termofusora

El movimiento sobre el eje vertical se realiza en forma manual, a través de un brazo de palanca. Este permite retirar la placa luego de haber realizado el calentamiento de las piezas a soldar (Figura 2.8).

El movimiento sobre el eje horizontal es el que permite que se ejerza la misma presión en las dos piezas contra la placa calefactora. Es decir, si en el momento previo a realizar el calentamiento (desplazamiento de ambas piezas contra la placa calefactora), una de las piezas hiciera primero contacto con la placa, ésta se desplazará en sentido horizontal hasta hacer contacto con la otra pieza y permitir en ese momento que ambas

ejerzan la misma presión contra la herramienta calefactora. La Figura 2.10 representa un esquema del movimiento horizontal.

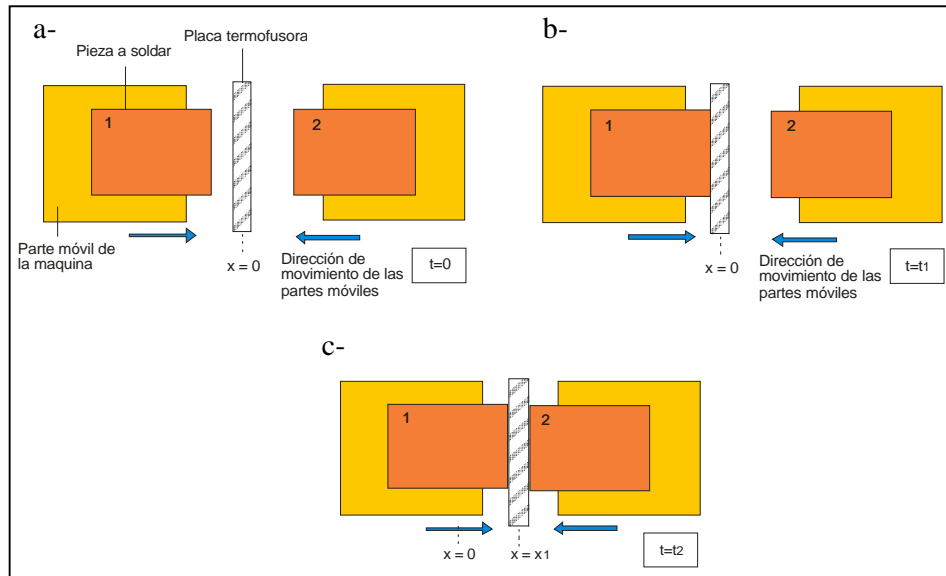


Figura 2.10: a- Momento inicial ($t=0$), las piezas se desplazan hacia la placa calefactora- Posición de la placa $x=0$. b- Momento intermedio ($t=t_1$), la pieza hace primer contacto contra la placa- $x=0$. c- Momento final ($t=t_2$), la pieza 1 arrastra la placa calefactora hasta que esta hace contacto con la pieza 2 y comienzan a ejercer presión las dos piezas simultaneas, contra la placa- $x=x_1$.

2.3.5. Sistema de medición y control de carga

El sistema de medición de carga se diseñó bajo el principio básico de la Ley de Hooke, donde las deformaciones elásticas son proporcionales a la fuerza aplicada.

Después de haber analizado las celdas de carga y el sistema de desplazamiento de resortes que trabajan bajo este principio, se consideró la medición de desplazamiento de resortes como la mejor opción, dado que se trataba de un sistema más económico y cumplía con los requerimientos del dispositivo.

2.3.5.1. Principio de funcionamiento del sistema

La Ley de Hooke afirma que la deformación elástica que sufre un cuerpo es proporcional a la fuerza que produce la deformación, siempre y cuando no se sobrepase el límite de elasticidad.

La fuerza recuperadora del resorte es proporcional a la elongación y de signo contrario (la fuerza de deformación se ejerce hacia la derecha y la recuperadora hacia la izquierda) La expresión de la ley es la siguiente:

$$F(x) = -k \cdot x, \quad \text{siendo } k = A \cdot E / L$$

Donde:

- k : constante del resorte (también constante de rigidez)
- x : separación de su extremo respecto a su longitud natural
- A : sección del cilindro imaginario que envuelve el muelle
- E : módulo de elasticidad del muelle (no confundir con el módulo de elasticidad del material)

El sistema de medición de carga se diseñó con resortes helicoidales de constante conocida. Con esta constante y la medición del desplazamiento, podemos determinar la carga.

Los resortes se encuentran sujetos por un eje de diámetro externo. Este es levemente inferior al diámetro interno del resorte para evitar que pandeen cuando se los comprime contra el soporte del eje (fijo) y el soporte del buje (lugar donde va sujeta la base que permite el amarre de las piezas a soldar). Figura 2.11.

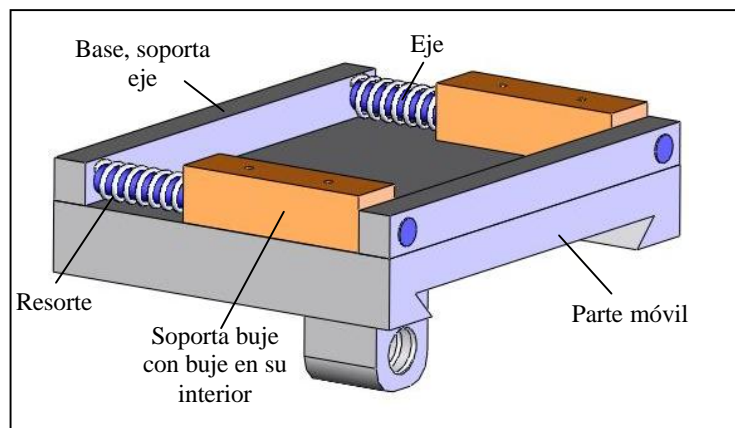


Figura 2.11. Descripción de las partes que componen el sistema de medición de carga.

2.3.5.2. Medición de la deformación de los resortes

Como se dijo anteriormente, para aplicar una fuerza “F” entre las piezas a soldar en el sistema de control por carga, se debe deformar o comprimir 4 resortes una longitud $\bullet = F/k$. La medición de la deformación de los resortes se realiza mediante un alesómetro o comparador.

El sistema está ubicado en la parte superior de cada una de las partes móviles del dispositivo, como se puede observar en la Figura 2.12.

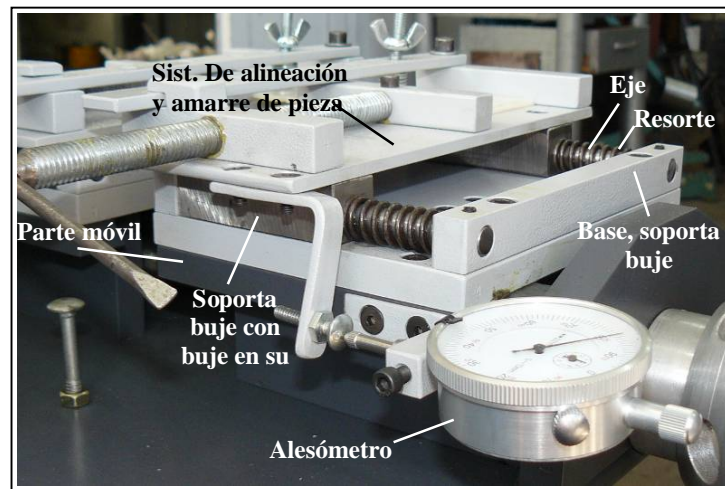


Figura 2.12: Sistema de medición de desplazamiento.

Cada una de las partes móviles está compuestas por:

- Dos resortes, los cuales se utilizan para realizar la fuerza en la unión de las piezas a soldar.
- Dos juegos de bujes de bronce que se encuentran cada uno se dentro de un porta buje de sección cuadrada de tamaño suficiente para permitir que se adhiera (por medio de tornillos) la placa donde se realiza el amarre y la alineación de la pieza a soldar.
- Par de ejes sujetos a dos bases (soporta ejes).

Se utilizaron bujes de bronce para disminuir la fuerza de roce contra los ejes.

Figura 2.13.



Figura 2.13. Foto del porta bujes.

La lectura del desplazamiento impuesto de los resortes se realiza a través un comparador o alesómetro de precisión 0,01 mm (ver Figura 2.14), el cual está fijo a la parte móvil del dispositivo y mide el desplazamiento de la base donde se amarra la pieza a soldar (Figura 2.15). Entonces, para lograr aplicar una fuerza “F” se hace girar la manivela y así comprimir los resortes hasta que el alesómetro marque la longitud calculada de antemano ($\bullet = F/k$).



Figura 2.14: Alesómetro utilizado para medir la deformación de los resortes.

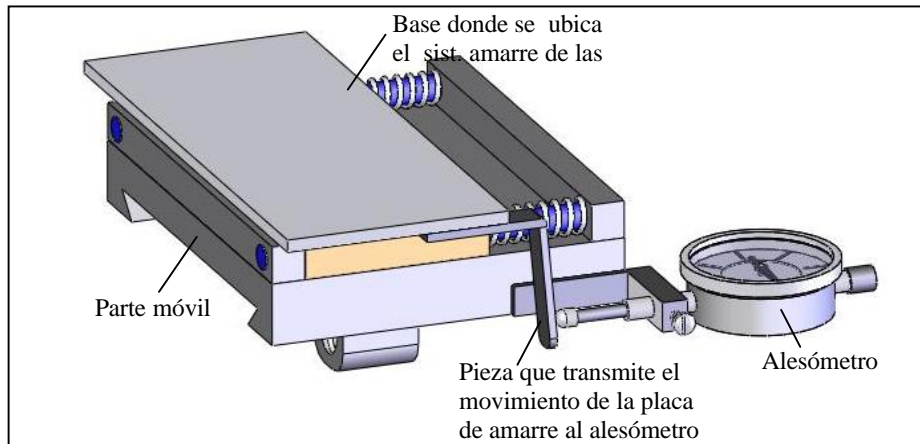


Figura 2.15: Sistema de medición del desplazamiento de los resortes.

