



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## Determinación del desgaste de electrodos utilizados en la soldadura por resistencia eléctrica de acero estructural de bajo carbono a diferentes espesores

Francisco Cardozo  
Andrea Castellano

Naguanagua, Junio de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## Determinación del desgaste de electrodos utilizados en la soldadura por resistencia eléctrica de acero estructural de bajo carbono a diferentes espesores

**Tutor académico:**  
Prof. Ing. Argel Porrello.

**Autor:**  
Cardozo Francisco  
Andrea Castellano

Naguanagua, Junio de 2009

# *Dedicatoria*

---

Para Fabiola Isabel, porque su presencia llena la vida de muchos.

**Francisco Cardozo**

Para mi familia, por serlo.

**Andrea Castellano**

# *Agradecimientos*

---

A Dios por darme la fuerza que me permite mantenerme en el camino y cumplir ésta meta.

A mis padres Isabel y Hebert por su apoyo económico y espiritual.

A mis hermanas Juana y Hebelitza por la atención y el interés que siempre me brindaron durante este proceso.

A mis amigos Christopher Martínez, Edgard Sulbarán y María Guerrero por su colaboración, compañía y sus palabras de aliento en los momentos difíciles.

A ti, gracias por estar allí y hacer mis días más felices, gracias por llenar mi mundo, gracias por ser quien eres.

**Francisco Cardozo**

A Dios, por estar conmigo aun cuando dudé estar él.

A mis padres Luis Castellano y Adalgisa Villegas, por que sin ellos esto no hubiera sido posible, gracias por ayudarme, acompañarme incluso malcriarme, gracias por ser mis amigos, mis compañeros, y sobre todo gracias por ser mis padres.

A mis hermanos Katherin Castellano, por estar siempre a mi lado, hacerme reír, llorar, por ayudarme y fastidiarme; a Luigi José y Jennifer, por que aunque no compartimos mucho tiempo juntos, los tengo presente en todos mis momentos.

A mi amor Julio De Freitas gracias por apoyarme en todas las cosas de mi vida, por estar a mi lado, por siempre impulsarme a seguir y no dejarme caer.

A mis amigos, aquellos que ayudaron a que esto fuera posible y los que simplemente me ayudaron a llegar a cumplir esta meta: José Poleo, Wilmer Montilla, Yoana Alvarado, Alvaro Rodriguez, Jesus Pinto, José Farías, Francisco Cardozo, y Edgar Sulbaran, Gracias.

**Andrea Castellano**

# Índice general

---

|  |                         |
|--|-------------------------|
| <b>Índice general</b>  | <b>Pág.</b><br><b>i</b> |
| <b>Índice de figuras</b>   | <b>v</b>                |
| <b>Índice de tablas</b>  | <b>ix</b>               |
| <b>Lista de símbolos y abreviaturas</b>                              | <b>xi</b>               |
| <b>Resumen</b>   | <b>xiii</b>             |
| <b>CAPÍTULO 1 Introducción</b>                                       | <b>1</b>                |
| 1.1 Situación problemática, 1  |                         |
| 1.2 Objetivos, 3   |                         |
| 1.2.1 <i>Objetivo General</i> , 3                                    |                         |
| 1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> , 3                               |                         |
| 1.3 Justificación, 3   |                         |
| 1.4 Alcance, 4   |                         |
| 1.5 Limitaciones, 4  |                         |
| 1.6 Antecedentes, 5  |                         |
| <b>CAPÍTULO 2 Marco Teórico: Soldadura eléctrica por resistencia</b> | <b>7</b>                |
| 2.1 Proceso de Soldadura, 7  |                         |
| 2.2 Soldadura por resistencia eléctrica, 10                          |                         |
| 2.2.1 <i>Aplicaciones</i> , 15                                       |                         |
| 2.2.2 <i>Clasificación de soldadura por resistencia</i> , 17         |                         |

- 2.3 Soldadura por puntos, 19
  - 2.3.1 *Electrodo*, 21
  - 2.3.2 *Resistencia mecánica de la soldadura*, 26
  - 2.3.3 *Parámetros de soldadura*, 26
- 2.4 Máquinas de soldar por resistencia, 29
  - 2.4.1 *Máquinas de soldar por puntos*, 29
  - 2.4.2 *Máquinas de soldar por costura*, 30
  - 2.4.3 *Máquinas de soldar por protuberancias*, 30
  - 2.4.4 *Máquinas de soldar a tope*, 30
- 2.5 Control electrónico de máquinas de soldar por resistencia, 30
- 2.6 Valores de los parámetros tiempo e intensidad de Corriente, 33
- 2.7 Ensayo destructivo Peel, 35

### **CAPÍTULO 3 Marco Metodológico** **37**

- 3.1 Tipo de investigación, 37
- 3.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos, 37
  - 3.2.1 *Registro histórico*, 37
  - 3.2.2 *Observación directa*, 38
- 3.3 Recursos utilizados, 38
  - 3.3.1 *Materiales*, 38
  - 3.3.2 *Equipos e instrumentos utilizados*, 41
- 3.4 Técnicas de análisis de datos, 43
- 3.5 Metodología Aplicada, 43
  - 3.5.1 *Ensayo de soldadura por resistencia eléctrica en función de la intensidad de corriente y tiempo de unión. Ensayo destructivo Peel*, 43
  - 3.5.2 *Ensayo de desgaste para las dos geometrías de electrodo seleccionadas. (Sin enfriamiento)*, 46
  - 3.5.2 *Ensayo de desgaste para las dos geometrías de electrodo seleccionadas. (Con enfriamiento)*, 48
  - 3.5.4 *Análisis de resultados*, 49

### **CAPITULO 4 Resultados, análisis y discusión** **51**

- 4.1 Ensayos de soldadura por resistencia eléctrica en función de la intensidad de corriente. (Espesor 0.9mm), 51
- 4.2 Ensayo de desgaste para las dos geometrías de electrodo seleccionadas (Espesor 0.9mm y sin enfriamiento), 54
  - 4.2.1 *Ensayo con electrodo Troncocónico*, 55
  - 4.2.2 *Ensayo con electrodo Bombeado*, 56
- 4.3 Ensayo de desgaste para las dos geometrías de electrodo seleccionadas (Espesor 0.9mm y con enfriamiento), 57
  - 4.3.1 *Ensayo con electrodo Troncocónico*, 58
  - 4.3.2 *Ensayo con electrodo Bombeado*, 59

|   |           |
|---|-----------|
| 4.4 Ensayos de soldadura por resistencia eléctrica en función de la intensidad de corriente. (Espesor 1.1mm), | 61        |
| 4.5 Ensayos de soldadura por resistencia eléctrica en función del tiempo (Espesor 1.1mm),                     | 63        |
| 4.6 Ensayo de desgaste para las dos geometrías de electrodo seleccionadas (Espesor 1.1mm y sin enfriamiento), | 65        |
| 4.6.1 Ensayo con electrodo Truncocónico,  | 66        |
| 4.6.2 Ensayo con electrodo Bombeado,  | 67        |
| 4.7 Ensayo de desgaste para las dos geometrías de electrodo seleccionadas (Espesor 1.1mm y con enfriamiento), | 68        |
| 4.7.1 Ensayo con electrodo Truncocónico,  | 69        |
| 4.7.2 Ensayo con electrodo Bombeado,  | 70        |
| 4.8 Comparación de la vida útil del electrodo en cada ensayo,   | 72        |
| <br>  |           |
| <b>CAPITULO 5 Conclusiones y recomendaciones</b>  | <b>79</b> |
| 5.1 Conclusiones,   | 79        |
| 5.2 Recomendaciones,  | 80        |
| <br>  |           |
| <b>Referencias bibliográficas</b>   | <b>81</b> |

# Índice de figuras

---

---

| <b>Figura</b>   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| 2.1 Resistencia al paso de corriente  | 12          |
| 2.2 Disipación de calor hacia el metal base   | 13          |
| 2.3 Esquema fundamental de una máquina soldadora por resistencia.                                 | 15          |
| 2.4 Remache vs. punto de soldadura  | 20          |
| 2.5 Pérdida de calor, en la cual se ve que el calor perdido es mayor en el caso de chapas gruesas | 21          |
| 2.6 Superficie de contacto: Electrodo bombeado  | 23          |
| 2.7 Superficie de contacto: Electrodo troncocónico  | 23          |
| 2.8 Deformación de las piezas debido a los electrodos   | 24          |
| 2.9 Control con tornas en el primario del transformador   | 32          |
| 2.10 Control mediante un autotransformador  | 32          |
| 2.11 Control mediante válvulas electrónicas   | 32          |
| 3.1 Dimensiones de probetas para ensayos de desgaste  | 39          |
| 3.2 Dimensiones de probetas para ensayo destructivo   | 39          |
| 3.3 Electrodo troncocónico  | 40          |
| 3.4 Electrodo bombeado  | 40          |
| 3.5 Equipo de soldadura por resistencia eléctrica   | 41          |
| 3.6 Sistema de enfriamiento conectado a la máquina de soldadura                                   | 42          |
| 3.7 Sistema de enfriamiento   | 42          |
| 3.8 Ejemplo de numeración de láminas para ensayo destructivo Peel                                 | 45          |
| 3.9 Unión de tiras para el desgaste de electrodos   | 47          |
| 3.10 Unión de muestras para ensayo destructivo Peel   | 47          |
| 4.1 Lámina para ensayo Peel en función de la intensidad y tiempo                                  | 52          |
| 4.2 Diámetro de puntos en función de intensidad de corriente. (Espesor 0.9mm)                     | 53          |
| 4.3 Muestras del ensayo Peel después de ser separadas (Falla por cizallamiento)                   | 53          |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.4  | Muestras del ensayo Peel después de ser separadas (Falla por desgarramiento)  | 54 |
| 4.5  | Electrodos Truncocónicos y electrodos Bombeados   | 54 |
| 4.6  | Diámetro inferior y superior del electrodo truncocónico y diámetro del punto de soldadura (Espesor 0.9mm y sin enfriamiento)  | 56 |
| 4.7  | Diámetro inferior y superior del electrodo Bombeado y diámetro del punto de soldadura. (Espesor 0.9mm y sin enfriamiento)     | 57 |
| 4.8  | Láminas de desgaste del electrodo   | 58 |
| 4.9  | Diámetro inferior y superior del electrodo truncocónico y diámetro del punto de soldadura. (Espesor 0.9mm y con enfriamiento) | 59 |
| 4.10 | Diámetro inferior y superior del electrodo Bombeado y diámetro del punto de soldadura. (Espesor 0.9mm y con enfriamiento)     | 61 |
| 4.11 | Diámetro de puntos en función de la intensidad de corriente. (Espesor 1.1mm)  | 62 |
| 4.12 | Diámetro de puntos en función del tiempo. (Espesor 1.1mm)   | 64 |
| 4.13 | Proceso de soldadura para el ensayo destructivo Peel  | 65 |
| 4.14 | Puntos de soldadura en láminas de desgaste  | 65 |
| 4.15 | Diámetro inferior y superior del electrodo truncocónico y diámetro del punto de soldadura. (Espesor 1.1mm y sin enfriamiento) | 67 |
| 4.16 | Diámetro inferior y superior del electrodo Bombeado y diámetro del punto de soldadura. (Espesor 1.1mm y sin enfriamiento)     | 67 |
| 4.17 | Diámetro inferior y superior del electrodo truncocónico y diámetro del punto de soldadura. (Espesor 1.1mm y con enfriamiento) | 70 |
| 4.18 | Diámetro inferior y superior del electrodo Bombeado y diámetro del punto de soldadura. (Espesor 1.1mm y con enfriamiento)     | 70 |
| 4.19 | Comparación de vida útil según la geometría de electrodos (Espesor 0,9 sin enfriamiento)                                      | 73 |
| 4.20 | Comparación de vida útil según la geometría de electrodos (Espesor 0,9 con enfriamiento)                                      | 73 |
| 4.21 | Comparación de vida útil según la geometría de electrodos (Espesor 1,1 sin enfriamiento)                                      | 74 |
| 4.22 | Comparación de vida útil según la geometría de electrodos (Espesor 1,1 con enfriamiento)                                      | 74 |
| 4.23 | Comparación de vida útil usando el sistema de enfriamiento (Espesor 0,9 electrodo truncocónico)                               | 75 |
| 4.24 | Comparación de vida útil usando el sistema de enfriamiento (Espesor 0,9 electrodo bombeado)                                   | 75 |
| 4.25 | Comparación de vida útil usando el sistema de enfriamiento (Espesor 1,1 electrodo truncocónico)                               | 76 |
| 4.26 | Comparación de vida útil usando el sistema de enfriamiento (Espesor 1,1 electrodo bombeado)                                   | 76 |
| 4.27 | Comparación de vida útil en función del espesor de lámina (Sin enfriamiento, electrodo truncocónico)                          | 77 |
| 4.28 | Comparación de vida útil en función del espesor de lámina (Sin enfriamiento, electrodo bombeado)                              | 77 |

|   |    |
|---|----|
| 4.29 Comparación de vida útil en función del espesor de lámina (Con enfriamiento, electrodo troncocónico) | 78 |
| 4.30 Comparación de vida útil en función del espesor de lámina (Con enfriamiento, electrodo bombeado)     | 78 |

# Índice de tablas

---

---

| <b>Tabla</b>   | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| 2.1 Espesor de la chapa, diámetro del electrodo y curvatura de Bombeado                                  | 24          |
| 2.2 Programas sugeridos para soldadura por puntos de láminas de acero de bajo carbono sin recubrimiento  | 25          |
| 2.3 Valores para la posición 1 del temporizador  | 33          |
| 2.4 Valores para la posición 2 del temporizador  | 33          |
| 2.5 Valores para la posición 3 del temporizador  | 33          |
| 2.6 Valores para la posición 4 del temporizador  | 34          |
| 2.7 Valores para la posición 5 del temporizador  | 34          |
| 2.8 Valores para la posición 6 del temporizador  | 34          |
| 2.9 Valores para la posición 7 del temporizador  | 34          |
| 2.10 Valores para la posición 8 del temporizador   | 35          |
| 2.11 Valores para la posición 9 del temporizador   | 35          |
| 2.12 Valores para la posición 10 del temporizador  | 35          |
| 3.1 Medidas comunes de los electrodos  | 39          |
| 4.1 Valores de diámetro en función de la intensidad de corriente.<br>(Espesor 0.9mm)                     | 52          |
| 4.2 Diámetro de punto de soldadura para un electrodo troncocónico.<br>(Espesor 0.9mm y sin enfriamiento) | 55          |
| 4.3 Diámetro de punto de soldadura para un electrodo Bombeado.<br>(Espesor 0.9mm y sin enfriamiento)     | 56          |
| 4.4 Diámetro de punto de soldadura para un electrodo troncocónico.<br>(Espesor 0.9mm y con enfriamiento) | 58          |
| 4.5 Diámetro de punto de soldadura para un electrodo Bombeado.<br>(Espesor 0.9mm y con enfriamiento)     | 60          |
| 4.6 Valores de diámetro en función de la intensidad de corriente.<br>(Espesor 1.1mm)                     | 62          |