2.3.5.3. Diseño del resorte

Tipo de resorte: Se eligió un resorte de tipo helicoidal a compresión, ya que tiene la ventaja con respecto a los de tracción de mantener constante la llamada “constante del resorte” a través del tiempo y los ciclos dado que presentan un impedimento físico que no permite que se sobrepasen los límites de elasticidad, siempre y cuando posean elevado el número de espiras con respecto a la longitud. Además poseen tanto el diámetro de espira como el paso constante y son fabricados con alambre redondo.

Análisis y elección del resorte: Se realizaron ensayos de compresión en una máquina de ensayos universal INSTRON 4467 a temperatura ambiente de 4 tipos de resortes diferentes para definir y determinar la geometría y los parámetros generales.

Por medio de los ensayos de compresión uniaxial se obtuvieron los valores de “k” (pendiente de la recta carga vs. desplazamiento en rango elástico), ver Figura 2.16, y mediante la ecuación del resorte y longitud de compresión máxima (•) de cada uno, se determinó la carga de trabajo máxima de los resortes. La tabla con los valores calculados para los distintos resortes se encuentra en el Anexo (tabla con los ensayos de los distintos resortes).

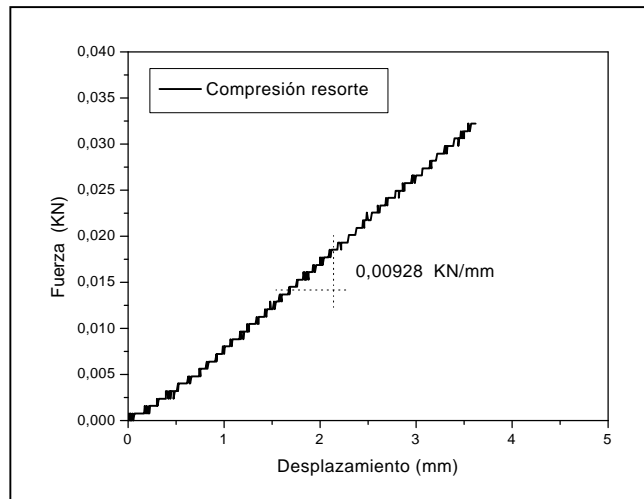


Figura 2.16: Gráfico carga-desplazamiento del resorte en compresión.

Carga de trabajo total: Se considero la presión máxima de trabajo según Norma ASTM F 2620-06 y el área máxima a soldar de las piezas.

Presión de trabajo (P): 6,32 Kgf/cm²

Área a soldar (A): 8 cm² (1 cm de espesor x 8 cm de ancho)

Carga de trabajo (F): 50,56 kgf (ecuación del resorte: $P=F/A$)

Como el dispositivo fue diseñado para trabajar con cuatro resortes en paralelo, se multiplicó por cuatro la carga de trabajo máxima de cada resorte y se la comparó con la carga de trabajo total calculada en el punto anterior.

Los parámetros del resorte, que satisface con todos los requerimientos, son los siguientes:

- Diámetro de alambre (d): 2,25 mm
- Diámetro exterior (D_0): 15 mm
- Diámetro interior (D_i): 10,5 mm
- Longitud libre (L_f): 41 mm “Longitud general del resorte en su estado no cargado”.
- Número de espiras (N_t): 8 mas 2 medias espiras en los extremos
- Paso de espiras (p): 2.6 mm
- Carga de trabajo (F): 14,29 Kgf “Carga que se aplica para comprimir aún más el resorte en su deflexión de trabajo”.

- Longitud mínima de trabajo (L_m): 26,1 mm “Dimensión más corta a la que se comprimirá el resorte durante su servicio”.
- Altura de cierre (L_s): 26,1 mm “Longitud el resorte de forma que todas sus espiras entren en contacto.
- Holgura de golpeo (y_{golpeo}): 14,9 mm “Diferencia entre la longitud mínima de trabajo y la altura de cierre y se expresa como un porcentaje de la deflexión de trabajo”.

El diámetro exterior (D_o), el diámetro interior (D_i) y la longitud libre interesan para definir el alojamiento del resorte.

2.3.6. Alineación y amarre de las piezas a soldar

El sistema está compuesto por tres mordazas (una móvil y dos fijas) como se puede observar en la figura 2.17. La alineación de la pieza se logró asegurando un contacto uniforme contra un tope de acero (que se muestra en la Figura 2.17) ubicado en un ángulo de 90° con respecto a la placa termofusora (mordaza fija “1”), por medio de un sistema de morsas de apriete manual.

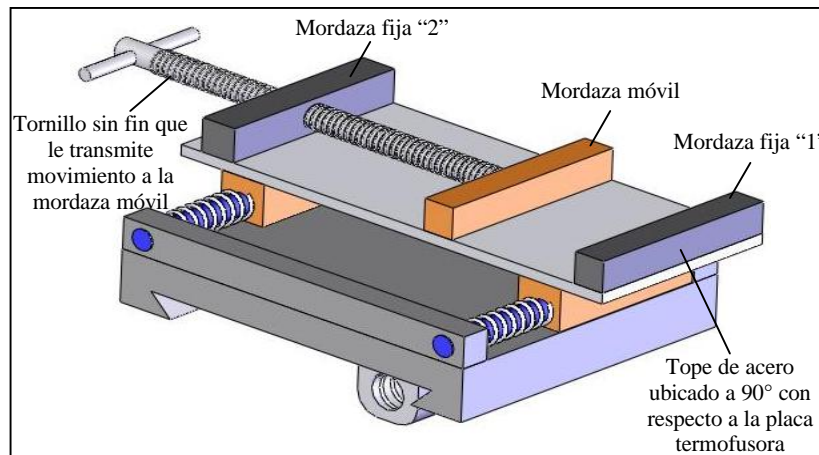


Figura 2.17. Sistema de alineación de la pieza a soldar

Al hacer girar el tornillo sin fin en dirección positiva a las agujas del reloj, la mordaza móvil se aproxima a la mordaza fija “1”, moviendo la pieza a soldar hasta lograr el contacto uniforme de ésta, contra el tope de acero. Este procedimiento permite no solo alinear la pieza sino también amordazarla. Figura 2.18.

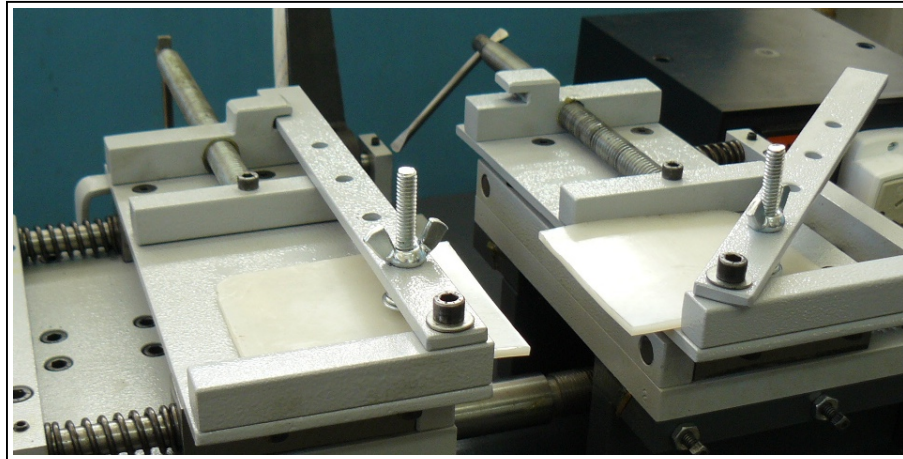


Figura 2.18: Foto del sistema con la pieza a soldar.

La planchuela de acero fija en la mordaza “1” se colocó para evitar que la pieza se levante cuando se realiza el amordazado lateral de la misma, en especial para piezas de bajo espesor. Ésta permite un movimiento angular, y posee un resorte sujeto por un perno en dirección perpendicular a la planchuela, el cual, se puede cambiar de posición y realiza una fuerza de empuje en el sentido vertical de la pieza cuando se la traba o amarra en la mordaza fija “2” (figura 2.19).

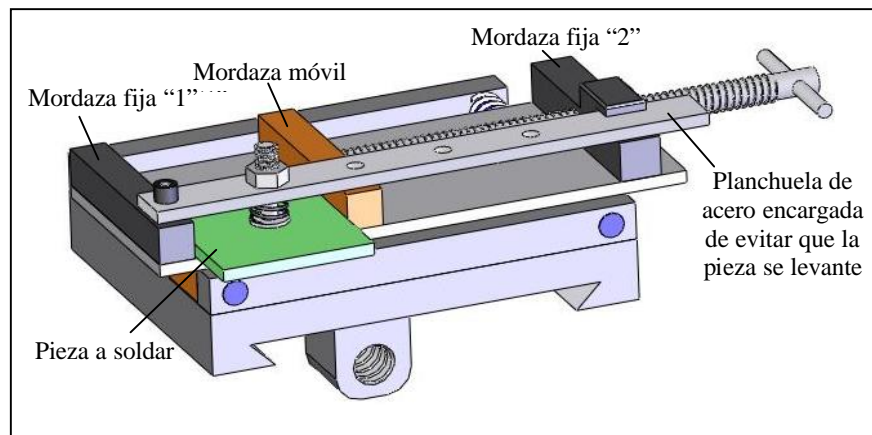


Figura 2.19. Alineación y amarre de la pieza.

Capítulo3: EJEMPLO DE APLICACIÓN: SOLDADURA DE PE

3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PE

El **polietileno** (PE) es el polímero más simple desde el punto de vista químico. Por su alta producción mundial es también el más barato, y uno de los plásticos más comunes. Es químicamente inerte y se representa con su unidad repetitiva $\{\text{CH}_2\text{-CH}_2\}_n$.

El PE se obtiene de la polimerización del etileno (formula química $\text{CH}_2=$), del cual deriva su nombre (ver Figura 3.1), y se produce básicamente mediante cuatro reacciones de polimerización diferentes: polimerización por radicales libres, polimerización aniónica, polimerización por coordinación de iones o polimerización catiónica. Cada uno de estos mecanismos de reacción produce un tipo diferente de polietileno. Estos productos tienen en común la estructura química fundamental, y en general tienen propiedades químicas de un alcano de peso molecular elevado.

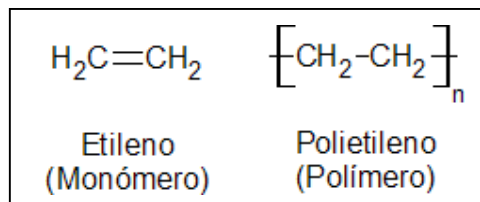


Figura 3.1: Formula química del monómero Etileno y la unidad repetitiva del polietileno.

En la polimerización de etileno pueden obtenerse productos con propiedades físicas muy variadas, dado que, pequeñas variaciones en la estructura molecular pueden mejorar o afectar considerablemente algunas de las propiedades. Las tres propiedades moleculares básicas (densidad, peso molecular promedio y distribución del peso molecular) son las que afectan a la mayoría de las propiedades esenciales en el uso de polietileno para obtener productos de buena calidad. Luego, se puede clasificar al PE, según la densidad, en:

- Polietileno de baja densidad (LDPE, Low-density polyethylene): 0,910 a 0,925 g/cm^3
- Polietileno de mediana densidad (MDPE, Medium-density polyethylene): 0,926 a 0,940 g/cm^3

- Polietileno de alta densidad (HDPE, High-density polyethylene): 0,941 a 0,965 g/cm³

El polietileno se creó para usarlo como aislamiento eléctrico, pero después ha encontrado muchas aplicaciones en otros campos, especialmente como película y envases. Este tipo de polímero se ha convertido en el principal material polimérico para el transporte de fluidos (Figura 3.2), como tuberías de agua y gas ya que presenta mayores ventajas en las propiedades con respecto a los metales, como por ejemplo, poseen menor peso, mayor resistencia química y a la corrosión, mayor facilidad de unión y transporte, menores costos de construcción y mantenimiento (Ezrin, 1996; Chen y colaboradores, 1997).

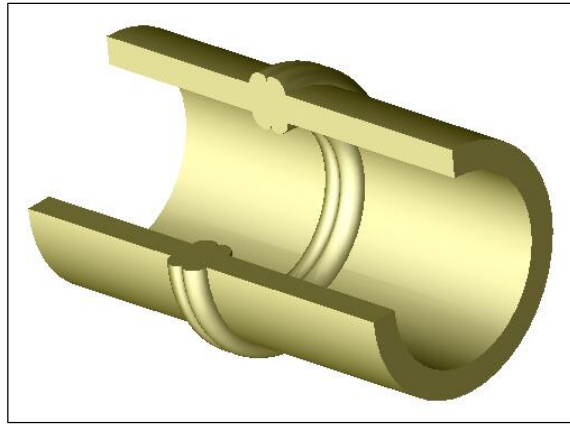


Figura 3.2: Dibujo de soldadura por termofusión en un tubo.

3.2. ANÁLISIS TÉRMICO DEL PE: DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE FUSIÓN

Para determinar la temperatura de fusión de los dos materiales utilizados (MDPE y HDPE), se realizó un análisis térmico, Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). En la calorimetría de barrido diferencial, la muestra y la referencia se someten a una temperatura que aumenta en forma continua; en este caso, se agrega calor sobre la muestra o la referencia, a modo de mantenerlas a una temperatura idéntica. El calor agregado que se registra, compensa el que se pierde o se gana como consecuencia de reacciones endotérmicas o exotérmicas que tienen lugar en la muestra.

Este análisis sirvió para identificar que ambos materiales presentaban temperaturas de fusión similares. Esto permitió utilizar la misma temperatura de la placa termofusora en el proceso de unión para los dos materiales, dado que la temperatura de fusión es la propiedad de mayor importancia en las uniones por termofusión. En las Figuras 3.3 y 3.4 se pueden observar los termogramas del HDPE y MDPE respectivamente, la temperatura de fusión $T_{\text{fusión}}$, se tomó como la temperatura del pico en el termograma.

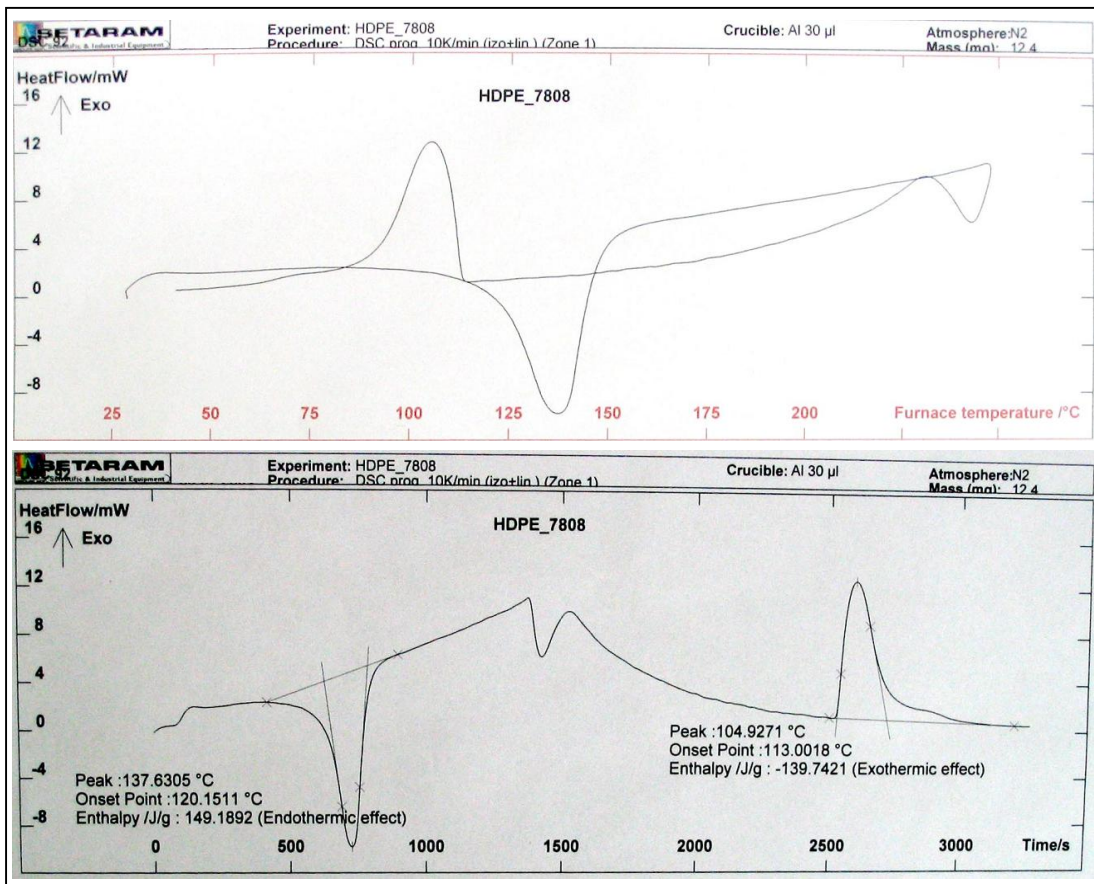


Figura 3.3: Termogramas del HDPE

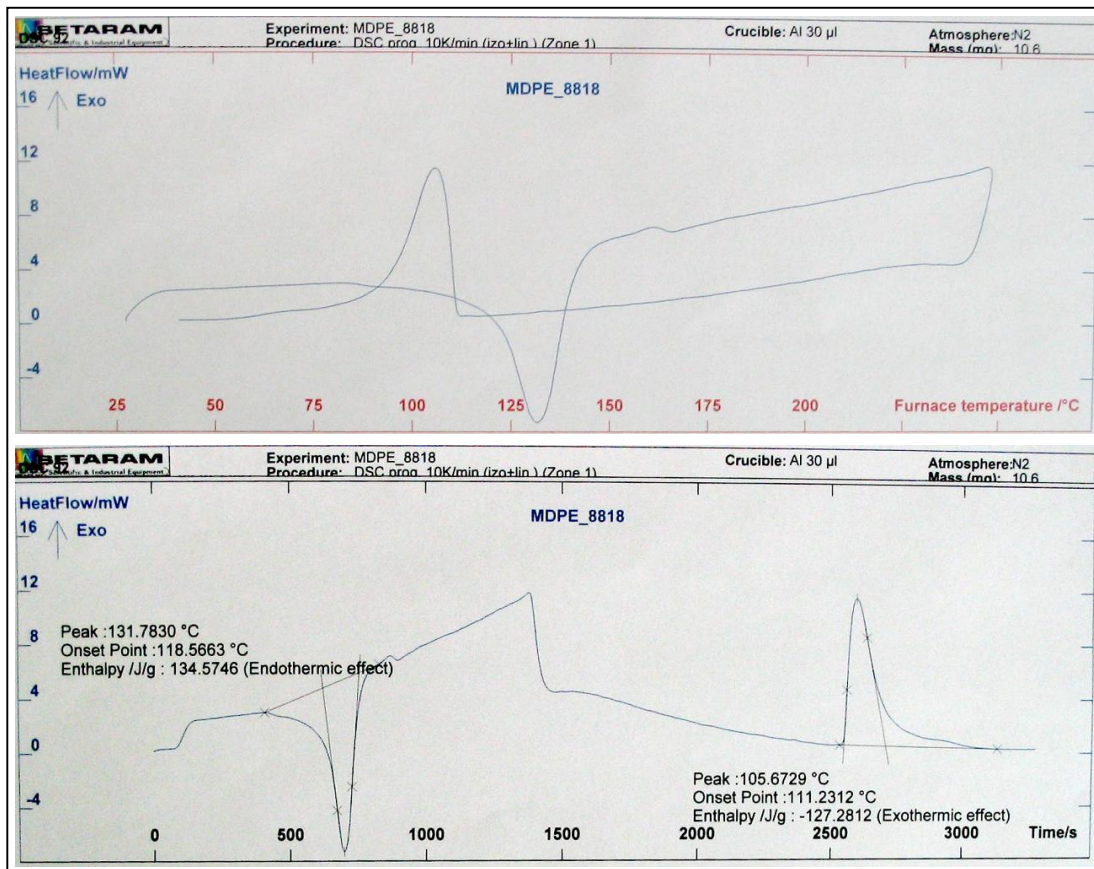


Figura 3.4: Termogramas del MDPE

3.3. CONFORMADO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE PRESIÓN Y TEMPERATURA ELEVADA

Se moldearon placas de 3 mm de espesor, a partir de las cuales se maquinaron las probetas destinadas a ensayos de tracción. El área de las placas fue de 197 x 147 mm.