X *Determinación del desgaste de electrodos utilizados en la soldadura por resistencia eléctrica de acero estructural de bajo carbono a diferentes espesores*

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.7  | Valores de diámetro en función del tiempo. (Espesor 1.1mm)   | 63 |
| 4.8  | Diámetro de punto de soldadura para un electrodo troncocónico.<br>(Espesor 1.1mm y sin enfriamiento) | 66 |
| 4.9  | Diámetro de punto de soldadura para un electrodo Bombeado.<br>(Espesor 1.1mm y sin enfriamiento)     | 68 |
| 4.10 | Diámetro de punto de soldadura para un electrodo troncocónico.<br>(Espesor 1.1mm y con enfriamiento) | 69 |
| 4.11 | Diámetro de punto de soldadura para un electrodo Bombeado.<br>(Espesor 1.1mm y con enfriamiento)     | 71 |

# *Lista de símbolos y abreviaturas*

---

---

|          |   |
|----------|---|
| $e$      | Espesor de lámina (milímetros)                      |
| $Q$      | Calor generado (Calorías)                           |
| $I$      | Intensidad de corriente (Ampere)                    |
| $R$      | Resistencias ofrecidas al paso de corriente (Ohm)   |
| $t$      | Tiempo (segundo)                                    |
| A        | Unidad de intensidad de corriente (Ampere)          |
| $\Omega$ | Unidad de resistencia al paso de la corriente (Ohm) |
| CA       | Corriente Alterna                                   |
| CC       | Corriente Continua                                  |
| Hz       | Unidad de frecuencia (Hertzio)                      |
| s        | Unidad de tiempo (segundo)                          |
| $N$      | Unidad de fuerza (Newton)                           |
| Ec.      | Ecuación  |
| D        | Diámetro (milímetro)                                |
| H        | Altura del electrodo (milímetro)                    |
| %V       | Porcentaje de variación del punto de soldadura (%)  |

# *Resumen*

---

La soldadura por resistencia eléctrica consiste en hacer pasar una intensidad de corriente a través de dos láminas de metal, logrando el calor necesario para llevar a cabo la unión. Los electrodos utilizados se van desgastando a medida que aumentan los puntos de soldadura realizados; este fenómeno varía en función de los parámetros y de acuerdo al espesor de la chapa soldada. Usando la máquina de soldadura por resistencia eléctrica ubicada en el laboratorio de Procesos de Fabricación, se llevaron a cabo ensayos en función de la intensidad de corriente y del tiempo de soldadura, de esta manera se determinaron los parámetros adecuados para soldar láminas de acero ASTM 366 de 0,9mm y 1,1mm de espesor. Con los parámetros encontrados se procedió a realizar los ensayos de desgaste, los cuales consistieron en soldar tiras continuas y tomar muestras cada treinta puntos para evaluar la soldadura. Estos ensayos fueron realizados para los dos espesores de lámina de estudio y con dos tipos de electrodos (bombeados y troncocónicos), también se evaluó la utilización de enfriamiento. Al evaluar los datos obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones: la utilización de enfriamiento aumenta la vida útil de los electrodos, los electrodos bombeados son mas duraderos que los troncocónicos y las láminas mas gruesas necesitan mayores intensidades de corriente y mayores tiempos de unión, sin embargo disminuyen el desgaste.

# CAPÍTULO 1

## *Introducción*

---

---

### **1.1 Situación problemática**

La industria en Venezuela y el mundo ha tenido un crecimiento acelerado en los últimos tiempos, esto ha traído como consecuencia la innovación en los métodos de fabricación y disminución de costos de producción. La soldadura de electro punto por resistencia eléctrica es muy utilizada debido a sus ventajas, que incluyen el uso eficiente de la energía, limitada deformación de la pieza de trabajo, altas tasas de producción, fácil automatización, y el no requerimiento de materiales de relleno.

Un factor de gran importancia son los electrodos, ya que deben satisfacer la condición de tener una resistencia eléctrica muy baja y una conductividad térmica muy elevada. La soldadura por resistencia utiliza el calor y la presión como principio de funcionamiento, esto se logra haciendo pasar una corriente a través de electrodos de cobre aleados con algunos elementos (plata, cadmio, cromo y berilio) que comprimen las láminas. (Soldadura y construcción soldada, 1959).

El espesor de las chapas a soldar influye sobre la intensidad de corriente necesaria, ya que con espesores grandes la fuga de calor durante la soldadura será más elevada que con espesores delgados y por consiguiente al soldar aquellos, habrá que emplear mayores intensidades de soldadura o tiempos más largos. Durante muchos procesos, es necesario intercalar láminas de diferentes espesores en una misma línea de producción, lo cual crea la necesidad de utilizar electrodos de diferente diámetro, esto produce pérdidas en el tiempo de producción y además incrementa los costos. (Zambrano, 2008). Para evitar este inconveniente se plantea la posibilidad de trabajar con un mismo electrodo variando el espesor de la lámina en un rango no muy amplio.

La altura de los electrodos de cobre disminuye progresivamente a medida que aumenta el número de puntos de soldadura realizados, además crece el área transversal que está en contacto con las láminas. Éste proceso se acelera con la variación de espesores dentro de la línea de producción y después de una cierta cantidad de puntos, la calidad de la soldadura se ve comprometida por este desgaste, produciendo piezas defectuosas y por consiguiente pérdidas de material. Es por ello que se hace necesario el conocimiento de la vida útil del electrodo, de esta manera pueden ser cambiados a tiempo, de forma planificada y disminuyendo las pérdidas de tiempo y material que puedan ser ocasionadas.

¿El conocimiento de la vida útil de los electrodos utilizados en la soldadura por resistencia eléctrica a diferentes espesores traerá como consecuencia una mejora en los tiempos de producción?

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

*Determinar el desgaste de electrodos utilizados en la soldadura por resistencia eléctrica de acero estructural de bajo carbono a dos espesores diferentes.*

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudiar la soldadura por resistencia eléctrica que se realizan en los diferentes procesos de fabricación.
- Diagnosticar los parámetros que afectan los procesos de soldadura por resistencia eléctrica
- Determinar la vida útil de electrodos mediante ensayos de soldadura por resistencia eléctrica en función de la intensidad de corriente, tiempo, geometría del electrodo y espesor de lámina, sin enfriamiento.
- Determinar la vida útil de electrodos mediante ensayos de soldadura por resistencia eléctrica en función de la intensidad de corriente, tiempo, geometría del electrodo y espesor de lámina, con enfriamiento.

## 1.3 Justificación

El proceso de desgaste se define como la disminución de la altura del electrodo, así como el crecimiento del área de contacto con la lámina a soldar. Esto trae como consecuencia una reducción en la calidad de soldadura después de una determinada cantidad de puntos. Se plantea la posibilidad de trabajar con un mismo electrodo variando el espesor de la lámina en un rango no muy amplio, sin embargo esto acelera el desgaste, por lo cual se hace

necesario el estudio de este comportamiento. De esta manera los electrodos pueden ser cambiados a tiempo y de forma planificada para evitar piezas defectuosas y por lo tanto pérdidas de material.

Con la realización de los ensayos se busca fijar los parámetros de soldadura adecuados para las dos condiciones (con y sin enfriamiento) y de la misma forma determinar el número de puntos de soldadura por cada electrodo que comprometen la calidad de la soldadura.

## **1.4 Alcance**

- Los parámetros se determinaron para láminas de acero estructural de bajo carbono con dos espesores diferentes ( $e_1=0,9\text{mm}$  y  $e_2=1,1\text{mm}$ )
- El estudio se realizó solo para un modelo de máquina de soldadura por resistencia eléctrica tipo electro punto ubicado en el laboratorio de procesos de fabricación, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.
- Se utilizó como criterio la medición directa de la altura y área del electrodo e inspección visual de los puntos de soldadura.

## **1.5 Limitaciones**

- Disponibilidad de la máquina de soldadura por resistencia eléctrica ubicada en el laboratorio de procesos de fabricación, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

## 1.6 Antecedentes

Enríquez y Malavé. Trabajo de Grado, Universidad de Carabobo (2008) desarrollaron una investigación en la cual plantean como problema la no existencia de parámetros adecuados para aprovechar al máximo la vida útil de cada uno de los electrodos en la mediana empresa, por lo cual se enfocaron en el estudio del desgaste de los electrodos y su relación con la geometría del mismo, para ello realizaron ensayos en función de los parámetros tiempo e intensidad, luego variando la geometría de los electrodos con y sin enfriamiento, así como también los tipos de puntas a estudiar, todo esto con láminas de acero, llegando a la conclusión de que el enfriamiento es la condición más crítica para aumentar la vida útil de los electrodos y que el tipo de punta tipo puntiagudo se caracteriza por sufrir mayor desgaste en condiciones de trabajo similar con y sin enfriamiento, comparado con la punta tipo domo. Dorta y Ortega. Trabajo de Grado, Universidad de Carabobo (2006) y Gonzales e Hidalgo. Trabajo de Grado, Universidad de Carabobo (2008) llevaron a cabo un estudio similar, pero utilizando láminas de aluminio y bronce respectivamente, a través del cual también aseveraron que en el método de soldadura por resistencia eléctrica la condición más determinante para aumentar la vida útil de los electrodos es el enfriamiento.

En el 2007 Xu, J. Jiang, X. Zeng, Q. Zhai, T. Leonhardt, T. Farrell, J. Umstead, W. y Effgen, M. en un artículo publicado en la revista electrónica *Journal of Nuclear Materials*, utilizaron en su investigación la soldadura por resistencia eléctrica para unir láminas de aleaciones refractarias con un espesor de 0,127 mm y midieron cinco parámetros importantes de soldadura, en un intento para optimizar la calidad de la misma, estos parámetros fueron tiempo de sujeción, tipo de electrodo, tiempo de paso de corriente, corriente de soldadura y fuerza del electrodo. Encontraron que incrementar el tiempo de sujeción mejoró la fuerza de la soldadura. También demostraron que un aumento en la corriente de soldadura incrementó las probabilidades de

ocurrencia de adhesión del electrodo, lo cual acorta la vida útil del mismo. Zhang, Chen y Zhang. Revista electrónica *Materials & Design* (2008), estudiaron la soldadura por resistencia eléctrica de un tipo de acero galvanizado pero a diferencia de los anteriores con un enfoque directo en el desgaste de los electrodos utilizados. Llegaron a la conclusión de que la soldadura de acero galvanizado conlleva un serio desgaste del electrodo lo cual trae como consecuencia una vida corta del mismo y calidad de soldadura inconsistente. En sus ensayos utilizaron 600MPa de presión en la sujeción de la lámina. Obtuvieron como resultados aleaciones y deformaciones en los electrodos, lo cual hizo aumentar el diámetro del electrodo de manera prematura, ocasionando una tasa de desgaste más elevada

# CAPÍTULO 2

## *Marco Teórico*

---

### **2.1 PROCESO DE SOLDADURA**

Soldar es el proceso de unir o juntar metales (Pender, 2001). Aunque los métodos antiguos para soldar tienen poca o ninguna semejanza con las técnicas modernas, tanto los procesos antiguos como los modernos se clasifican en las dos siguientes categorías. El primer tipo de soldadura consiste en calentar dos piezas de metal hasta que se derriten y se funden entre sí. A éste se le llama soldadura con fusión. El segundo tipo se basa en calentar los metales hasta una temperatura inferior a su punto de fusión y unirlos con un metal de aporte fundido, o calentar los metales hasta que están blandos para martillarlos o unirlos a presión entre sí. Éste se llama soldadura sin fusión.

La soldadura por fusión es cualquier procedimiento para unir metales que implica fundir el metal base (el metal que se va a unir). La soldadura sin fusión es cualquier procedimiento para unir metales que no implique fundir el metal base. Por supuesto, ésta no incluye el empleo de tornillos o pernos, remaches, ni de cualquier sujetadores del tipo mecánico.

El método más antiguo para unir metales se basaba en calentar dos piezas de metal en una fragua hasta que estaban blandas y flexibles. Después, se martillaban o forjaban las piezas entre si o en un yunque y se dejaban enfriar y endurecer; cuando se martillaban las piezas juntas, no se fundían sino que se unían por la presión de los golpes; se considera que la forja es un tipo de soldadura sin fusión.

En los comienzos del siglo XX se popularizó otro método para unir metales: la soldadura por vaciado. Este método se utilizaba para reparar piezas fundidas que tenían grietas o defectos. Para hacer las piezas se vaciaba el metal fundido en un molde y se dejaba enfriar con lentitud, para que adopte su forma. Cuando se encontraba una pieza con grietas o defectos, se formaba un molde más pequeño alrededor de la zona defectuosa y se vaciaba hierro fundido sobre los bordes de la falla, una vez y otra vez hasta que se moldeaban los bordes después se cerraba el molde y se dejaba que el hierro enfriara y solidificara. Esta forma de soldar es una operación de vaciado (colado) en miniatura y de ahí su nombre de soldadura por vaciado. Debido a que el metal fundido que se vaciaba sobre la falla, en un momento dado fundía la superficie y bordes con que hacia contacto, a este proceso se le puede catalogar como el primer proceso de soldadura por fusión.

Ni la forja ni la soldadura por vaciado resultaron muy prácticas ya que las piezas grandes de metal no se podían soldar en forja y, a menudo, las uniones o soldaduras no eran fuertes ni duraderas. Aproximadamente en la misma época que se empezó a emplear la soldadura por vaciado, se perfeccionó un método para soldar por fusión, con lo cual se lograba una unión permanente que era tan fuerte o más que el metal base. La tecnología y la ciencia de la soldadura han avanzado con tal rapidez en los últimos años, que sería casi imposible enumerar todos los métodos de soldadura que se

emplean en la actualidad. Sin embargo, todos pueden clasificarse en cualquiera de las dos categorías: soldadura por fusión y soldadura sin fusión.