La etapa de conformado, se realizó en una prensa hidráulica (Figura 3.5) mediante la cuál las muestras fueron moldeadas bajo compresión. El procedimiento aplicado comenzó con un calentamiento del molde hasta 180°C para el caso de MDPE y 200°C para HDPE. Luego, se colocó el material, previamente pesado, en el molde de la prensa y se lo presionó a 175 Kg/cm² con el objetivo de eliminar el aire. Después que la presión alcanzó un valor estable, se descomprimió hasta obtener la presión de moldeo de 35 Kg/cm². Se dejó en estas condiciones durante 20 minutos y se comenzó a enfriar mediante una corriente de agua forzada hasta 40°C. Finalmente, se calentó el molde a

80°C y se mantuvo a esa temperatura durante una hora, luego se enfrió dentro del equipo al aire. Este último paso requirió de muchas horas pero es de gran importancia para evitar que se originen tensiones térmicas.

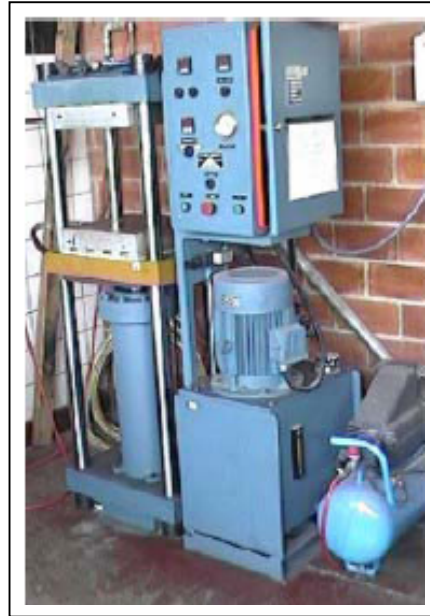


Figura 3.5: Prensa hidráulica

3.4. SOLDADURA POR TERMOFUSIÓN

Para realizar la soldadura se cortaron a la mitad las placas moldeadas por compresión, en forma perpendicular a uno de los bordes. El corte fue recto, limpio y se hizo instantes antes de comenzar con el proceso de soldadura para no dejar contaminantes en los bordes de las probetas a soldar y evitar la oxidación de las mismas que pudieran provocar una “mala” unión.

Una vez cortada la probeta, se alineó y sujetó en el amarre del dispositivo para comenzar con el proceso de soldadura explicado en el punto 1.3.1.1. (El proceso de soldadura por termofusión: soldadura por termofusión a tope y sus variables principales)

3.5. ELECCIÓN DE LAS VARIABLES DE PROCESO: DISEÑO DE EXPERIMENTO

Para diseñar el experimento se eligió un arreglo Taguchi L8 de 4 factores (Tabla 3.2). Este diseño de matriz permite determinar el efecto de las condiciones de procesamiento en la unión (soldadura) generada y las propiedades mecánicas finales, realizando la menor cantidad de experimentos. Se eligieron como factores: presión de soldadura (P_w), temperatura de placa termofusora (T_p), tiempo de enfriamiento (t_e , a presión constante) y tiempo de calentamiento de las piezas (t_c). El tiempo de calentamiento fue el tiempo necesario tal que permita un tamaño de la zona fundida o calentada (\bullet_c) adecuada para llevar a cabo el proceso de unión, es decir, fue el tiempo necesario para fundir 1 o 2.5 mm los extremos de las piezas a soldar.

Cada factor posee 2 niveles: valor máximo y mínimo. En la Tabla 3.1 se muestra los factores elegidos y los valores que se dieron a cada nivel. La elección de los factores y los valores, se basó principalmente en datos bibliográficos, Norma ASTM F 2620-06, y en experimentos anteriores.

Tabla 3.1: Factores en estudio y valores de cada nivel

Factor	P_w (Kg/cm ²)		T_p (°C)		t_e (s)		\bullet_c (mm)	
Nivel	1	2	1	2	1	2	1	2
Valor	4.218	6.32	204	232	37.5	112.5	1	2.5

Nota: El tiempo de enfriamiento (t_e) varía con el espesor de la placa, en este caso se consideró un espesor promedio de 3.5 mm.

En la Tabla 3.2 se muestra la matriz de diseño (Taguchi) rellena con los valores de las variables utilizados.

Tabla 3.2: Matriz de diseño

Corridas	1	2	3	4
	P_w (Kg/cm ²)	T_p (°C)	t_e (seg)	\bullet_c (mm)
1	4.218	204	37.5	1
2	4.218	204	37.5	2.5
3	4.218	232	112.5	1
4	4.218	232	112.5	2.5
5	6.32	204	112.5	1
6	6.32	204	112.5	2.5
7	6.32	232	37.5	1
8	6.32	232	37.5	2.5

Como puede observarse, se soldaron 8 grupos de probetas, el primer grupo con las variables correspondientes a la corrida 1 y así sucesivamente.

Capítulo 4: EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS SOLDADURAS

4.1. RESPUESTA A LA TRACCIÓN

El ensayo de tracción uniaxial es el método de ensayo experimental más ampliamente utilizado en la caracterización de propiedades mecánicas de los materiales. Este tipo de sollicitación puede obtenerse imponiendo a una probeta un alargamiento en la dirección de su eje principal a una velocidad de desplazamiento de los extremos constante. Del registro completo del ensayo se puede obtener información acerca de las propiedades elásticas del material, el carácter y extensión de la deformación plástica y la resistencia a la fluencia.

Es posible graficar la curva de tensión nominal (σ_n) vs. elongación (ϵ), donde

$$\sigma_n = P/tW \quad \epsilon = \delta/L_0$$

Siendo P la carga, t el espesor de la probeta, w su ancho, δ el desplazamiento y L_0 la longitud inicial entre mordazas. De la curva pueden identificarse los valores de tensión de fluencia (σ_f) y elongación máxima (ϵ_b), Figura 4.1.

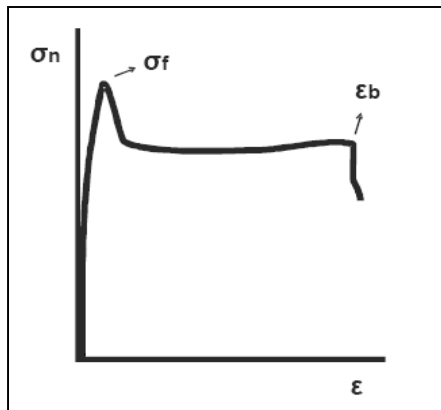


Figura 4.1: Identificación de σ_f y ϵ_b en la curva tensión-elongación.

4.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A partir de placas moldeadas de 3.5 mm de espesor y soldadas por termofusión, se mecanizaron probetas en forma de huesito con la geometría que se muestra en la Figura 4.2. Las medidas fueron de 5 mm de ancho en la sección calibrada, mientras que la longitud de dicha sección fue de 25 mm.

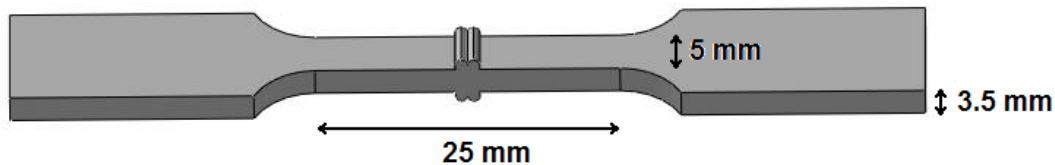


Figura 4.2: Dimensiones de las probetas para el ensayo de tracción.

Los ensayos se realizaron en una máquina de ensayos universal INSTRON 4467 a temperatura ambiente y a una velocidad de travesa de 50 mm/min.

Por medio de los ensayos de tracción uniaxial se obtuvieron los valores de la tensión de máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$).

Se utilizó un extensómetro dinámico con una carrera de 200 mm. La longitud inicial entre los extremos calibrados (*pins*) del extensómetro (L) fue de 16 mm.

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron ensayos de tracción sobre los ocho grupos de muestra para cada polímero con las condiciones de procesamiento indicadas en la Tabla 3.2 (Tabla - diseño de experimento Taguchi). Se trabajó con cuatro probetas de cada grupo, dos con cordón y dos sin cordón de soldadura para determinar el efecto del mismo sobre la resistencia en tracción. Ver Figura 4.3.

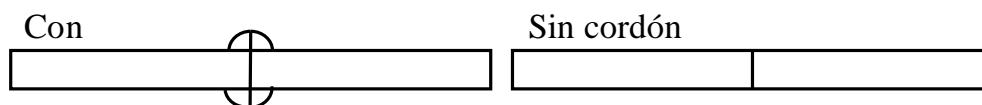


Figura 4.3: Probeta con cordón y sin cordón.