Los dos procesos principales en la soldadura por fusión son la soldadura con flama y la soldadura de arco. En los procesos de soldadura con flama se emplea el calor de los gases en combustión para fundir o calentar el metal base, también se suele hacer con flama de oxiacetileno, a este proceso se le llama soldadura oxiacetilénica (OAW). Sin embargo, en la industria se emplea a menudo mezclas de oxígeno y gases combustibles que no son el acetileno. El término general soldadura con oxígeno y gas combustible (OF) se aplica a las soldaduras en que se utiliza cualquier gas combustible.

En los procesos de soldadura por arco (AW) se emplea el calor creado por una corriente eléctrica para elevar la temperatura del metal base a la requerida para soldar. Se establece la corriente eléctrica entre el metal base y una varilla que sirve como electrodo, el cual se sujeta en un soporte especial que el soldador sostiene en la mano. El calor requerido para fundir el metal base proviene del arco que se crea cuando la corriente eléctrica salta en el espacio (o entrehierro) entre el extremo del electrodo y el metal base. En este proceso se funden ambos: el metal base y el electrodo. Se denomina soldadura con arco metálico desnudo (BMAW) y tiene aplicación muy limitada en las industrias actuales, ya que al no tener recubrimiento el grado de contaminación es mayor y el cordón de soldadura es de baja calidad (Pender, 2001).

Otros perfeccionamientos dieron origen a la protección del electrodo con un gas inerte o con un fundente granulado fino y, en algunos procesos, con una combinación de ellos. Dado que el metal fundido a menudo se vuelve quebradizo al exponerlo al aire, la finalidad de la protección es resguardar la soldadura. Cuando se utiliza un revestimiento o recubrimiento en el electrodo,

se llama soldadura con arco protegido (SMAW), Si se emplea un fundente granulado para proteger el electrodo se está hablando de soldadura con arco sumergido (SAW). Se llama soldadura con gas inerte cuando se utiliza este tipo de gas. Los dos procesos más comunes de soldadura con gas inerte son la soldadura con gas y arco de tungsteno (GTAW) y la soldadura con gas y arco de metal (GMAW). La soldadura MAG es un tipo de soldadura que utiliza un gas protector químicamente activo (dióxido de carbono, argón más dióxido de carbono o argón más oxígeno).

Hay dos procesos principales de soldadura sin fusión (Pender, 2001): Soldadura por resistencia y soldadura blanda y procesos afines, que incluyen la soldadura fuerte y con bronce.

En los procesos de soldadura blanda y afines, el metal base nunca se calienta hasta su punto de fusión. Tanto en ésta como en la fuerte, la unión se produce al permitir el flujo por acción capilar para atraer el metal de aleación fundido, a una abertura entre las piezas que se van a unir. Se considera soldadura sin fusión, ya que se funde el metal de aporte y no el metal base. La diferencia principal entre estos dos procesos es la temperatura a la cual se lleva a cabo. Por el contrario la soldadura con bronce no depende de la acción capilar, sino que las técnicas empleadas son similares a las de soldadura por fusión pero el metal base no se funde.

## **2.2 SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA**

La importancia de la soldadura por resistencia eléctrica en las industrias que trabajan con chapa fina o con alambre está aumentando día a día debido al incremento en la productividad que se puede lograr con este procedimiento (De Heredia, 1959). Además, con la calidad que se da a los trabajos con ella realizados debido al empleo de controles electrónicos, se ha

podido emplear en multitud de industrias de calidad, como, por ejemplo, en la fabricación de automóviles, en donde su empleo resulta ventajoso, al tratarse de fabricación de grandes series. Otros factores que han contribuido al rápido desarrollo de esta técnica, son la gran velocidad de producción, el poco consumo de energía durante la operación de soldar, la economía al no necesitar tratamiento posterior a la soldadura y el empleo de mano de obra poco especializada. A pesar de esto, este procedimiento de soldadura tiene los inconvenientes de utilizar máquinas que son costosas y, por lo tanto, llevan consigo un largo período de amortización y, además, estas máquinas son frecuentemente de gran potencia (300 a 500 KVA), por lo que son necesarias redes especiales para su conexión.

Hay máquinas de soldadura que se dedican exclusivamente a un fin determinado, por ejemplo, la construcción de un tipo de piezas, y hay otras máquinas que, por el contrario, pueden dedicarse a la realización de todo tipo de trabajos.

En la soldadura eléctrica por resistencia, el calor se genera por efecto Joule. Por consiguiente, la cantidad de calor en calorías es (De Heredia, 1959):

$$Q = 0,238 I^2 R t \quad (2.1)$$

Siendo  $I$  la corriente de soldadura en Ampere (A),  $R$  la suma de resistencias ofrecidas al paso de la corriente en ohm ( $\Omega$ ), y  $t$ , el tiempo en segundos (s) durante el cual pasa la intensidad  $I$ . Este es el principio básico a todos los procedimientos de soldadura por resistencia. Con el fin de que el calor aportado a la soldadura se mantenga dentro de límites bajos, con lo cual la potencia de la máquina será relativamente pequeña, hay que hacer que la suma de las resistencias sea pequeña, para lo cual todos los sumandos que

integran ésta han de serlo también. Para ello, hay que ejercer una presión sobre las superficies a soldar, y éstas han de estar limpias. La resistencia que se obtiene es casi inversamente proporcional a la presión de contacto en  $R_2$ ,  $R_6$  y  $R_4$  (**Figura 2.1**). Las resistencias  $R_3$  y  $R_5$  dependen del material a soldar, y, por tanto, como medio para obtener la cantidad total de calor  $Q$ , quedan como parámetros de soldadura la intensidad ( $I$ ) y el tiempo ( $t$ ), junto con la presión de soldadura.

La mayor resistencia que se encuentra en la soldadura es la  $R_4$ , la cual también puede variarse mediante la presión. Variando estos parámetros de soldadura se puede influir en la calidad de la unión obtenida.

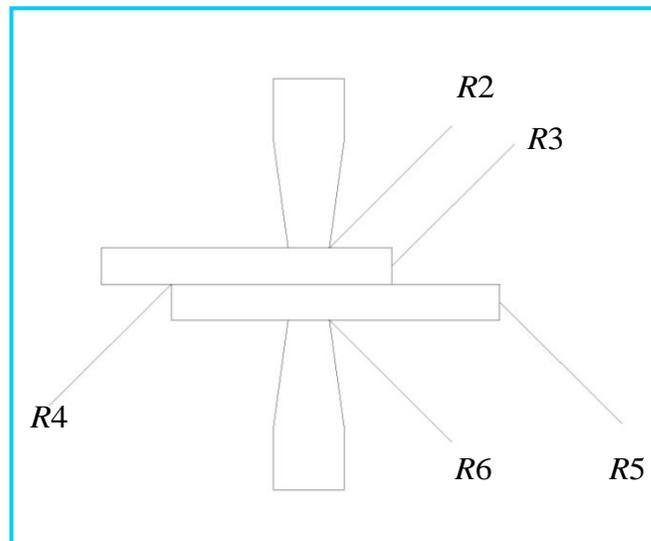


Figura 2.1. Resistencias al paso de corriente

El calor necesario para llevar el metal a su temperatura de soldadura depende del volumen del metal a calentar, de su calor específico y de las pérdidas térmicas. Estas pérdidas de calor son de dos clases: pérdidas por radiación y pérdidas por conducción. Las producidas por conducción en los electrodos son proporcionales a la superficie de la punta de éstos, y a la diferencia entre su temperatura y la del metal a soldar. También es

proporcional al tiempo de contacto entre el electrodo y la pieza. La pérdida de calor por conducción hacia el metal base adyacente y los electrodos se muestra en la **Figura 2.2** (O'Brien, 1996). Esta disipación de calor continúa con diferentes velocidades durante la aplicación de la corriente y después, hasta que la soldadura se ha enfriado a temperatura ambiente. La disipación puede dividirse en dos partes: Durante la aplicación de la corriente y después de interrumpida la corriente. El grado de disipación en la primera fase depende de su conductividad térmica, así como de su espesor, del coeficiente convectivo de calor y de la diferencia de temperaturas entre ellas y la temperatura ambiente.

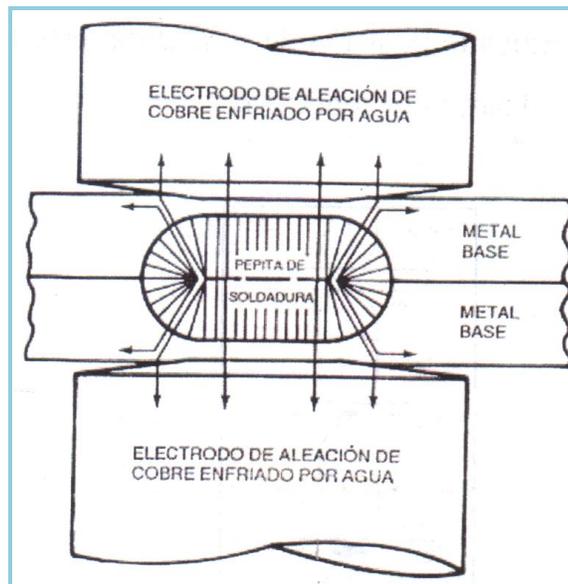


Figura 2.2. Disipación de calor hacia el metal base circundante y los electrodos durante la soldadura de resistencia (O'Brien, 1996)

El calor generado por un amperaje dado es inversamente proporcional a la conductividad eléctrica del metal base. En la mayor parte de los casos las conductividades térmicas y eléctricas de un metal son similares. En los metales de alta conductividad se requiere un amperaje elevado para producir una soldadura y compensar la rápida disipación de calor hacia el metal base

adyacente y los electrodos. En el caso de láminas gruesas de metal que generalmente requieren tiempos de soldadura mas largos, la velocidad de enfriamiento será mas lenta que cuando se sueldan láminas delgadas o se emplean tiempos de soldadura cortos (De Heredia, 1959).

La intensidad  $I$  necesaria variará con el material y con las condiciones de soldadura, y debe proveerse un control de este parámetro (De Heredia, 1959). Este control puede consistir en cambiar la razón de transformación del transformador de soldadura mediante un autotransformador que varíe la tensión primaria o por medios electrónicos.

Otro parámetro de la soldadura, el tiempo, puede controlarse mediante contactores magnéticos ajustados a mano, mecánicamente, eléctricamente, por motores síncronos o controles de tiempo por ignitrones, entre otros.

El parámetro restante, la presión, se puede controlar de forma mecánica, neumática o hidráulica, o bien por una combinación de estos métodos. La presión tiene por objeto el poner las piezas en íntimo contacto y, además, ha de cumplir como misiones específicas la de romper la película de óxido y gases que se forma sobre las chapas, presionar las piezas para juntarlas y limitar el paso de corriente a esa zona, reducir la formación de porosidades y de grietas en la zona soldada, reducir a un valor bajo las resistencias de contacto con los electrodos, impidiendo que éstos se peguen a las chapas, o que puedan formar con ellos una aleación, y producir la deformación en los cristales de los materiales a soldar y producir su recristalización.

Las máquinas que se emplean con este procedimiento son transformadores que tienen regulación de intensidad en el primario. En la **Figura 2.3** se da el esquema fundamental de una de estas máquinas. Las

tensiones secundarias en vacío que emplean son del orden de 1,5 a 15 voltios.

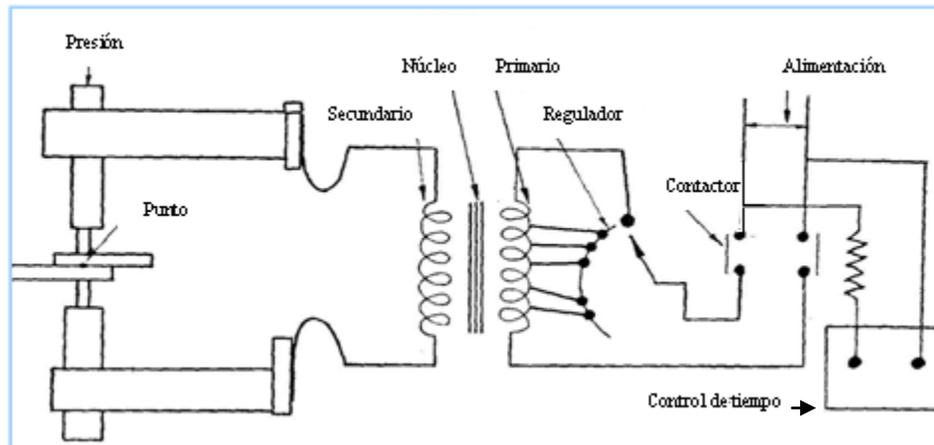


Figura 2.3. Esquema fundamental de una máquina soldadora por resistencia. (De Heredia, 1959)

### 2.2.1 Aplicaciones

Este método de unión no es aplicable para piezas que hayan sido proyectadas para su soldadura por fusión (oxiacetilénica o eléctrica por arco) o por remachado. Las piezas a unir por este procedimiento necesitan un proyecto específico. No obstante, sus aplicaciones se extienden a gran número de industrias y las principales son (De Heredia, 1959):

- **Aparellaje eléctrico:** Se emplea para la fabricación de las cajas, apoyos, soldadura de contactos sobre latón, contactos de plata o tungsteno sobre latón, resistencias de acero inoxidable, soldadura de hilos de cobre rojo sobre las armaduras de condensadores, etc.
- **Aparatos de medida:** Aplicaciones similares a las anteriores.

- **Armaduras para hormigón armado:** Se emplea la soldadura por resistencia para la fabricación de mallas, que tienen una rigidez mayor que la conseguida mediante ligaduras de alambre.
- **Industrias de armamento:** Fabricación de proyectiles, bombas de aviación, cartuchos, minas, etc.
- **Artículos de cocina:** sartenes, cucharones, etc.
- **Artículos de alambre:** Papeleras, jaboneras, portaequipajes, rejillas protectoras para radiadores o ventiladores, etc.
- **Industria de automóviles:** En esta industria se emplean todos los procedimientos conocidos y entra en la fabricación de las principales partes de un automóvil, tales como en la carrocería, en el chasis, tuberías, depósitos de gasolina, chapas, etc.
- **Industrias de aviación:** También en esta industria se utilizan todos los procedimientos conocidos para soldar por resistencia y, normalmente, se emplea sobre aceros inoxidables, aleaciones ligeras de magnesio y aluminio, titanio, etc. Las piezas que se sueldan en la industria aeronáutica son muy diversas y se extienden desde la soldadura de chapas interiores hasta la total fabricación de recipientes, o su participación, muy importante, en la construcción del fuselaje.
- **Carpintería metálica:** Mediante la soldadura con chispas, se emplea para la fabricación de ventanas y puertas metálicas, tanto en aceros normales como en inoxidables o aleaciones de aluminio. Hasta ahora no ha sido muy empleada en estructuras metálicas a causa de la

limitación de espesores a soldar con este procedimiento, a menos que se llegue a emplear grandes potencias.

- **Utensilios domésticos:** Mobiliario y elementos decorativos.
- **Material ferroviario:** Se emplea para la construcción de material móvil en las carrocerías de los coches y también en el material de vía, pudiendo hacerse la soldadura a tope de carriles mediante la soldadura con chispas.

En fin, son tantas y tan variadas las aplicaciones de la soldadura eléctrica por resistencia, que prácticamente abarcan a todo el campo de la industria moderna.

### **2.2.2 Clasificación de soldaduras por resistencia**

Se propone la siguiente clasificación para la soldadura por resistencia eléctrica (De Heredia, 1959):

#### **Soldadura por puntos**

La soldadura por puntos es un método de soldadura por resistencia, útil en láminas metálicas, que se logra mediante el calentamiento de una pequeña zona al hacer circular una corriente eléctrica. Las piezas que se van a unir están superpuestas, de manera que la corriente y la presión son aplicadas en un solo punto. Este proceso es explicado con mayor detenimiento más adelante.

## **Soldadura continua**

La soldadura continua, también conocida bajo los nombres de soldadura por ruedecillas y soldadura por costura, constituye un procedimiento de unión a solape, en el que ésta se consigue mediante una superposición de puntos de soldadura que se realizan por el desplazamiento de la pieza a soldar entre unos electrodos móviles o entre un electrodo móvil y un electrodo fijo, o por desplazamiento de las ruedas que forman los electrodos sobre la pieza que se trata de soldar.

## **Soldadura por protuberancias**

La soldadura eléctrica por protuberancias tiene su origen en la soldadura eléctrica por puntos. Este método, consiste en realizar por presión, o por cualquier otro método, una serie de protuberancias en una de las chapas a soldar, de manera que al aplicar los electrodos y, por consiguiente, la presión a las mismas, el paso de la intensidad de soldadura se realiza en todos los puntos de contacto de las piezas. Para ello, lo único necesario es que los electrodos tengan la longitud adecuada.

## **Soldadura a tope**

Bajo esta denominación distinguimos dos procedimientos: soldadura a tope con chispas, y soldadura a tope por presión.

Estos dos procedimientos son fundamentalmente diferentes. El primero, se trata de un procedimiento en que intervienen la soldadura por resistencia, la formación de arcos y una presión, mientras que el segundo, es un procedimiento puro de soldadura por resistencia.

La soldadura con chispas es cada vez más importante, por el gran número de aplicaciones que encierra, no sólo en la carpintería metálica de aleaciones ligeras, sino también en la fabricación de ejes, eslabones de cadenas, unión heterogénea de metales, etc.

### **Soldadura por resistencia a tope por presión**

Este método recibe su nombre debido a que en él no entran nada más que los factores o parámetros que son normales en la soldadura por resistencia, siendo la presión el principal, así como a producirse el calentamiento mediante el efecto Joule. Las piezas a soldar quedan fijas por unas mordazas portadoras de corriente. Las piezas se ponen en contacto, y cuando han llegado a su punto de fusión, gracias al calentamiento producido por el efecto Joule, se inicia una fuerte presión de forja que realiza la soldadura.

### **Soldadura con chispas**

En este procedimiento las piezas también están sujetas por unas mordazas portadoras de corriente, que son a la vez, las encargadas, mediante un sistema mecánico apropiado, de transmitir la presión final de soldadura, así como de realizar los movimientos que han de ejecutar las piezas durante la ejecución de la operación.

## **2.3. SOLDADURA POR PUNTOS (ELECTROPUNTO)**

La soldadura por puntos es el procedimiento de soldadura por resistencia que está más extendido (De Heredia, 1959). Su representación esquemática se da en la **Figura 2.4**. El punto de soldadura constituye un falso remache, esto es, une las chapas de manera similar a como lo hace un

remache, excepto que no existe aportación de otro elemento distinto para lograr la unión. La soldadura se logra haciendo pasar una corriente eléctrica, localizada exactamente en un punto entre las chapas que se van a unir mediante este proceso.

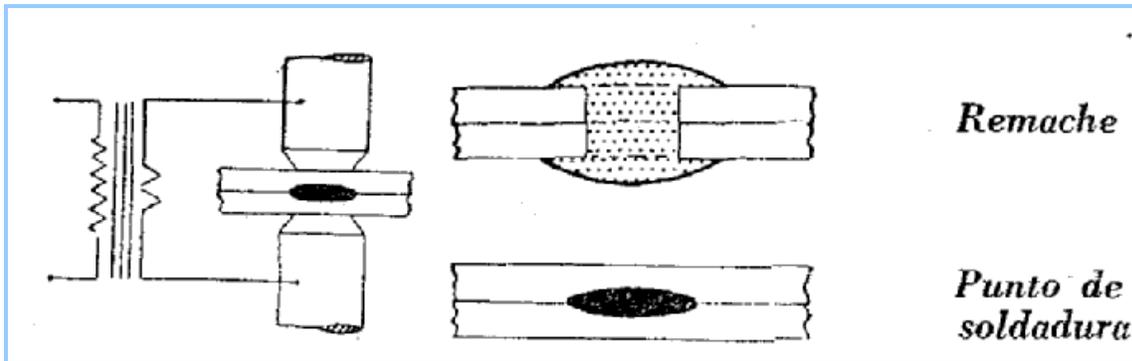


Figura 2.4. Remache vs. Punto de soldadura. (De Heredia, 1959).

Se realiza una operación metalúrgica de fusión, y el punto conseguido muestra una estructura cristalina típica de las logradas en un crisol de fundición. El calor necesario para esta fusión es el conseguido por el efecto Joule, al paso de una corriente eléctrica.

El espesor de las chapas a soldar tiene importancia sobre la intensidad necesaria, ya que con espesores grandes la fuga del calor durante la soldadura será más importante que con espesores delgados, y, por consiguiente, al soldar aquéllos, habrá que emplear mayores intensidades de soldadura o tiempos más largos (De Heredia, 1959). La forma en que se realiza esta pérdida de calor puede verse en la **Figura 2.5**, en la cual se ve que el calor perdido es mayor en el caso de chapas gruesas.

Otro de los factores que intervienen en la soldadura es la composición química de las chapas a soldar, ya que los materiales que tienen una gran

conductibilidad térmica y eléctrica requieren una corriente de soldadura mayor, entre otras causas por ser menor su resistencia eléctrica.

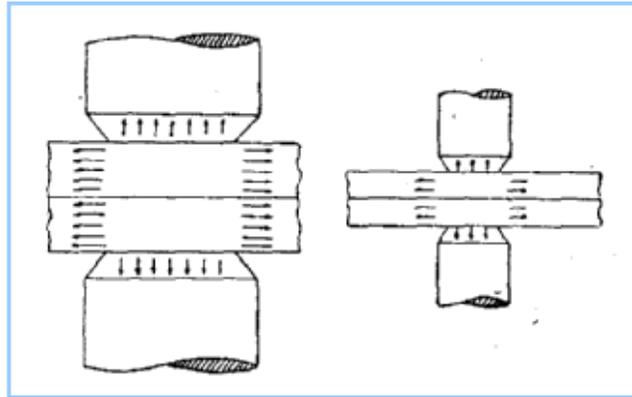


Figura 2.5. Pérdida de calor, en la cual se ve que el calor perdido es mayor en el caso de chapas gruesas. (De Heredia, 1959)

### 2.3.1. Electrodo

En la soldadura por punto, un factor de gran importancia son los electrodos. Estos deben satisfacer la condición de tener una resistencia eléctrica muy débil y una conductividad térmica muy grande, a la vez que tengan una dureza en caliente lo mas alta posible. Los electrodos son de cobre aleado con alguno de los elementos siguientes: plata, cadmio, cromo, y berilio, en cantidades relativamente pequeñas y sometidas luego a un tratamiento térmico. El cobre puro no se emplea a causa de su poca resistencia mecánica tanto a temperaturas altas como bajas. (O'Brien, 1996).

Los electrodos para soldadura de resistencia tienen cuatro funciones:

1. Conducen la corriente de soldadura al trabajo y fijan la densidad de corriente en la zona de soldadura. La densidad de corriente la determina el tamaño y la forma de la zona de contacto.

2. Transmiten una fuerza a la pieza de trabajo.
3. Disipan parte de calor de la zona de soldadura.
4. Mantiene la alineación y posición relativa de la pieza de trabajo.

Sino se requiriera aplicar presión, la selección del material de los electrodos podría hacerse casi exclusivamente con base en sus conductividades eléctricas y térmicas. Puesto que los electrodos se someten a fuerzas que con frecuencia son de magnitud considerable, deben ser capaces de aguantar los esfuerzos impuestos a temperaturas elevadas sin una deformación excesiva. Es importante que los electrodos tengan la forma correcta por que la corriente debe limitarse a un área fija para poder lograr la densidad de corriente requerida.

Existen dos tipos de electrodos: bombeados (**Figura 2.6**) y troncocónicos (**Figura 2.7**). Los electrodos bombeados presentan varias ventajas, entre ellas el que la alineación de los electrodos es menos importante que empleando electrodos troncocónicos, y que las deformaciones producidas en la pieza son menores (**Figura 2.8**); Son más duraderos ya que su radio se adapta mas al espesor del material, debido a que la presión es máxima en el centro del punto, y da lugar al desgarre de la capa de oxido y a la formación rápida de pequeños surcos conductores cuando la densidad de corriente es alta (Hufnagel, Coca y Company, 1992) además, tienen más facilidad de adaptación para diferentes espesores de chapas y una refrigeración más fácil.

El diámetro de los electrodos, o el radio de curvatura del bombeado, ha de elegirse en función del espesor a soldar. Esta dimensión tiene gran importancia, ya que establece la densidad de corriente en las chapas se determina mediante la **Tabla 2.1**, o mediante la ecuación 2.4

:

$$\text{Diámetro del electrodo} = 2e + 2,5 \text{ (mm) } \acute{o}$$

$$\text{Diámetro del electrodo} = 5 \sqrt{e} \text{ (mm)} \quad (2.4)$$

Donde  $e$  es el espesor de la lámina mas delgada y se mide en milímetros. Es evidente que para una misma intensidad el calentamiento será menos localizado, más lento, y puede ser insuficiente para provocar la fusión cuando se tiene un gran radio de curvatura del bombeado o un gran diámetro en el troncocónico.

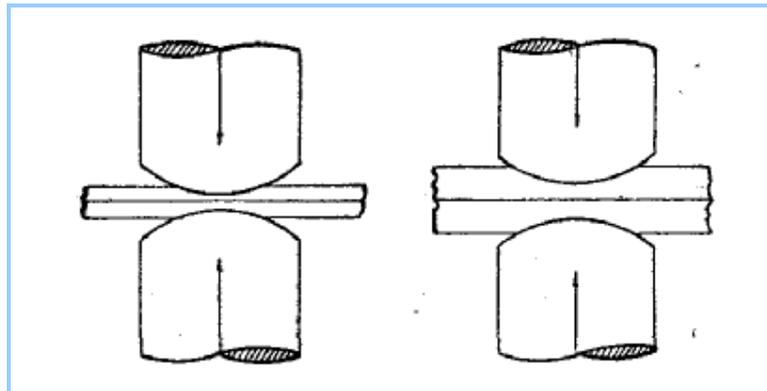


Figura 2.6. Superficie de contacto: Electrodo bombeados. (De Heredia, 1959).

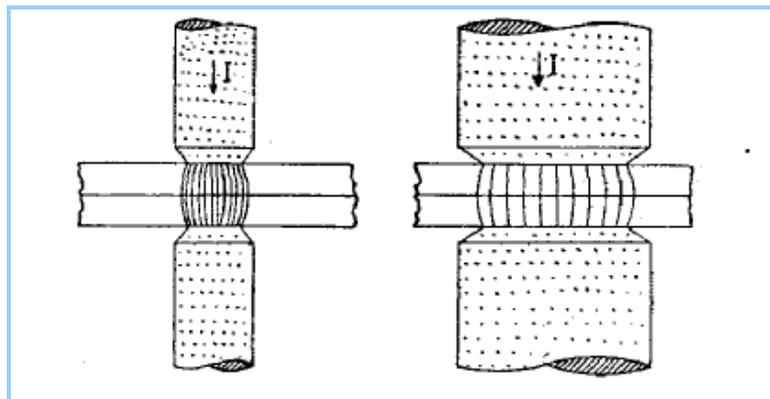


Figura 2.7. Superficie de contacto: Electrodo Troncocónicos. (De Heredia, 1959).

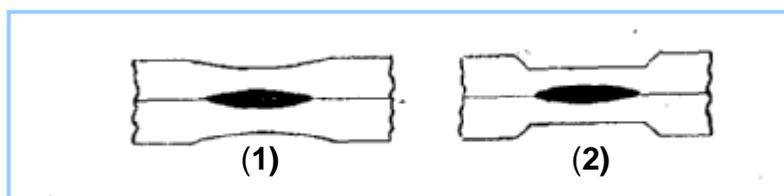


Figura 2.8. Deformación de las piezas debido a los electrodos: (1) Bombeado y (2) Troncocónicos. (De Heredia, 1959).