A continuación se presentan las curvas tensión-elongación del MDPE de las 8 corridas que se realizaron tanto para las probetas con y sin cordón, y del material base sin soldar (Figuras 4.4, 4.5 y 4.6).

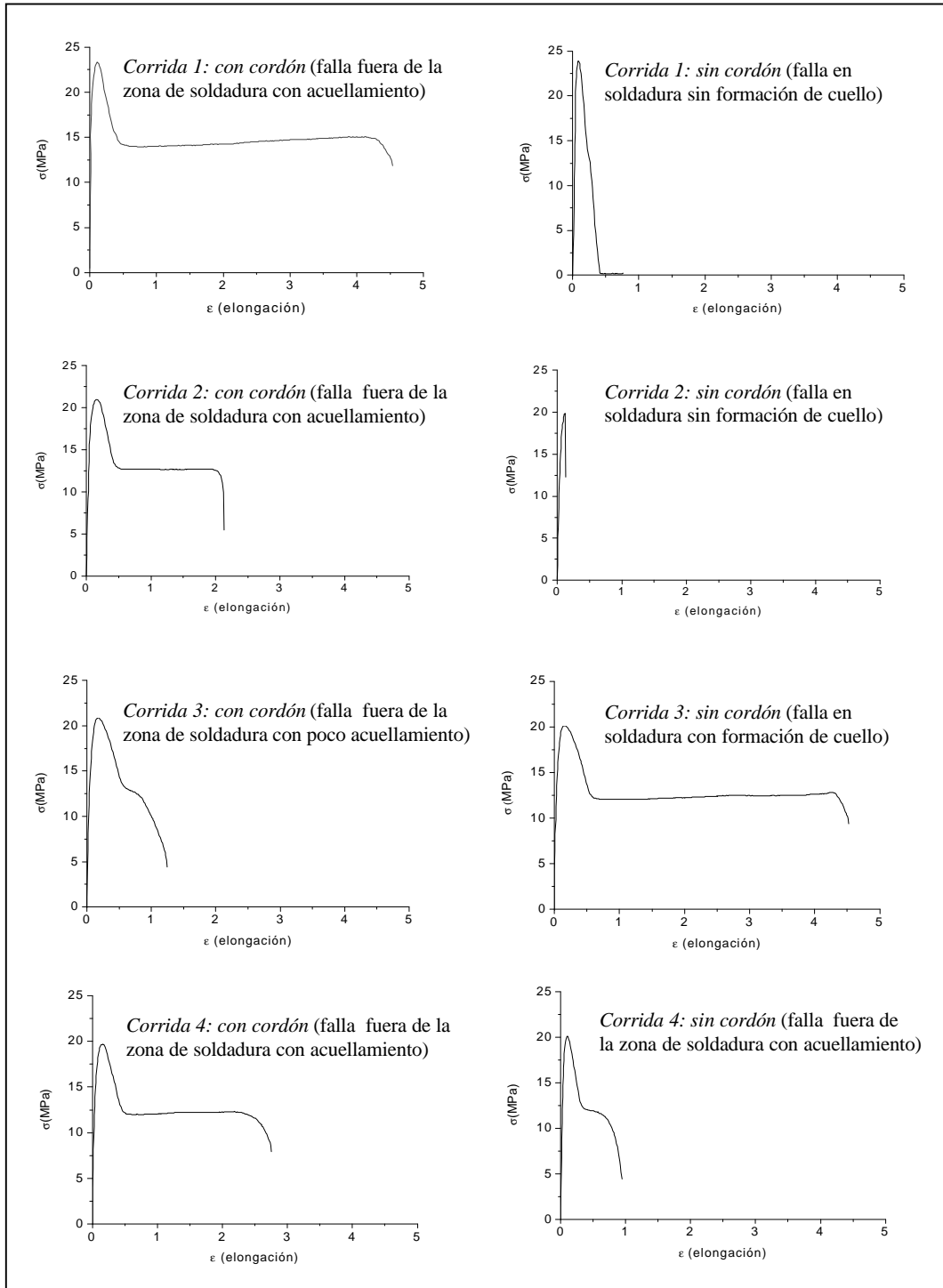


Figura 4.4: Curvas tensión elongación para el material sin soldar y para las corridas de 1 a 8 respectivamente del MDPE.

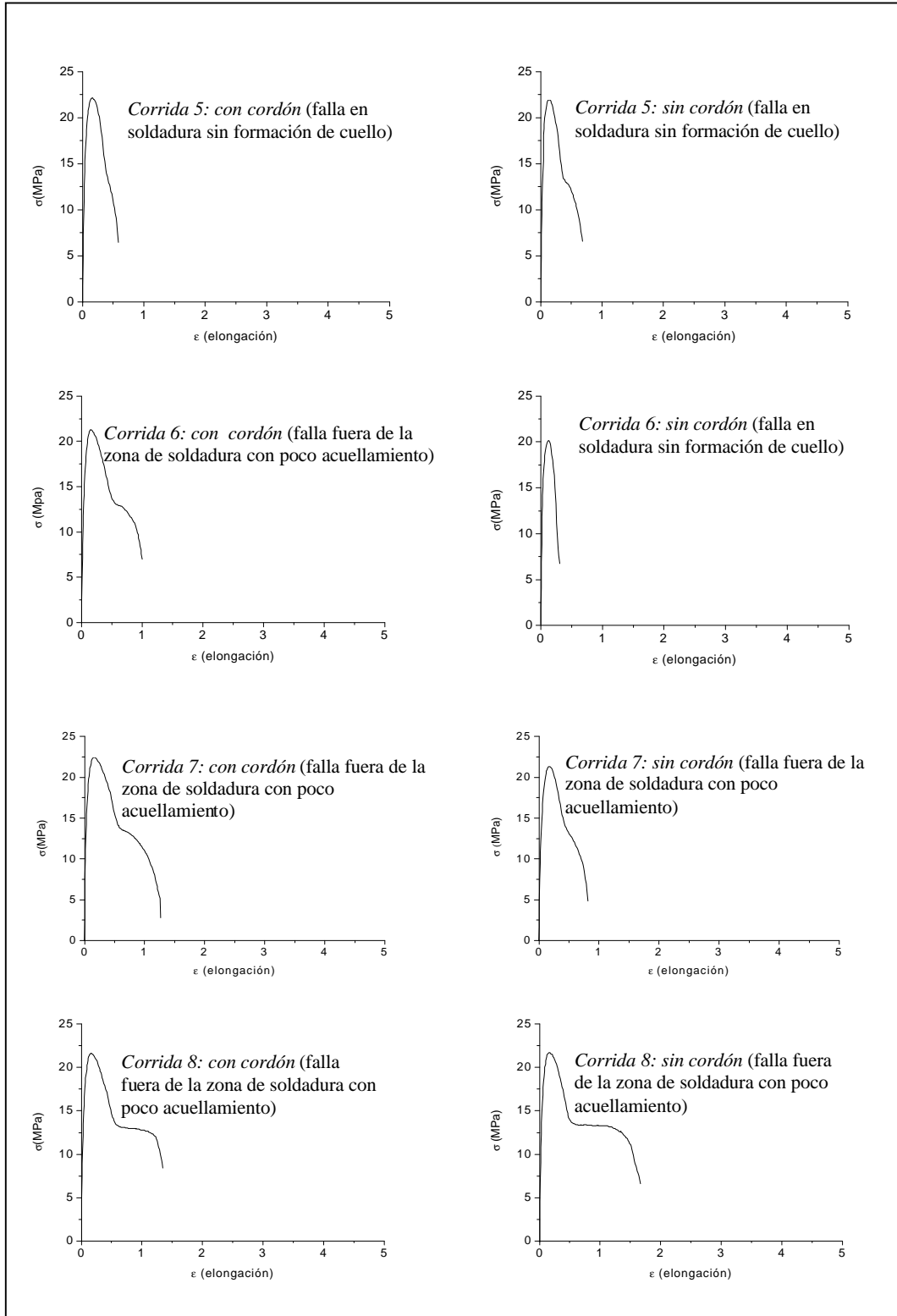


Figura 4.5: Curvas tensión elongación para el material sin soldar y para las corridas de 1 a 8 respectivamente del MDPE.

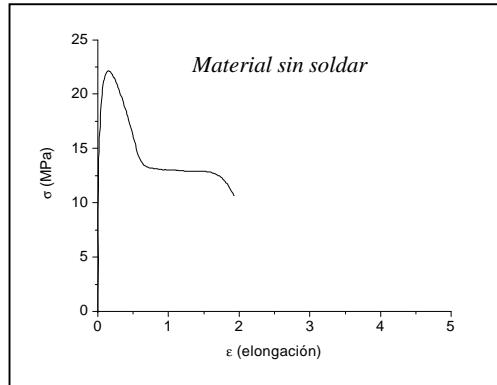


Figura 4.6: Curvas tensión elongación para el material sin soldar.

Se puede observar que la tensión máxima es del mismo orden en los distintos gráficos ya sea en las probetas con o sin cordón. La diferencia en la morfología de las curvas (mayor o menor elongación) se atribuye al modo y lugar de falla. Las probetas ensayadas en las cuales se produce la falla con formación de cuello son las que poseen mayor elongación. Mientras que las probetas que fallaron en la zona de soldadura no presentan acuellamiento, con excepción de la corrida 3 en la que si hubo formación de cuello. Como la probeta en este ultimo caso no poseía cordón, presentaba la misma probabilidad que falle en la soldadura que en cualquier otra parte de la zona calibrada. En la Figura 4.7 se puede observar los distintos tipos de fallas de las probetas ensayadas.