Tabla 2.1: Espesor de la chapa, diámetro del electrodo y curvatura de bombeado. (De Heredia, 1959).

| Espesor de la chapa, en mm | Diámetro del electrodo, en mm | Curvatura del bombeado del electrodo, en mm |
|----------------------------|-------------------------------|---|
| 1                          | 4,5                           | 50  |
| 2                          | 6,5                           | 75  |
| 3                          | 8,5                           | 75  |
| 4                          | 10,5                          | 100   |
| 5                          | 12,5                          | 100   |
| 6                          | 14,5                          | 150   |
| 7                          | 16,5                          | 200   |
| 8                          | 18,5                          | 200   |

Los puntos realizados por soldadura deben de tener un diámetro mínimo de acuerdo con el espesor de la pieza más delgada que se vaya a soldar. A continuación se presenta una serie de valores sugeridos para soldar láminas de acero de bajo carbono sin recubrimiento (**Tabla 2.2**)

Tabla 2.2: Programas sugeridos para soldadura por puntos de láminas de acero de bajo carbono sin recubrimiento. (Enriquez y Malavé, 2004)

| Espesor<br>Pulg | Tiempo de<br>Soldadura<br>(60 Hz)<br>Ciclos | Corriente de<br>Soldadura<br>(Aprox)<br>A | Espaciado de<br>soldaduras mínimo |                   | Diámetro<br>mínimo<br>pepita<br>Pulg |
|-----------------|---|---|-----------------------------------|-------------------|--------------------------------------|
|                 |   |   | Pila de 2<br>Pulg                 | Pila de 3<br>Pulg |                                      |
| 0,02            | 7   | 8500                                      | 0,38                              | 0,62              | 0,1                                  |
| 0,025           | 8   | 9500                                      | 0,62                              | 0,88              | 0,12                                 |
| 0,03            | 9   | 10500                                     | 0,62                              | 0,88              | 0,14                                 |
| 0,035           | 9   | 11500                                     | 0,75                              | 1,06              | 0,16                                 |
| 0,04            | 10  | 12500                                     | 0,75                              | 1,06              | 0,18                                 |
| 0,045           | 11  | 13000                                     | 0,94                              | 1,18              | 0,19                                 |
| 0,05            | 12  | 13500                                     | 0,94                              | 1,18              | 0,2                                  |
| 0,055           | 13  | 14000                                     | 1,06                              | 1,31              | 0,21                                 |
| 0,06            | 14  | 15000                                     | 1,06                              | 1,31              | 0,23                                 |
| 0,07            | 16  | 16000                                     | 1,18                              | 1,5               | 0,25                                 |
| 0,08            | 18  | 17000                                     | 1,38                              | 1,6               | 0,26                                 |
| 0,09            | 20  | 18000                                     | 1,56                              | 1,88              | 0,27                                 |
| 0,105           | 23  | 19500                                     | 1,68                              | 2                 | 0,28                                 |
| 0,12            | 26  | 21000                                     | 1,81                              | 2,5               | 0,3                                  |

Cuando los espesores sean muy diferentes o cuando se suelden más de tres piezas se pueden aumentar en un 20% los diámetros de la **Tabla 2.2**. Cuando se observe que la resistencia mecánica obtenida no es suficiente, se aumentará el tiempo de soldadura.

El desgaste presentado por los electrodos se debe a la fluencia del material por efecto de las altas temperaturas alcanzadas y además por estar sometidos constantemente a esfuerzos de compresión. También ocurre que parte de las láminas que están siendo soldadas, se quedan adheridas al electrodo provocando el desgaste del mismo. La vida útil se mide en puntos de soldadura por electrodo (puntos de soldadura realizados antes de que sea necesario la rectificación) y según el criterio de algunas ensambladoras, cuando el punto de soldadura varía en un 20% con respecto al diámetro inicial de contacto del electrodo con la lámina, éste debe ser cambiado o ser rectificado (Zambrano, 2008)

### **2.3.2. Resistencia mecánica de la soldadura**

La resistencia mecánica del punto sometido a fuerzas de corte la determina el área de sección transversal del mismo (O'Brien, 1996). Normalmente, cuando la resistencia mecánica es baja, la falla se produce por cizallamiento del punto de soldadura y cuando es alta, la falla es originada por desgarramiento del metal base. Se requiere un diámetro de soldadura mínimo para que pueda haber falla por desgarre del metal base. Éste es único para el tipo de material, condición superficial y si se aplica, tipo de recubrimiento.

Si el diámetro de soldadura se aumenta por encima de éste valor mínimo, puede obtenerse un aumento en la resistencia mecánica de la soldadura.

### **2.3.3. Parámetros de soldadura**

Para la intensidad de soldadura se utiliza tanto corriente alterna (CA) como corriente continua (CC). La maquina de soldar transforma la potencia de la línea a potencia de soldadura de bajo voltaje y alto amperaje (O'Brien, 1996). Algunas aplicaciones emplean CA monofásica con la misma frecuencia que la línea de alimentación, por lo general 60 Hz. La CC se emplea en aplicaciones que requieran un amperaje elevado por que la carga puede equilibrarse en una línea de potencia trifásica. Su empleo también reduce las perdidas de potencia en el circuito secundario. La CC puede ser prácticamente constante durante un periodo medido o adoptar la forma de un pulso de pico pronunciado. Esta última se produce a partir de energía eléctrica almacenada.

El tiempo de aplicación de la corriente o tiempo de soldadura cuando la potencia no es energía almacenada, se controla mediante mecanismos

electrónicos, mecánicos, manuales o neumático. Los tiempos normalmente van desde medio ciclo (1/120 s) para laminas muy delgadas hasta varios segundos para placas gruesas. En las maquinas de energía almacenada del tipo de condensador magnética el tiempo de soldadura lo determina la constante eléctrica del sistema.

El papel que desempeña la presión es el de reducir la resistencia de contacto entre las piezas y los electrodos, además de permitir una refrigeración lenta del punto de soldadura, una vez realizado. Cuando la soldadura se realiza a presión constante, el valor de ésta debe ser el producido por una fuerza de compresión ( $f$ ) en Newton (De Heredia, 1959):

$$f = 1030,05e \quad (2.5)$$

En donde  $e$ , es el espesor total a soldar en milímetros. Esta fórmula no es cierta nada más que dentro de una estrecha gama de espesores, y luego varía con éstos. Como fórmulas más exactas se pueden dar las siguientes (De Heredia, 1959):

- **Piezas de acero con superficie con alta calidad superficial:** El esfuerzo de compresión en Newton ( $N$ ) es:

$$f = 22,563.e^{3,2} + 392,4 \quad (2.6)$$

En donde  $e$ , es el espesor de la pieza más delgada en milímetros. Esta fórmula es válida para la unión de dos espesores iguales o diferentes y para cualquier valor de  $e$ , al menos igual a 1mm. Cuando se trate de soldar tres espesores iguales, se escogerá el espesor de una de las piezas aumentado en un 20%.

- **Piezas de acero con superficie con calidad superficial media:** En este caso, que se da a veces en la industria, el esfuerzo de compresión en Newton ( $N$ ) será:

$$f = 58,86 \cdot e^3 + 49 \quad (2.7)$$

Donde  $e$  es el espesor en milímetros. En el caso de tener tres piezas se aumenta, como en el caso anterior, el espesor  $e$  en un 20%.

- **Piezas de acero con superficie de contacto con baja calidad superficial:** Este caso es el típico de la mayoría de las aplicaciones industriales de la soldadura por resistencia. El esfuerzo de compresión en Newton ( $N$ ) es de:

$$f = 392,4 \cdot e^{2,3} + 1569,6 \quad (2.8)$$

Donde  $e$  es el espesor en milímetros. Se procede, como en los casos anteriormente citados para cuando se trata de la soldadura de tres chapas.

Otra función de la presión es la de provocar un forjado del metal al final de la realización del punto, con lo cual se consigue afinar el grano de la estructura metalúrgica y, por consiguiente, obtener una resistencia superior a la del metal de base. Los medios de variar la presión así como de controlarla son, como también se ha dicho anteriormente, mecánicos, neumáticos o hidráulicos.

## **2.4. MÁQUINAS DE SOLDAR POR RESISTENCIA**

Son muy diversas las maquinas utilizadas para la soldadura por resistencia eléctrica, a continuación se presenta una descripción general de cada una de ellas (De Heredia, 1959):

### **2.4.1. Máquinas de soldar por puntos**

Las máquinas de soldar por puntos consisten, en general, en un transformador que está alojado en una carcasa que encierra también todos los órganos de regulación y de la cual parten unos terminales denominados “brazos”, que son portadores de los electrodos, a los cuales se suministra corriente mediante unos cables.

Existen dos tipos de máquinas de soldar por resistencia, las de tipo estacionario y las móviles. Las de tipo estacionario, pueden ser de brazos de palanca, con los cuales la presión se controla en parte mediante ellos y máquinas de presión directa. Ambos tipos se pueden manejar con el pie, con aire comprimido, o mediante motores.

Existen también las llamadas “pistolas” de soldar, que permiten la realización del punto de soldadura a distancia del transformador.

Estas máquinas pueden ser para la realización de puntos únicos o puntos múltiples empleando una pareja de electrodos en el primer caso y varios electrodos en el otro.

#### **2.4.2. Máquinas de soldar por costura**

Constan del transformador, los mecanismos de control y, como pieza esencial, de las ruedas electrodos, una de las cuales se sustituye a veces por una mesa o plataforma, cuando la soldadura sea rectilínea.

#### **2.4.3. Máquinas de soldar por protuberancias**

Las máquinas que se emplean para este procedimiento son las descritas para la soldadura por puntos, con la diferencia de que al emplear presiones mayores necesitan una estructura más fuerte, con objeto de reducir la flecha que pueda presentarse en la superficie sobre la que va a soldarse.

#### **2.4.4. Máquinas de soldar a tope**

Las máquinas de soldar a tope constan también de un transformador, y como elemento esencial, de un sistema mecánico que permite aplicar la presión de la forma adecuada al procedimiento de que se trate.

### **2.5. Control electrónico de máquinas de soldar por resistencia**

Los parámetros de soldadura, presión e intensidad de corriente de los electrodos, admiten variación en función del tiempo y sus valores son diferentes cuando éste cambia. La regulación de esta variación puede obtenerse mediante medios manuales o automáticos (De Heredia, 1959).

Con medios manuales la regulación queda al juicio y habilidad del operario que ha de medir el tiempo de paso de la corriente previamente fijada, así como regular la presión. Si la regulación de estos parámetros no es

exacta, se obtienen soldaduras de mala calidad y, a veces, no se llega a producir una verdadera soldadura, incluso cuando se trata de máquinas sencillas. Para evitar esto y tener un control exacto, la corriente de soldadura y su período de paso se pueden regular mediante contactores electrónicos, que normalmente están accionados por ignitrones y tiratrones.

El control de la intensidad de corriente en una máquina normal de soldadura por resistencia, se hace por uno de estos tres métodos:

- **Con tornas en el primario del transformador**

Con este método se consigue variar la razón de transformación del transformador de soldadura, y, por consiguiente, cambiar el valor de la tensión secundaria que, a su vez, da por resultado la variación de la intensidad de soldadura (**Figura 2.9**).

- **Mediante un autotransformador**

La corriente de soldadura se puede cambiar variando el valor de la tensión que recibe el arrollamiento primario del transformador de soldadura mediante un autotransformador que se intercala entre la línea de suministro de energía y el transformador de soldadura (**Figura 2.10**).

- **Control mediante válvulas electrónicas**

Cuando las válvulas electrónicas se emplean como interruptor en el circuito primario del transformador de soldadura, la tensión de éste puede variar en pequeños incrementos cambiando el punto en el que se hacen conductoras las válvulas cada medio período. Simplemente, por el ajuste de una pequeña resistencia la corriente de soldadura puede variarse del 20% al

100% de su valor total, a la vez que se logra un ajuste más exacto de la corriente. **(Figura 2.11)**

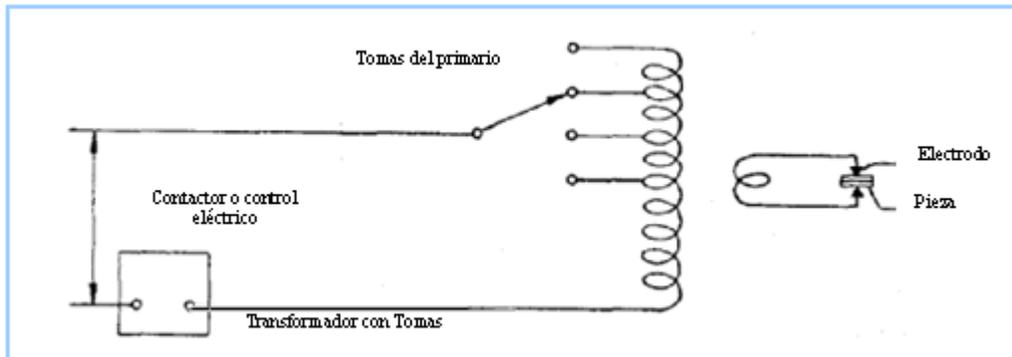


Figura 2.9. Control con tornas en el primario del transformador. (De Heredia, 1959)

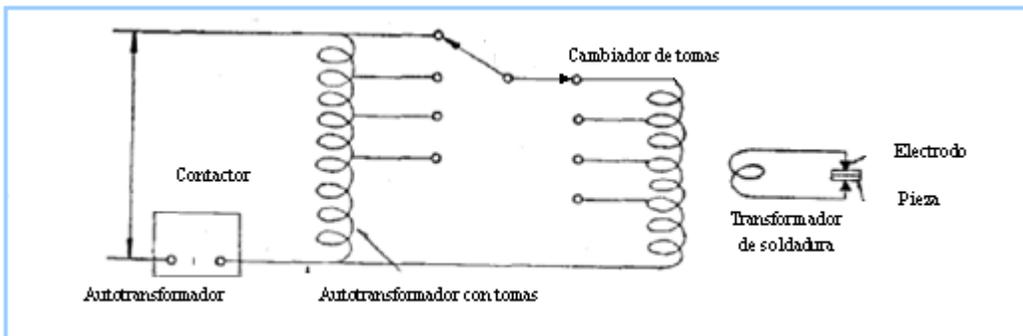


Figura 2.10. Control mediante un autotransformador. (De Heredia, 1959)

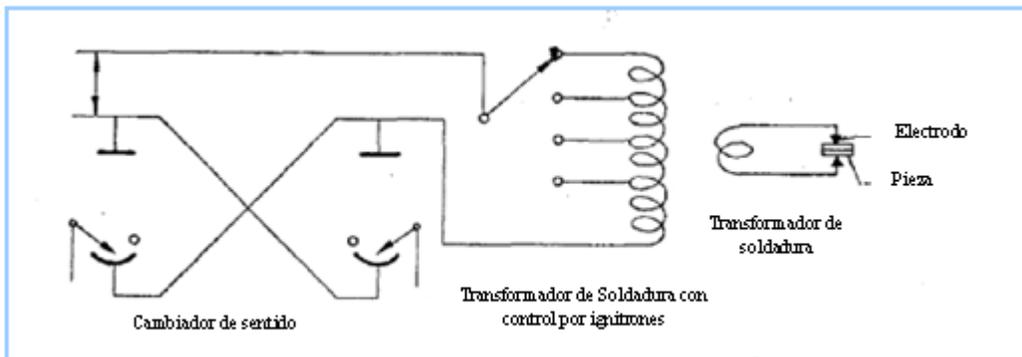


Figura 2.11. Control mediante válvulas electrónicas. (De Heredia, 1959)