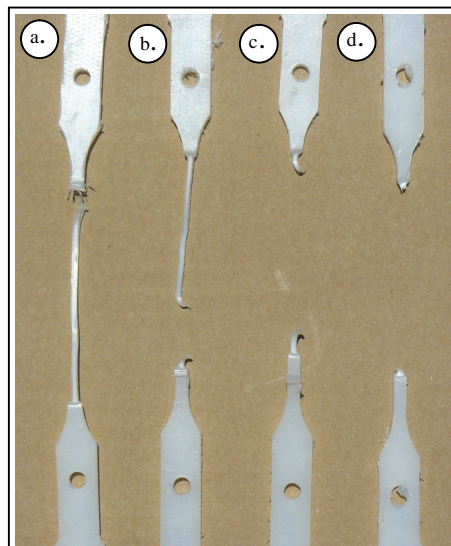


Figura 4.7: Foto de las probetas ensayadas con los distintos modos de falla: a) Falla en soldadura con formación de cuello. b) Falla fuera de la zona de soldadura con acuellamiento. c) Falla fuera de la zona de soldadura con poco acuellamiento. d) Falla en soldadura sin formación de cuello.

4.3.1. Eficiencia de la soldadura

El modo más usual de evaluar las soldaduras es mediante la medida llamada **eficiencia de la soldadura** (\bullet) medida generalmente como la relación entre la resistencia a la tracción en condiciones estáticas de la unión soldada y la del material base:

$$\bullet = (\text{Resistencia de la soldadura})/(\text{Resistencia del material base})$$

Un factor de soldadura de 1 o superior, indica que la unión es tan resistente o más resistente que la matriz. Las uniones de polietileno son clasificadas desde malas a excelentes, según la Tabla 4.1 (De Micco).

Resultados:

Tabla 4.1: Calidad de las uniones de PE soldadas basadas en el modo de falla, ubicación de la rotura y eficiencia de la soldadura.

Modo de falla	Ubicación de la rotura	Calidad de la junta soldada	\bullet
La probeta rompe en la unión soldada antes de formar "cuello"	En la soldadura	Mala	<0.12
La probeta pasa el punto de fluencia y ocurre algo de deformación plástica	En la soldadura	Pobre	0.12-0.56
	Lejos de la soldadura	Buena	
La probeta tiene un comportamiento completamente dúctil antes de la falla	En la soldadura	Buena	>0.57
	Lejos de la soldadura	Excelente	

Los valores de tensión máxima y eficiencias de soldadura (\bullet) del MDPE se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Valores de tensión máxima y eficiencia de soldadura para las distintas corridas para el MDPE.

	Probeta con cordón de sold.		Probeta sin cordón de sold.	
	\bullet máx. [MPa]	\bullet (efic. de sold.)	\bullet máx. [MPa]	\bullet (efic. de sold.)
Corrida 1	22.33	1.01	21.52	0.97
Corrida 2	21.2	0.96	19.84	0.90
Corrida 3	20.86	0.94	19.93	0.90
Corrida 4	20.16	0.91	20.74	0.94
Corrida 5	21.7	0.98	21.93	0.99

Corrida 6	19.86	0.90	20.6	0.93
Corrida 7	22.18	1.00	21.9	0.99
Corrida 8	21.21	0.96	21.1	0.95

Nota: El valor de tensión máxima del material base que se utilizo para el calculo de la eficiencia de soldadura es de 22.15Mpa.

Las curvas tensión-elongación del HDPE presentan el mismo comportamiento al MDPE. En la Tabla 4.3 se exponen los valores de tensión máxima y eficiencias de soldadura para el HDPE.

Tabla 4.3: Valores de tensión máxima y eficiencia de soldadura para las distintas corrida para el MDPE.

	Probeta con cordón de sold.		Probeta sin cordón de sold.	
	• máx. [MPa]	• (efic. de sold.)	• máx. [MPa]	• (efic. de sold.)
Corrida 1	21.89	0.87	23.31	0.93
Corrida 2	25.17	1.00	25.71	1.02
Corrida 3	23.33	0.93	23.69	0.94
Corrida 4	25.15	1.00	24.24	0.97
Corrida 5	22.88	0.91	21.67	0.86
Corrida 6	23.64	0.94	23.71	0.94
Corrida 7	24.28	0.97	24.18	0.96
Corrida 8	23.97	0.95	24.88	0.99

Nota: El valor de tensión máxima del material base que se utilizo para el calculo de la eficiencia de soldadura es de 25.1Mpa.

Dado que los valores de *eficiencia de soldadura* son superiores a 0.90 para el MDPE y 0.86 para HDPE, se puede concluir que existe una excelente calidad de las juntas soldadas. En los casos en que el factor de soldadura es igual a uno, indica que la unión es tan resistente o más resistente que la matriz.

4.3.2. Análisis de la varianza: Relación entre las variables de procesamiento y la resistencia mecánica

El análisis de la varianza es un diseño factorial que permite al investigador planificar un trabajo para evaluar el efecto combinado de dos o más variables de forma simultánea en el resultado medido, obteniéndose también información de la posible interacción entre los diversos factores. Éste procedimiento estadístico permite dividir la variabilidad observada en componentes independientes que pueden atribuirse a diferentes causas de interés (Keppel y Zedeck, 1989; Rosse, 1996).

El procedimiento a seguir para realizar el análisis es:

- Construir una matriz que contenga la cantidad de factores a estudiar, los niveles que posee cada factor, y la cantidad de corridas a realizar.
- Realizar los experimentos, y obtener los valores de respuesta para cada corrida.
- Aplicar el método ANOVA

La Tabla 4.4, muestra la matriz Taguchi L8 como ejemplo, la cual fue utilizada en este estudio. La matriz contiene 4 factores (A, B, C, D), conteniendo cada uno dos niveles (1, 2).

Tabla 4.4: Matriz de diseño tipo Taguchi L8.

Run	1	2	3	4
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	1	1	2
3	1	2	2	1
4	1	2	2	2
5	2	1	2	2
6	2	1	2	1
7	2	2	1	2
8	2	2	1	1

En este trabajo se utilizó el software *My design- Design Expert 6.0.5* para diseñar el experimento y realizar los análisis de varianza para las diferentes respuestas. Una vez ingresada la matriz de diseño del experimento y los valores de la respuesta, tensión máxima en este caso, el software realiza un análisis estadístico (ANOVA) y los resultados permiten construir el gráfico de la Figura 4.8 además de brindar información de la influencia de cada parámetro en el proceso.

El método permite identificar cuales de todos los factores son significativos y con qué porcentaje de contribución afectan a la respuesta. Por ejemplo, en la Figura 4.8 se puede observar que el factor “A” es el más significativo y el que posee mayor porcentaje de contribución en la respuesta. Esto factor es el que presenta más amplitud entre sus valores máximo y mínimo.

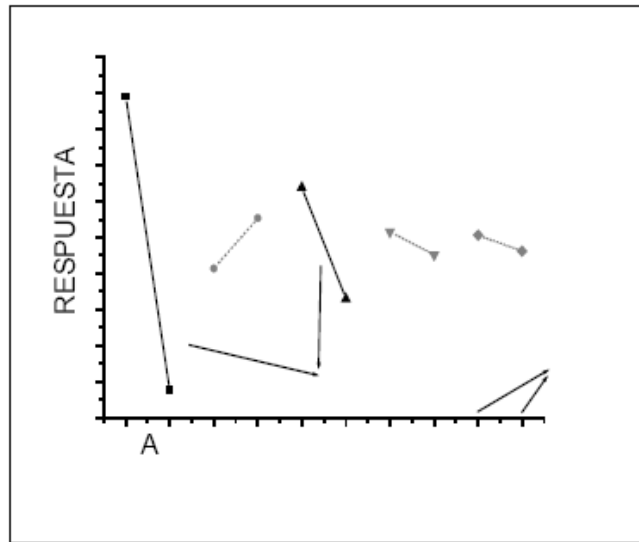


Figura 4.8: Información brindada por el método ANOVA.

Resultados:

Los valores de *tensión máxima* para las probetas de MDPE con cordón se presentan en el gráfico de barras en la Figura 4.9, a. Los resultados del análisis de la varianza (Figura 4.9, b) revelaron que ninguno de los parámetros de procesamiento es más significativo que los otros.

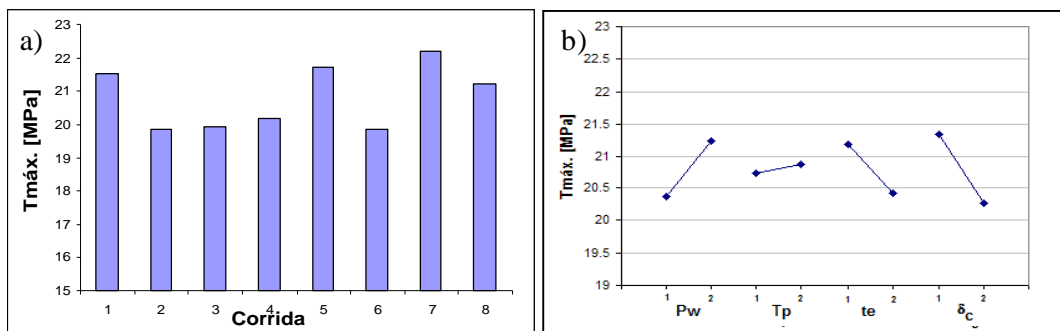


Figura 4.9: a) Valores de $T_{máx.}$ b) Resultados del método de ANOVA para las probetas de MDPE con cordón.

En la Figura 4.10, a se muestran los valores de *tensión máxima* para las probetas de MDPE sin cordón en un gráfico de barras. Los resultados del método de ANOVA, Figura 4.10, b, no relevaron ningún parámetro de procesamiento especialmente significativo.