## 2.6. VALORES DE LOS PARÁMETROS TIEMPO E INTENSIDAD DE CORRIENTE

El manual de soldadura por resistencia eléctrica (Enríquez y Malave, 2004), presenta los valores de tiempo e intensidad de corriente para las distintas configuraciones de la máquina de soldadura por resistencia eléctrica ubicada en el Laboratorio de Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo:

Tabla 2.3 Valores para la posición 1 del temporizador. (Enríquez y Malave, 2004).

| <b>Posición temporizador</b>    | <b>1</b> |          |          |          |          |          |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Posición Interruptor (A)</b> | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> |
| <b>Amperaje (A)</b>             | 0        | 2970     | 4130     | 5080     | 5630     | 6590     |
| <b>Tiempo (ciclos)</b>          | 0        | 4        | 4        | 4        | 4        | 4        |

Tabla 2.4 Valores para la posición 2 del temporizador. (Enríquez y Malave, 2004).

| <b>Posición temporizador</b>    | <b>2</b> |          |          |          |          |          |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Posición Interruptor (A)</b> | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> |
| <b>Amperaje (A)</b>             | 0        | 3420     | 4240     | 5220     | 5920     | 6430     |
| <b>Tiempo (ciclos)</b>          | 0        | 9        | 9        | 9        | 9        | 9        |

Tabla 2.5 Valores para la posición 3 del temporizador. (Enríquez y Malave, 2004).

| <b>Posición temporizador</b>    | <b>3</b> |          |          |          |          |          |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Posición Interruptor (A)</b> | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> |
| <b>Amperaje (A)</b>             | 0        | 3460     | 4380     | 5290     | 6030     | 6530     |
| <b>Tiempo (ciclos)</b>          | 0        | 14       | 14       | 14       | 14       | 14       |

Tabla 2.6 Valores para la posición 4 del temporizador. (Enríquez y Malave, 2004).

| Posición temporizador    |   | 4    |      |      |      |      |
|--------------------------|---|------|------|------|------|------|
| Posición Interruptor (A) | 0 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Amperaje (A)             | 0 | 3360 | 4350 | 5290 | 6140 | 6700 |
| Tiempo (ciclos)          | 0 | 19   | 19   | 19   | 19   | 19   |

Tabla 2.7 Valores para la posición 5 del temporizador. (Enríquez y Malave, 2004).

| Posición temporizador    |   | 5    |      |      |      |      |
|--------------------------|---|------|------|------|------|------|
| Posición Interruptor (A) | 0 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Amperaje (A)             | 0 | 3420 | 4350 | 5330 | 6090 | 6660 |
| Tiempo (ciclos)          | 0 | 24   | 24   | 24   | 24   | 24   |

Tabla 2.8 Valores para la posición 6 del temporizador. (Enríquez y Malave, 2004).

| Posición temporizador    |   | 6    |      |      |      |      |
|--------------------------|---|------|------|------|------|------|
| Posición Interruptor (A) | 0 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Amperaje (A)             | 0 | 3430 | 4360 | 5350 | 6110 | 6760 |
| Tiempo (ciclos)          | 0 | 32   | 32   | 32   | 32   | 32   |

Tabla 2.9 Valores para la posición 7 del temporizador. (Enríquez y Malave, 2004).

| Posición temporizador    |   | 7    |      |      |      |      |
|--------------------------|---|------|------|------|------|------|
| Posición Interruptor (A) | 0 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Amperaje (A)             | 0 | 3420 | 4400 | 5360 | 6160 | 6710 |
| Tiempo (ciclos)          | 0 | 42   | 42   | 42   | 42   | 42   |

Tabla 2.10 Valores para la posición 8 del temporizador. (Enríquez y Malave, 2004).

| Posición temporizador    | 8 |      |      |      |      |      |
|--------------------------|---|------|------|------|------|------|
| Posición Interruptor (A) | 0 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Amperaje (A)             | 0 | 3440 | 4380 | 5380 | 6190 | 6740 |
| Tiempo (ciclos)          | 0 | 59   | 59   | 59   | 59   | 59   |

Tabla 2.11 Valores para la posición 9 del temporizador. (Enríquez y Malave, 2004).

| Posición temporizador    | 9 |      |      |      |      |      |
|--------------------------|---|------|------|------|------|------|
| Posición Interruptor (A) | 0 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Amperaje (A)             | 0 | 3500 | 4480 | 5470 | 6260 | 6790 |
| Tiempo (ciclos)          | 0 | 150  | 150  | 150  | 150  | 150  |

Tabla 2.12 Valores para la posición 10 del temporizador. (Enríquez y Malave, 2004).

| Posición temporizador    | 10 |      |      |      |      |      |
|--------------------------|----|------|------|------|------|------|
| Posición Interruptor (A) | 0  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Amperaje (A)             | 0  | 3540 | 4490 | 5460 | 6210 | 6780 |
| Tiempo (ciclos)          | 0  | 198  | 198  | 198  | 198  | 198  |

## 2.7. ENSAYO DESTRUCTIVO PEEL

La norma para ensayos destructivos Peel (Pelado) en puntos de soldadura por resistencia (Norma ISO 10447:2007), especifica el procedimiento y las herramientas recomendadas para dicha prueba, aplicable a soldaduras hechas en dos o más láminas de metal con espesores entre 0.5mm y 3.0mm. El objetivo del ensayo es medir el punto de soldadura y el tipo de falla que se presenta al separar las láminas.

Este ensayo consiste en despegar dos laminas que han sido unidas previamente con soldadura por resistencia eléctrica (Electro punto); al hacer esto, parte de una de las láminas queda adherida a la otra (falla por desgarramiento) o ambas láminas quedan separadas con una marca rompiéndose solo el punto de soldadura (falla por cizallamiento).

Esta porción de lamina que queda adherida posee normalmente una forma circular, a la cual se le miden dos diámetros perpendicularmente, para luego sacar un promedio que será comparado con el diámetro del punto de contacto del electrodo; mientras mas similar sean dichos diámetros mejor habrá sido la soldadura.

# CAPÍTULO 4

## *Resultados, Análisis y Discusión*

---

Para comparar el desgaste de los electrodos utilizados en la soldadura por resistencia eléctrica se llevaron a cabo una serie de ensayos. Los primeros para obtener los valores de intensidad de corriente y tiempo adecuados para cada espesor. Posteriormente se realizaron las pruebas de desgaste para dos geometrías de electrodos diferentes (truncocónicos y bombeados) y para dos espesores de láminas diferentes utilizando los parámetros encontrados con los primeros ensayos. Los resultados obtenidos en cada una de las pruebas fueron tabulados.

### **4.1. Ensayos de soldadura por resistencia eléctrica en función de la intensidad de corriente. (Espesor 0.9mm)**

La obtención de la intensidad adecuada para la realización del ensayo se obtuvo dejando fijo el temporizador y variando el interruptor de corriente. Se tomaron cinco muestras de cada posición del interruptor y se hizo el ensayo destructivo Peel, que consiste en separar las láminas unidas y luego medir dos diámetros perpendiculares del punto de soldadura.



Figura 4.1. Lámina para ensayo Peel en función de la intensidad y tiempo.

Tabla 4.1. Valores de diámetro en función de la intensidad de corriente. (Espesor 0.9mm)

| Muestra | Equipo      |          |             |        | Ensayo PEEL |      |           |
|---------|-------------|----------|-------------|--------|-------------|------|-----------|
|         | Intensidad  |          | Tiempo      |        | D1          | D2   | (D1+D2)/2 |
|         | Interruptor | Amperaje | Interruptor | Ciclos | (mm)        | (mm) | (mm)      |
| I.3.1   | 3           | 5220     | 2           | 9      | 3,3         | 3,4  | 3,35      |
| I.3.2   | 3           | 5220     | 2           | 9      | 2,5         | 2,7  | 2,6       |
| I.3.3   | 3           | 5220     | 2           | 9      | 3           | 3,1  | 3,05      |
| I.3.4   | 3           | 5220     | 2           | 9      | 3,1         | 3,2  | 3,15      |
| I.3.5   | 3           | 5220     | 2           | 9      | 3,3         | 3,2  | 3,25      |
| I.4.1   | 4           | 5920     | 2           | 9      | 3,5         | 3,4  | 3,45      |
| I.4.2   | 4           | 5920     | 2           | 9      | 4           | 3,8  | 3,9       |
| I.4.3   | 4           | 5920     | 2           | 9      | 4           | 4,1  | 4,05      |
| I.4.4   | 4           | 5920     | 2           | 9      | 4,1         | 3,9  | 4         |
| I.4.5   | 4           | 5920     | 2           | 9      | 3,7         | 3,8  | 3,75      |
| I.5.1   | 5           | 6430     | 2           | 9      | 4,6         | 4,5  | 4,55      |
| I.5.2   | 5           | 6430     | 2           | 9      | 4,7         | 4,8  | 4,75      |
| I.5.3   | 5           | 6430     | 2           | 9      | 4,7         | 4,8  | 4,75      |
| I.5.4   | 5           | 6430     | 2           | 9      | 4,7         | 4,7  | 4,7       |
| I.5.5   | 5           | 6430     | 2           | 9      | 4,7         | 4,6  | 4,65      |

Se pudo observar en la gráfica realizada a partir de los valores de la **Tabla 4.1** que para la posición 5 del interruptor que equivale a 6430 Amper y para la posición 2 del temporizador que equivale a 9 ciclos se obtuvo el diámetro mas cercano a la dimensión inicial del diámetro del electrodo, es por ello que se seleccionaron dichos parámetros como valores adecuados para la soldadura de una lámina de acero ASTM 366 con un espesor de 0,9mm. Existen puntos en las primeras diez muestras en los que se observa una disminución considerable, esto se debe a que, al tratarse de fallas por cizallamiento, los diámetros no siguen una tendencia definida.

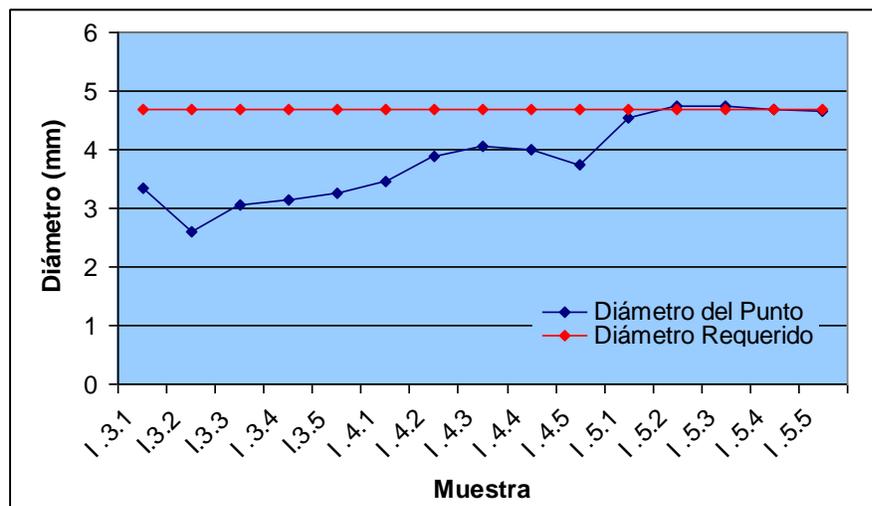


Figura 4.2. Diámetro de puntos en función de intensidad de corriente. (Espesor 0.9mm)

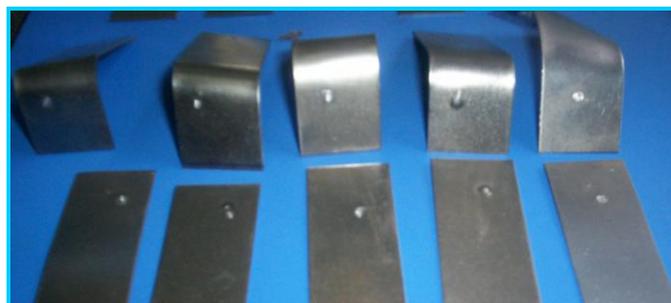


Figura 4.3. Muestras del ensayo Peel después de ser separadas (Falla por cizallamiento)



Figura 4.4. Muestras del ensayo Peel después de ser separadas (Falla por desgarramiento)

#### **4.2. Ensayo de desgaste para las dos geometrías de electrodo seleccionadas (Espesor 0.9mm y sin enfriamiento).**

Para hacer la comparación del desgaste de los electrodos Truncocónicos con los electrodos Bombeados, sin utilizar el sistema de enfriamiento, se realizaron ensayos de desgaste (unir continuamente láminas de acero ASTM 366 con dimensiones de 600x25,4mm) y se toma una muestra cada treinta puntos para evaluar la soldadura mediante el ensayo destructivo Peel.

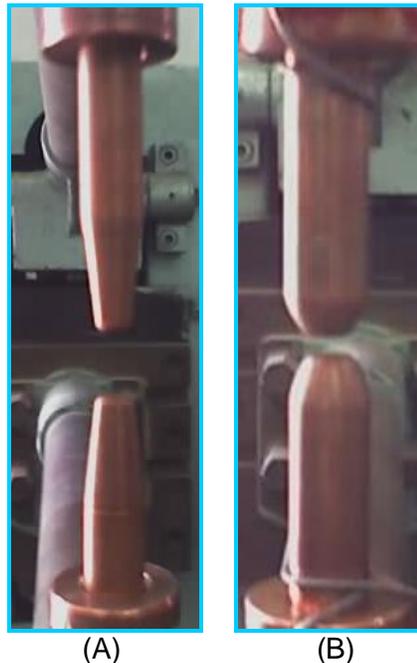


Figura 4.5. (A) Electrodo Truncocónicos y (B) Electrodo Bombeados.

**4.2.1. Ensayos con electrodo Troncocónico (e = 0,9mm, sin enfriamiento)**

A partir de los datos obtenidos en la **Tabla 4.2** se observó que a medida que aumentan los puntos de soldadura, el diámetro del electrodo en contacto con la lámina experimentó un crecimiento, esto trae como consecuencia una disminución de la densidad de corriente (O'Brien, 1996) y por lo tanto el diámetro del punto de soldadura se hizo menor (**Figura 4.6**). A los 300 puntos se observa un salto en la tendencia de la gráfica, debido a que la muestra presentó un punto defectuoso, es decir, un diámetro mucho mayor al esperado. El ensayo se detuvo a los 390 puntos, cuando el porcentaje de variación con respecto al punto inicial alcanzó un valor mayor al 20%.

Tabla 4.2. Diámetro de punto de soldadura para un electrodo troncocónico. (Espesor 0.9mm y sin enfriamiento)

| Nº de puntos | Electrodo |        |          |        | Ensayo PEEL |         |                |        |
|--------------|-----------|--------|----------|--------|-------------|---------|----------------|--------|
|              | Superior  |        | Inferior |        | D1 (mm)     | D2 (mm) | (D1+D2)/2 (mm) | %V     |
|              | D (mm)    | H (mm) | D (mm)   | H (mm) |             |         |                |        |
| 0            | 6,7       | 34,8   | 6,7      | 34,8   | X           | X       | X              |        |
| 30           | 6,7       | 34,8   | 6,7      | 34,8   | 4,4         | 4,3     | 4,35           | -7,45  |
| 60           | 6,8       | 34,8   | 6,9      | 34,8   | 4,4         | 4,3     | 4,35           | -7,45  |
| 90           | 6,8       | 34,6   | 7        | 34,7   | 4,4         | 4,1     | 4,25           | -9,57  |
| 120          | 6,8       | 34,6   | 7,1      | 34,6   | 4,2         | 4       | 4,1            | -12,77 |
| 150          | 7         | 34,5   | 7,2      | 34,6   | 3,7         | 4,3     | 4              | -14,89 |
| 180          | 7         | 34,5   | 7,3      | 34,5   | 3,9         | 4,4     | 4,15           | -11,7  |
| 210          | 7,1       | 34,5   | 7,3      | 34,5   | 4,3         | 4,2     | 4,25           | -9,57  |
| 240          | 7,1       | 34,4   | 7,3      | 34,5   | 4,5         | 4,1     | 4,3            | -8,51  |
| 270          | 7,3       | 34,4   | 7,3      | 34,5   | 4,2         | 4,2     | 4,2            | -10,64 |
| 300          | 7,4       | 34,4   | 7,4      | 34,4   | 5           | 5,9     | 5,45           | 15,96  |
| 330          | 7,4       | 34,4   | 7,4      | 34,4   | 4,2         | 4,2     | 4,2            | -10,64 |
| 360          | 7,4       | 34,3   | 7,4      | 34,4   | 3,5         | 3,5     | 3,5            | -25,53 |
| 390          | 7,5       | 34,3   | 7,4      | 34,4   | 3           | 4       | 3,5            | -25,53 |

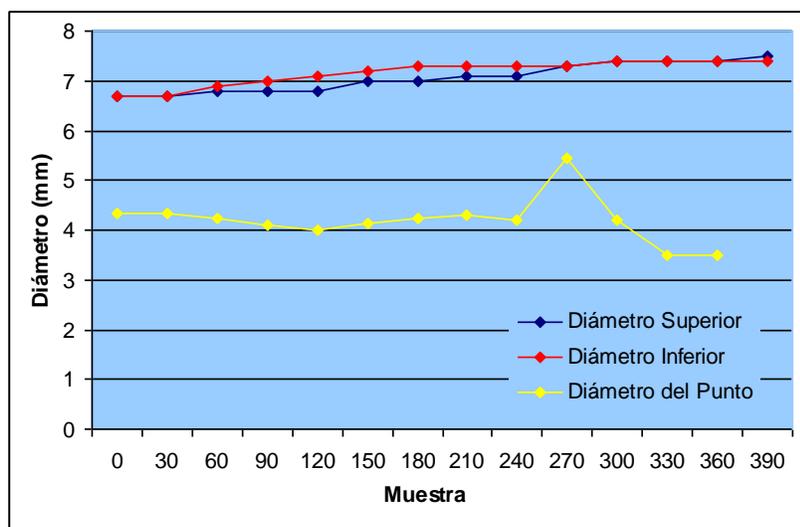


Figura 4.6. Diámetro inferior y superior del electrodo troncocónico y diámetro del punto de soldadura. (Espesor 0.9mm y sin enfriamiento)

#### 4.2.2. Ensayos con electrodo Bombeado (e = 0,9mm, sin enfriamiento)

Tabla 4.3. Diámetro de punto de soldadura para un electrodo Bombeado. (Espesor 0.9mm y sin enfriamiento)

| Nº de puntos | Electrodo |        |          |        | Ensayo PEEL |         |                |        |
|--------------|-----------|--------|----------|--------|-------------|---------|----------------|--------|
|              | Superior  |        | Inferior |        | D1 (mm)     | D2 (mm) | (D1+D2)/2 (mm) | %V     |
|              | D (mm)    | H (mm) | D (mm)   | H (mm) |             |         |                |        |
| 0            | 7,15      | 36,4   | 7,5      | 37,8   | X           | X       | X              |        |
| 30           | 7,3       | 36,7   | 7,7      | 38,4   | 4,7         | 4,7     | 4,7            | 0      |
| 60           | 7,7       | 36,8   | 7,6      | 38,9   | 4           | 4,5     | 4,25           | -9,57  |
| 90           | 7,6       | 36,5   | 7,6      | 37,9   | 5           | 4,6     | 4,8            | 2,13   |
| 120          | 7,3       | 36,55  | 7,5      | 37,65  | 4,7         | 4       | 4,35           | -7,45  |
| 150          | 7,2       | 36,4   | 7,6      | 37,9   | 5           | 4,5     | 4,75           | 1,06   |
| 180          | 7,4       | 36,45  | 7,65     | 37,8   | 5           | 4,5     | 4,75           | 1,06   |
| 210          | 7,5       | 36,6   | 7,7      | 37,7   | 4,9         | 4,8     | 4,85           | 3,19   |
| 240          | 7,35      | 36,5   | 7,75     | 37,7   | 4,8         | 4,8     | 4,8            | 2,13   |
| 270          | 7,4       | 36,45  | 7,6      | 37,65  | 4,7         | 4,7     | 4,7            | 0      |
| 300          | 7,4       | 36,45  | 7,65     | 37,7   | 4,75        | 4,3     | 4,525          | -3,72  |
| 330          | 7,45      | 36,5   | 7,6      | 37,6   | 4,3         | 4,4     | 4,35           | -7,45  |
| 360          | 7,5       | 36,3   | 7,5      | 37,5   | 4,3         | 4,5     | 4,4            | -6,38  |
| 390          | 7,55      | 36,35  | 7,6      | 37,7   | 4,2         | 4       | 4,1            | -12,77 |
| 420          | 7,5       | 36,3   | 7,65     | 37,55  | 3,8         | 3,9     | 3,85           | -18,09 |
| 450          | 7,6       | 36,3   | 7,7      | 37,6   | 3,5         | 3,4     | 3,45           | -26,6  |
| 480          | 7,6       | 36,3   | 7,65     | 37,5   | 3,2         | 3,3     | 3,25           | -30,85 |

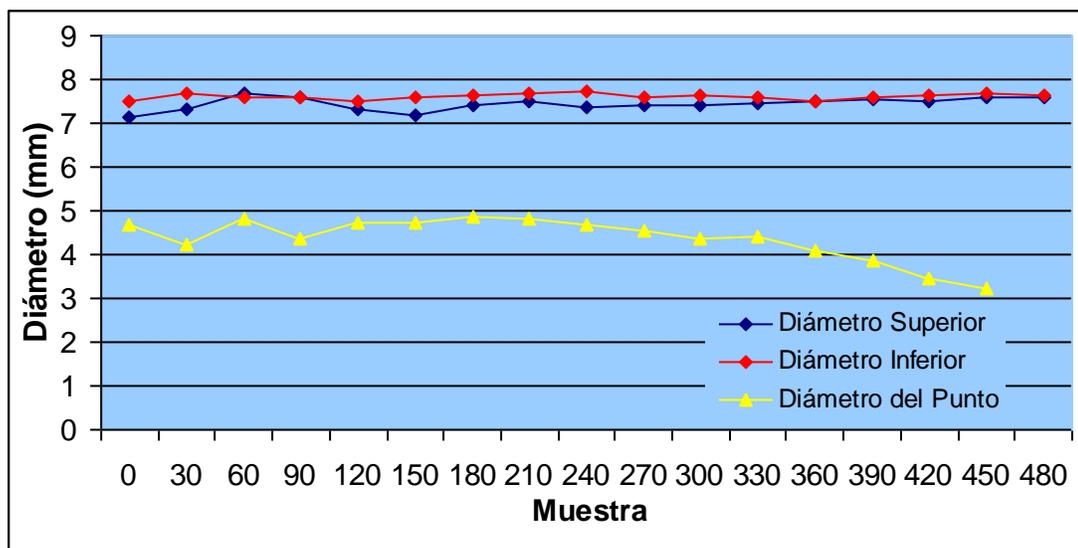


Figura 4.7. Diámetro inferior y superior del electrodo Bombeado y diámetro del punto de soldadura. (Espesor 0.9mm y sin enfriamiento)

Se pudo observar, en la gráfica de la **Figura 4.7**, que los puntos siguen la misma tendencia de la **Figura 4.6**. Es necesario resaltar que el desgaste del electrodo de tipo Bombeado se dio con un mayor número de puntos que para el electrodo de tipo Truncocónico (90 puntos de diferencia).

#### 4.3. Ensayo de desgaste para las dos geometrías de electrodo seleccionadas (Espesor 0.9mm y con enfriamiento).

Para la realización de estos ensayos se enciende el sistema de enfriamiento, el cual hace circular agua por el interior de los electrodos para extraer el calor generado por el paso de la corriente.



Figura 4.8. Láminas de desgaste del electrodo.

#### 4.3.1. Ensayos con electrodo Truncocónico ( $e=0,9\text{mm}$ , con enfriamiento)

Tabla 4.4. Diámetro de punto de soldadura para un electrodo truncocónico. (Espesor 0.9mm y con enfriamiento)

| Nº de puntos | Electrodo |        |          |        | Ensayo Peel |      |           | %V     |
|--------------|-----------|--------|----------|--------|-------------|------|-----------|--------|
|              | Superior  |        | Inferior |        | D1          | D2   | (D1+D2)/2 |        |
|              | D (mm)    | H (mm) | D (mm)   | H (mm) | (mm)        | (mm) | (mm)      |        |
| 0            | 8         | 33,5   | 7,9      | 33,3   | X           | X    | X         | X      |
| 30           | 8         | 33,6   | 8        | 33,3   | 4,5         | 4,7  | 4,6       | -2,13  |
| 60           | 8,3       | 33,5   | 8        | 33,25  | 4,8         | 5    | 4,9       | 4,26   |
| 90           | 8,3       | 33,55  | 8,2      | 33,2   | 4,9         | 4,2  | 4,55      | -3,19  |
| 120          | 8,2       | 33,5   | 8,2      | 33,15  | 4,8         | 5    | 4,9       | 4,26   |
| 150          | 8,3       | 33,45  | 8,3      | 33,15  | 5           | 5    | 5         | 6,38   |
| 180          | 8,4       | 33,45  | 8,4      | 33,1   | 5           | 4,9  | 4,95      | 5,32   |
| 210          | 8,4       | 33,5   | 8,5      | 33,05  | 4,8         | 5    | 4,9       | 4,26   |
| 240          | 8,4       | 33,55  | 8,5      | 33     | 4,9         | 4,9  | 4,9       | 4,26   |
| 270          | 8,5       | 33,5   | 8,5      | 33     | 4,4         | 4,5  | 4,45      | -5,32  |
| 300          | 8,5       | 33,4   | 8,6      | 33     | 5           | 5    | 5         | 6,38   |
| 330          | 8,5       | 33,45  | 8,6      | 33,3   | 5,2         | 5    | 5,1       | 8,51   |
| 360          | 8,1       | 33,5   | 8,2      | 33,3   | 4,8         | 4,3  | 4,55      | -3,19  |
| 390          | 8         | 33,55  | 8,3      | 33,2   | 3,8         | 3,7  | 3,75      | -20,21 |
| 420          | 8         | 33,4   | 8,4      | 33,3   | 5           | 4,3  | 4,65      | -1,06  |
| 450          | 8         | 33,4   | 8,4      | 33,3   | 3,5         | 3,6  | 3,55      | -24,47 |
| 480          | 8,3       | 33,6   | 8,1      | 33,1   | 4           | 3,7  | 3,85      | -18,09 |
| 510          | 7,7       | 33,55  | 8        | 33,2   | 4,2         | 3,9  | 4,05      | -13,83 |
| 540          | 7,8       | 33,5   | 8,2      | 33,2   | 3,5         | 3,5  | 3,5       | -25,53 |
| 570          | 7,9       | 33,55  | 8,2      | 33,1   | 3,6         | 4,9  | 4,25      | -9,57  |
| 600          | 8         | 33,55  | 8,1      | 33,5   | 4,1         | 4    | 4,05      | -13,83 |
| 630          | 8         | 33,5   | 8,3      | 33,3   | 4,2         | 4    | 4,1       | -12,77 |
| 660          | 8,1       | 33,4   | 8        | 33,2   | 4           | 4    | 4         | -14,89 |
| 690          | 8,1       | 33,4   | 8,1      | 33,2   | 3,6         | 3,7  | 3,65      | -22,34 |
| 720          | 8,2       | 33,4   | 8,1      | 33,1   | 3,5         | 3,5  | 3,5       | -25,53 |

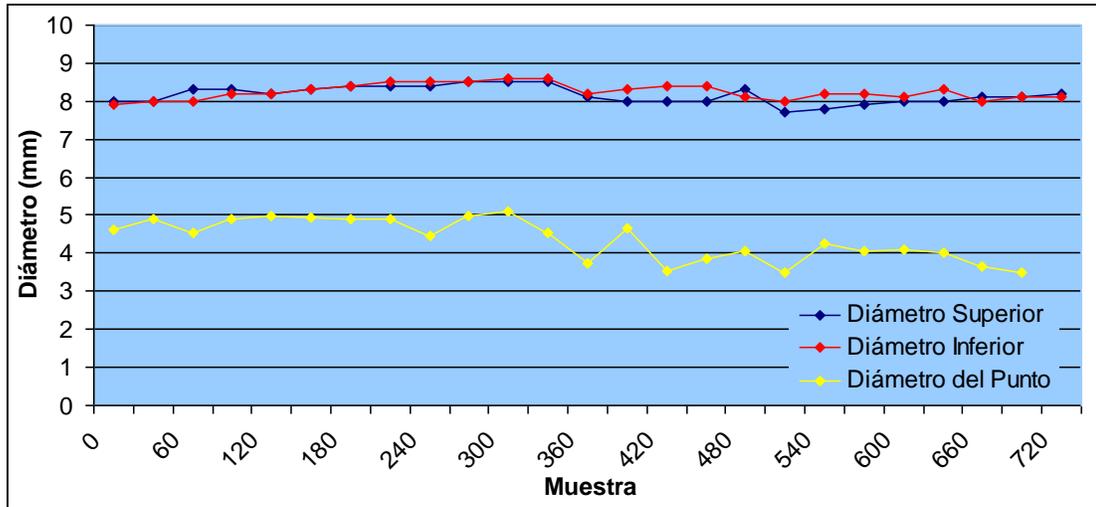


Figura 4.9. Diámetro inferior y superior del electrodo troncocónico y diámetro del punto de soldadura. (Espesor 0.9mm y con enfriamiento)

Con el incremento de los puntos de soldadura, el diámetro de los electrodos aumenta, no así el diámetro obtenido de los puntos de soldadura, el cual disminuye, debido a la reducción de la densidad de corriente que pasa a través de la lámina. **(Figura 4.9)**. Fue necesario detener el ensayo a los 720 puntos debido a que el porcentaje de variación del punto superó el valor recomendado por la ensambladora (Zambrano, 2008).