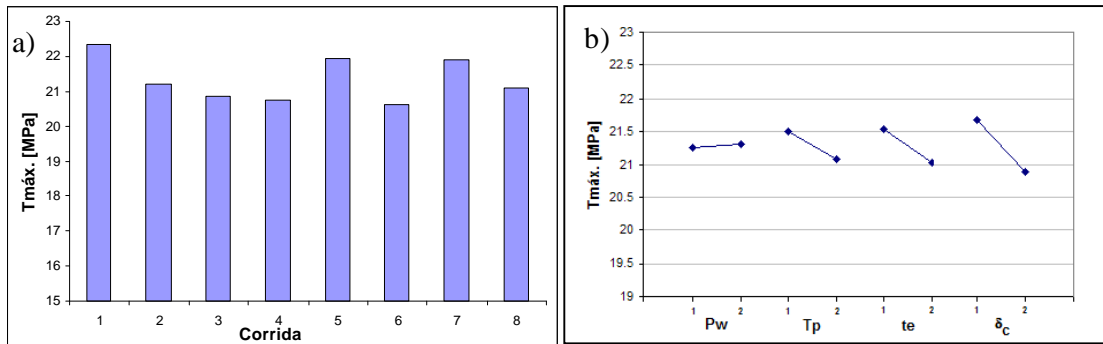


Figura 4.10: a) Valores de $\sigma_{máx.}$ b) Resultados del método de ANOVA para las probetas de MDPE sin cordón.

Los resultados del análisis de la varianza (Figura 4.11) para las probetas de HDPE con cordón no mostraron ningún parámetro de procesamiento significativo.

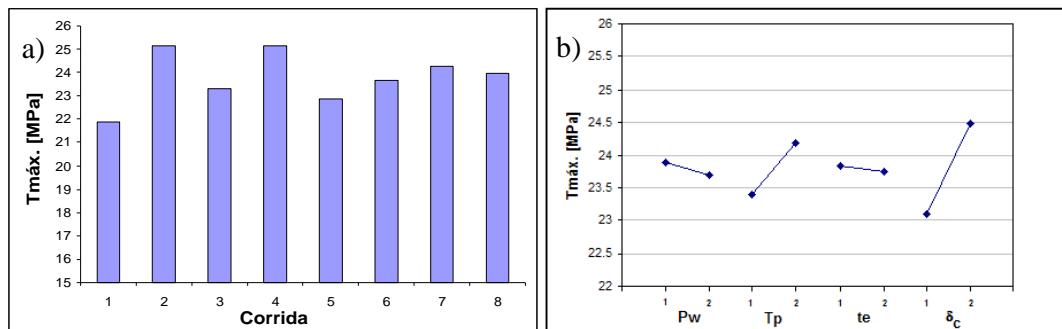


Figura 4.11: a) Valores de $\sigma_{máx.}$ b) Resultados del método de ANOVA para las probetas de HDPE con cordón.

Para las probetas de HDPE sin cordón los resultados de ANOVA (Figura 4.12) no revelan ningún parámetro de procesamiento significativo.

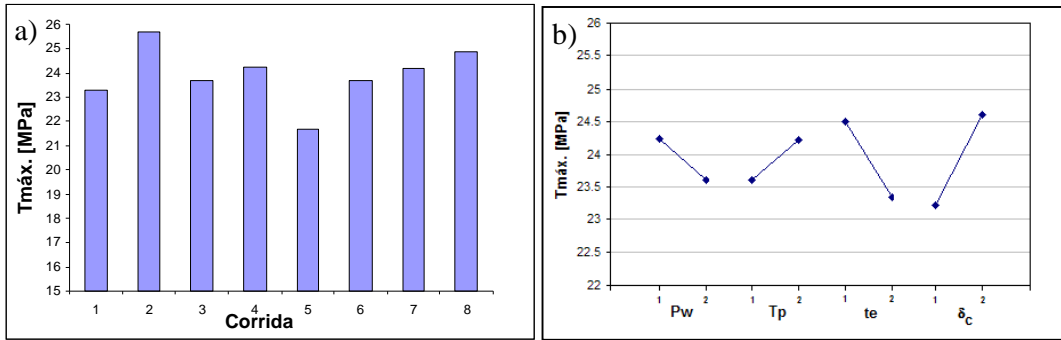


Figura 4.12: a) Valores de $T_{máx.}$. b) Resultados del método de ANOVA para las probetas de HDPE sin cordón.

El análisis estadístico ANOVA permitió determinar (en ambos materiales) que ningún parámetro de procesamiento de soldadura es significativo, es decir, ningún parámetro tiene más influencia que otro en el proceso. Estos resultados se deben a que los valores de los niveles, máximos y mínimos, que se consideraron para cada parámetro de soldadura se basaron en datos bibliográficos y principalmente en datos extraídos de la Norma ASTM F 2620-06 los cuales aseguran una buena eficiencia de soldadura.

Para obtener resultados más significativos con el análisis estadístico se tendrían que haber tomado los valores de los niveles de cada parámetro fuera de los límites establecidos por Norma. A modo de ejemplo, el valor del nivel máximo de la presión de soldadura tendría que haber sido superior a 6.32 Kg/cm^2 .

Capítulo 5: CONCLUSIONES

Este trabajo permitió construir un dispositivo para soldar por termofusión a tope a nivel laboratorio. Se logró cumplir con las especificaciones que se plantearon en el inicio del proyecto tales como:

- Control de las condiciones y parámetros de soldadura simulando el proceso de campo.
- Practicidad y facilidad de uso para lo cual se desarrolló un manual.
- Costo razonable.
- Posibilidades de adaptación tanto para soldar distintos espesores como para ampliar el rango de presiones de trabajo cambiando los resortes.

Para evaluar el dispositivo se optimizaron los parámetros de soldadura del PE de media y alta densidad. Los resultados del método ANOVA para la respuesta a la tracción mostraron que ningún parámetro dentro de los estudiados (presión de soldadura, temperatura de placa termofusora, tiempo de calentamiento y ciclo de enfriamiento) fue significativo. Es decir, ningún parámetro ejerció mayor influencia sobre los otros. Además, los ensayos de tracción muestran que la eficiencia de soldadura obtenida se aproxima al valor unitario.

Se puede concluir que el dispositivo diseñado y construido permite trabajar logrando altas eficiencias de soldadura en los rangos de los parámetros establecidos por la norma ASTM para el PE.

Capítulo 6: BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIA

- ASTM F 2620-06: “Standard Practice for Heat Fusion Joining of Polyethylene Pipe and Fittings”.
- Shigley J., Mitchele L., “Diseño en Ingeniería Mecánica”, 1983.
- Bowman J., “A Review of the Electrofusion Joining Process for Polyethylene Pipe Systems”, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 37 (1997), p. 674-691.
- Chen H., Scavuzzo R.J, Srivatsan T.S., *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 6 (1997), p. 473.
- Ezrin M., “Plastics Failure Guide—Cause and Prevention”; Hanser, München, (1996).
- Molinaro, Hope, “Joining of Plastics: Handbook for Designers and Engineers”; 2000
- Joshi A. M., “Welding of Plastics”,
<http://www.metalwebnews.com/howto/plastics/welding-plastics.pdf>
- Keppel G., Zedeck S., “Data Analysis for Research Designs: Analysis of Variance and Multiple Research/Correlation Approaches”; W.H. Freeman, New York (1989).
- Mistry K., “Tutorial Plastics welding technology for industry”; *Assembly Automation*, Vol. 17 (1997), p. 196-200.
- Rosse P., “Taguchi Techniques for Quality Engineering, Loss Funktion, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design”; McGraw-Hill, Toronto (1996).
- Stokes V. K., “Joining methods for plastics and plastic composites: an overview”; *Polymer Engineering and Science*, Vol. 29 (1989), p. 1310-1324.
- De Micco S., Ludeña L., Pettarin V., Frontini P., “Failure analysis of welded joints of polyethylene pipes for water transportation”, Institute of Materials Science and Technology, INTEMA

Capítulo 7: ANEXO

7.1. TABLA – CARACTERÍSTICAS DE DISTINTOS RESORTES EVALUADOS PARA EL SISTEMA DE MEDICIÓN DE CARGA

Parámetro	Resorte 1	Resorte 2	Resorte 3	Resorte 4
Longitud (mm)	21.00	33.70	36.00	41.00
Diam externo (mm)	14.40	15.00	16.00	15.00
Diam interno (mm)	10.50	11.90	13.00	10.50
Delta máx. (mm)	8.70	17.30	20.40	14.90
K (kg/cm)	13.36	4.29	3.13	9.59
Fza. Maquina/cm (kg/cm)	53.43	17.15	12.52	38.36
Fza. Máxima (kgf)	46.49	29.67	25.55	57.16
Ancho (cm) de prob. de espesor = 4mm para ejercer una P = 90 Psi	18.39	11.74	10.11	22.61
Desplazamiento (mm) del resorte para la probeta de 4mm x 75 mm	3.55	11.05	15.14	4.94
Ancho (cm) de prob. de espesor = 10 mm para ejercer una P = 90 Psi	7.36	4.70	4.04	9.04

Nota: El resorte que se utilizó en el sistema de medición de carga es el resorte número 4.

7.2. MANUAL DE USO

- 1- Cuando se comienza a trabajar o cada vez que haga falta, limpiar la placa termofusora con un trapo embebido en alcohol y verificar el correcto ajuste de la termocupla en dicha placa y que la placa calefactora se encuentre enchufada al controlador de temperatura.
- 2- Cortar siempre en forma perpendicular a una de las caras, en forma lineal y evitar la formación de rebabas.

Nota: es importante realizar el corte instantes antes de realizar la soldadura para evitar que el material se oxide en la zona de interés dando como resultado una “mala” unión.

- 3- Limpiar las puntas de las piezas a soldar con un trapo embebido en alcohol común, inmediatamente antes de proceder a cada termofusión.
- 4- Marcar en el extremo de las placas, la longitud que se desea fundir del material antes de introducirlas en el dispositivo.
- 5- Calcular el desplazamiento que debe marcar el alesómetro para ejercer la presión (Fza x Area) de soldadura. Este se debe calcular como:

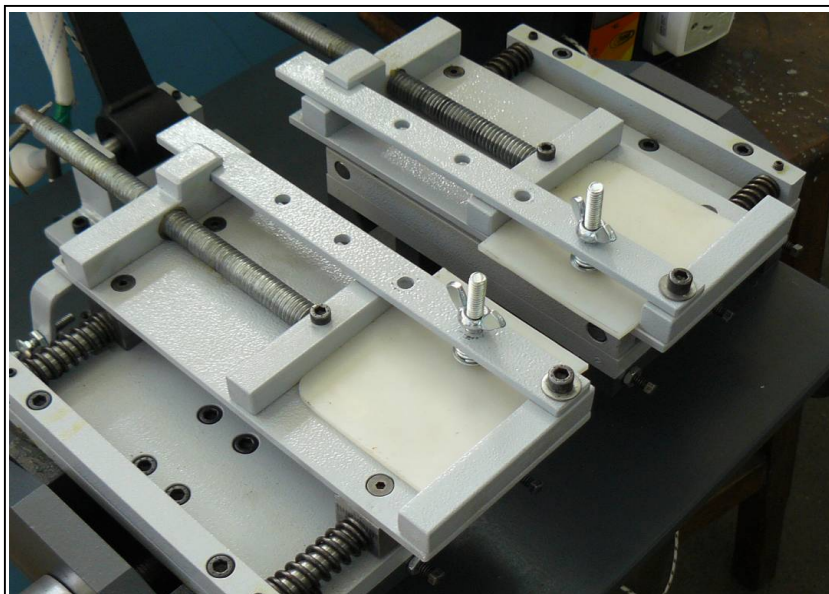
$$c = P \cdot W \cdot e / 4 \cdot k \quad \text{donde, P: presión de soldadura}$$

W: ancho de la pieza a soldar

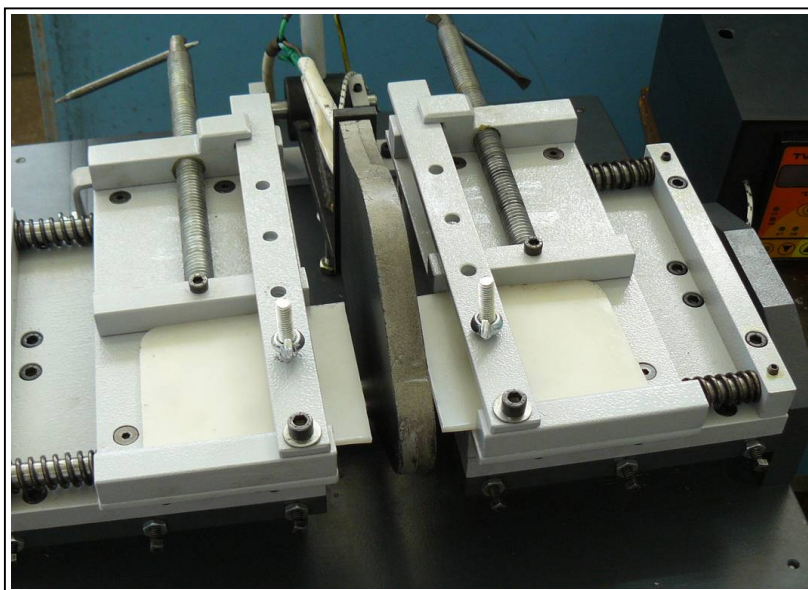
e: espesor de la pieza a soldar

k: constante del resorte (k=9.59 Kg/cm)

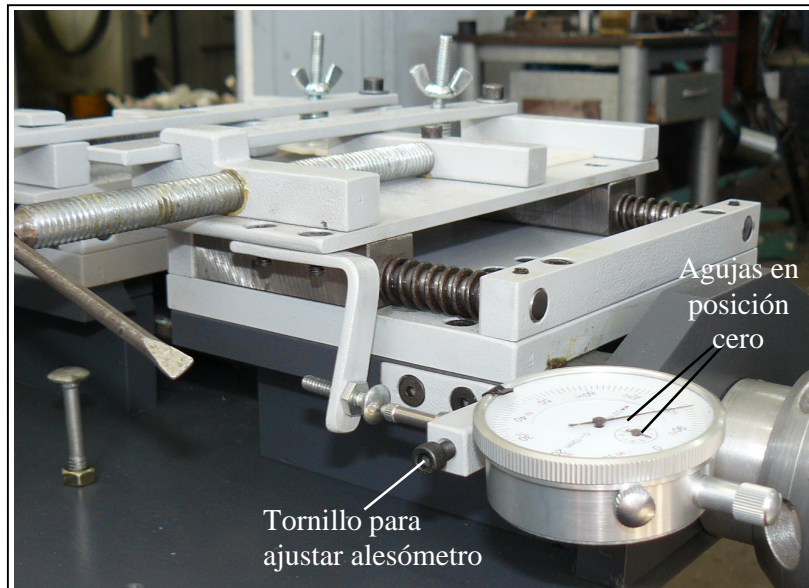
- 6- Introducir la pieza en el dispositivo, alinearla en forma perpendicular a la placa termofusora y sujetarla firmemente para evitar que se desplacen en el momento que se ejerce la presión de soldadura. Como se puede ver esquematizado en la siguiente figura.



7- Alejar las partes móviles y colocar la placa calefactora en posición de calentamiento.



- 8- Asegurarse que el Alesómetro este bien sujeto y que la agujas se encuentren en posición cero.

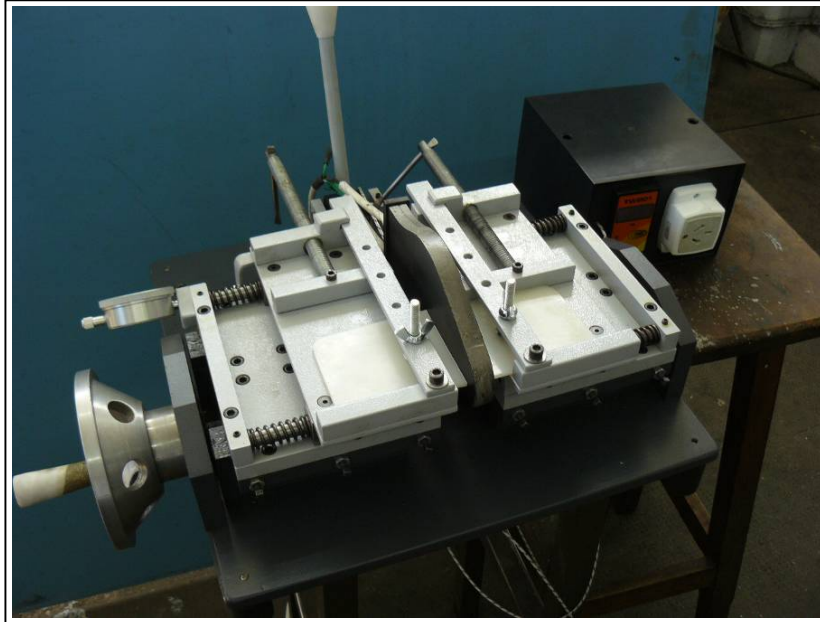


- 9- Setear la temperatura con la cual se desea operar, en el display.



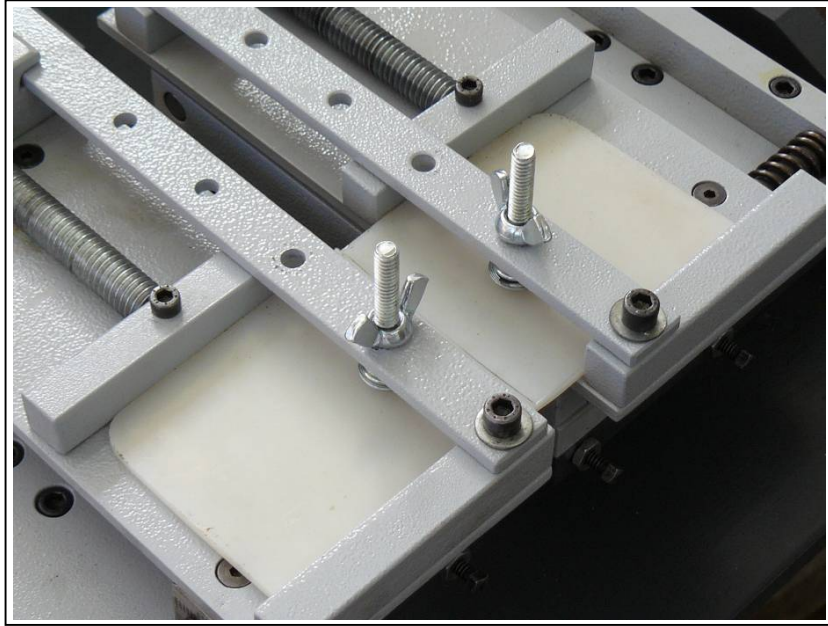
- 10- Dejar que la temperatura de la placa termofusora se estabilice a la temperatura seteada.

11- Una vez alcanzada la temperatura de trabajo se debe aproximar las piezas a soldar (ya amarradas) a la placa termofusora con una presión tal que permita que el material se ablande, el exceso de presión en este paso puede provocar que el material fundido se desplace y forme así una “mala” unión.



12- Una vez que la zona fundida alcanza la marca realizada previamente, se deben alejar las piezas de la placa termofusora girando la manivela en sentido horario y levantar la placa con el brazo de palanca que se encuentra ubicado en el extremo de la misma. Este paso se debe realizar en el menor tiempo posible ($t < 5$ seg.).

13- Concluido el paso 11) se deben aproximar las piezas (girando la manivela en sentido antihorario) y presionarlas hasta que el alesómetro marque la medida calculada.



14- Mantener la presión de soldadura durante el ciclo de enfriamiento (tiempo de enfriamiento). Luego aflojar el amarre y la alineación de la pieza antes de alejar las partes móviles.