#### 4.3.2. Ensayos con electrodo Bombeado ( $e = 0,9\text{mm}$ , con enfriamiento)

El desgaste para éste tipo de electrodo bombeado se presentó 110 puntos de soldadura después que para el tipo de electrodo troncocónico **(Figura 4.9 y Figura 4.10)**, sin embargo, las tendencias, tanto de los diámetros del electrodo como del diámetro del punto de soldadura, son similares.

Tabla 4.5. Diámetro de punto de soldadura para un electrodo Bombeado. (Espesor 0.9mm y con enfriamiento)

| Nº de puntos | Electrodo |        |          |        | Ensayo PEEL |            |                   | %V     |
|--------------|-----------|--------|----------|--------|-------------|------------|-------------------|--------|
|              | Superior  |        | Inferior |        | D1<br>(mm)  | D2<br>(mm) | (D1+D2)/2<br>(mm) |        |
|              | D (mm)    | H (mm) | D (mm)   | H (mm) |             |            |                   |        |
| 0            | 7,2       | 36     | 7,2      | 37     | X           | X          | X                 |        |
| 30           | 7,6       | 36,5   | 7,6      | 38     | 4,9         | 4,8        | 4,85              | 3,19   |
| 60           | 7,3       | 36     | 7,3      | 37,9   | 5           | 5          | 5                 | 6,38   |
| 90           | 6,9       | 36     | 7,3      | 37,5   | 5,2         | 4          | 4,6               | -2,13  |
| 120          | 7,1       | 35,9   | 7,1      | 37,8   | 5           | 4,3        | 4,65              | -1,06  |
| 150          | 7,3       | 35,95  | 7,4      | 37,6   | 4           | 5,2        | 4,6               | -2,13  |
| 180          | 7         | 39,9   | 7,5      | 38     | 5           | 5          | 5                 | 6,38   |
| 210          | 7,1       | 35,8   | 7,3      | 37,5   | 4,65        | 5          | 4,825             | 2,66   |
| 240          | 7,15      | 35,6   | 7,35     | 37,4   | 4,7         | 4,9        | 4,8               | 2,13   |
| 270          | 7,2       | 35,7   | 7,4      | 37,45  | 4,6         | 5,2        | 4,9               | 4,26   |
| 300          | 7,15      | 35,75  | 7,2      | 37,3   | 4,65        | 4,7        | 4,675             | -0,53  |
| 330          | 7,25      | 35,8   | 7,25     | 37,3   | 4,5         | 4,8        | 4,65              | -1,06  |
| 360          | 7,15      | 35,85  | 7,3      | 37,2   | 4,4         | 4,3        | 4,35              | -7,45  |
| 390          | 7         | 35,85  | 7,35     | 37,35  | 4,2         | 4,1        | 4,15              | -11,7  |
| 420          | 7,1       | 35,7   | 7,2      | 37,3   | 4,3         | 4,4        | 4,35              | -7,45  |
| 450          | 7,2       | 35,75  | 7,25     | 37,25  | 4,35        | 4          | 4,175             | -11,17 |
| 480          | 7,25      | 35,6   | 7,25     | 37,4   | 4,2         | 3,8        | 4                 | -14,89 |
| 510          | 7,3       | 35,65  | 7,3      | 37,2   | 3,9         | 4,2        | 4,05              | -13,83 |
| 540          | 7,35      | 35,6   | 7,35     | 37,1   | 3,7         | 5          | 4,35              | -7,45  |
| 570          | 7,2       | 35,6   | 7,35     | 37     | 3,85        | 5,2        | 4,525             | -3,72  |
| 600          | 7,25      | 35,5   | 7,4      | 36,9   | 4           | 4,5        | 4,25              | -9,57  |
| 630          | 7,15      | 35,8   | 7,5      | 36,7   | 4,2         | 4,3        | 4,25              | -9,57  |
| 660          | 7,15      | 35,85  | 7,3      | 36,9   | 4,1         | 4,2        | 4,15              | -11,7  |
| 690          | 7,25      | 35,7   | 7,35     | 36,75  | 4           | 4,3        | 4,15              | -11,7  |
| 720          | 7,3       | 35,5   | 7,4      | 36,6   | 3,5         | 4,5        | 4                 | -14,89 |
| 750          | 7,2       | 35,65  | 7,4      | 36,5   | 3,4         | 3,9        | 3,65              | -22,34 |
| 780          | 7,3       | 35     | 7,4      | 36,5   | 3,3         | 4          | 3,65              | -22,34 |
| 810          | 7,3       | 35,5   | 7,4      | 36,5   | 3,4         | 4,1        | 3,75              | -20,21 |

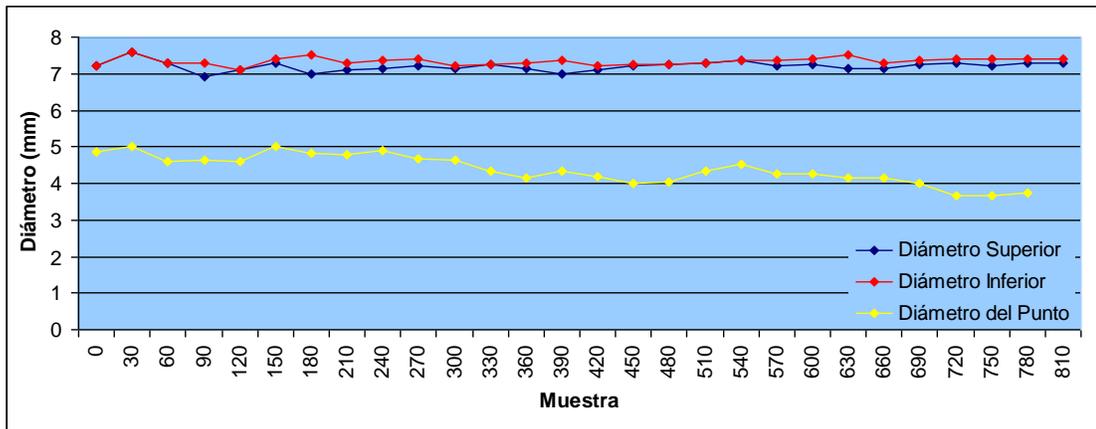


Figura 4.10. Diámetro inferior y superior del electrodo Bombeado y diámetro del punto de soldadura. (Espesor 0.9mm y con enfriamiento)

#### 4.4. Ensayos de soldadura por resistencia eléctrica en función de la intensidad de corriente (Espesor 1.1mm).

Es necesaria la obtención de la intensidad de corriente adecuada para ser utilizada en los ensayos de desgaste del electrodo, para ello se realizaron una serie de puntos que fueron separados mediante el ensayo destructivo Peel para la evaluación del mismo y selección del parámetro.

Se observó en la gráfica de la **Figura 4.11** que a medida que se aumentó la intensidad de corriente el diámetro se hizo mas grande, sin embargo no fue suficiente para alcanzar el diámetro inicial del electrodo, ya que al tratarse de un espesor mayor necesita mayores tiempos de unión, por lo tanto se tomó como referencia la posición “5” del interruptor y se procedió a evaluar el tiempo de soldadura.

Por tratarse de un espesor mayor requirió un tiempo de soldadura más grande y por lo tanto una intensidad de corriente más elevada, por esta razón es necesaria la realización del siguiente ensayo.

Tabla 4.6. Valores de diámetro en función de la intensidad de corriente. (Espesor 1.1mm)

| Muestra | Equipo      |          |             |        | Ensayo PEEL |      |           |
|---------|-------------|----------|-------------|--------|-------------|------|-----------|
|         | Intensidad  |          | Tiempo      |        | D1          | D2   | (D1+D2)/2 |
|         | Interruptor | Amperaje | Interruptor | Ciclos | (mm)        | (mm) | (mm)      |
| I 3,1   | 3           | 5220     | 2           | 9      | 3,5         | 3,5  | 3,5       |
| I 3,2   | 3           | 5220     | 2           | 9      | 3,7         | 3,5  | 3,6       |
| I 3,3   | 3           | 5220     | 2           | 9      | 2,9         | 3    | 2,95      |
| I 3,4   | 3           | 5220     | 2           | 9      | 3,5         | 3,4  | 3,45      |
| I 3,5   | 3           | 5220     | 2           | 9      | 3,3         | 3,4  | 3,35      |
| I 4,1   | 4           | 5920     | 2           | 9      | 3,9         | 4    | 3,95      |
| I 4,2   | 4           | 5920     | 2           | 9      | 4           | 3,8  | 3,9       |
| I 4,3   | 4           | 5920     | 2           | 9      | 3,5         | 4    | 3,75      |
| I 4,4   | 4           | 5920     | 2           | 9      | 3,8         | 3,8  | 3,8       |
| I 4,5   | 4           | 5920     | 2           | 9      | 4           | 3,9  | 3,95      |
| I 5,1   | 5           | 6430     | 2           | 9      | 3,8         | 4    | 3,9       |
| I 5,2   | 5           | 6430     | 2           | 9      | 4,45        | 4,45 | 4,45      |
| I 5,3   | 5           | 6430     | 2           | 9      | 3,8         | 3,9  | 3,85      |
| I 5,4   | 5           | 6430     | 2           | 9      | 4,15        | 4    | 4,075     |
| I 5,5   | 5           | 6430     | 2           | 9      | 3,75        | 3,5  | 3,625     |

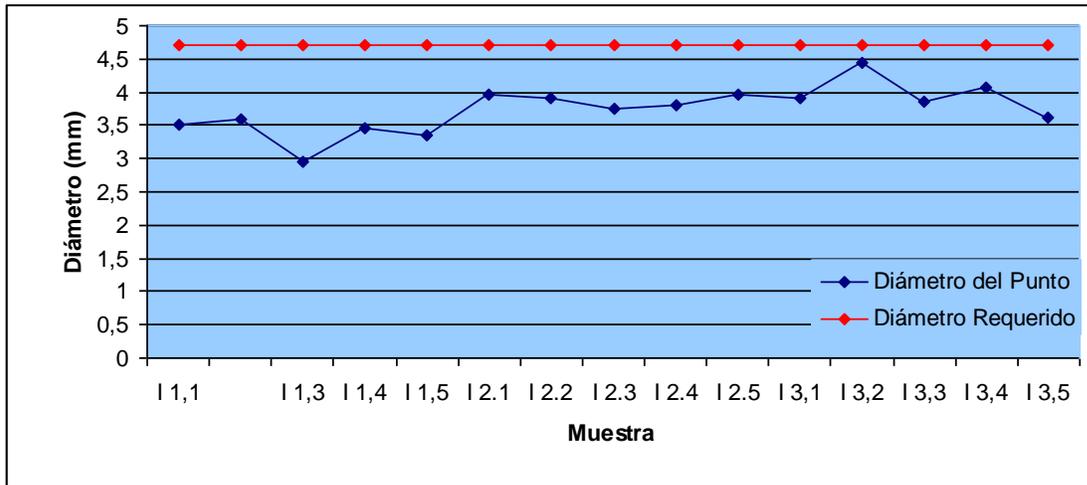


Figura 4.11. Diámetro de puntos en función de la intensidad de corriente. (Espesor 1.1mm)

### 4.5. Ensayos de soldadura por resistencia eléctrica en función del tiempo (Espesor 1.1mm).

Una vez seleccionada la intensidad de corriente se procedió de la misma manera a evaluar distintas posiciones del temporizador para la selección del tiempo adecuado de soldadura que fue utilizado en los ensayos de desgaste.

Tabla 4.7. Valores de diámetro en función del tiempo. (Espesor 1.1mm)

| Muestra | Equipo      |          |             |        | Ensayo PEEL |      |           |
|---------|-------------|----------|-------------|--------|-------------|------|-----------|
|         | Intensidad  |          | Tiempo      |        | D1          | D2   | (D1+D2)/2 |
|         | Interruptor | Amperaje | Interruptor | Ciclos | (mm)        | (mm) | (mm)      |
| T 2,1   | 5           | 6430     | 3           | 14     | 3,4         | 3,4  | 3,4       |
| T 2,2   | 5           | 6430     | 3           | 14     | 4,3         | 4,3  | 4,3       |
| T 2,3   | 5           | 6430     | 3           | 14     | 4,5         | 4,7  | 4,6       |
| T 2,4   | 5           | 6430     | 3           | 14     | 5           | 4,5  | 4,75      |
| T 2,5   | 5           | 6430     | 3           | 14     | 4,2         | 4,4  | 4,3       |
| T3,1    | 5           | 6430     | 4           | 19     | 5           | 4,9  | 4,95      |
| T 3,2   | 5           | 6430     | 4           | 19     | 5           | 5,3  | 5,15      |
| T 3,3   | 5           | 6430     | 4           | 19     | 5,6         | 5,3  | 5,45      |
| T 3,4   | 5           | 6430     | 4           | 19     | 5           | 4,9  | 4,95      |
| T 3,5   | 5           | 6430     | 4           | 19     | 5,2         | 5,2  | 5,2       |
| T 4,1   | 5           | 6430     | 5           | 24     | 6,3         | 6,4  | 6,35      |
| T 4,2   | 5           | 6430     | 5           | 24     | 5           | 6    | 5,5       |
| T 4,3   | 5           | 6430     | 5           | 24     | 5,8         | 6,6  | 6,2       |
| T 4,4   | 5           | 6430     | 5           | 24     | 6,5         | 6    | 6,25      |
| T 4,5   | 5           | 6430     | 5           | 24     | 7           | 6,5  | 6,75      |

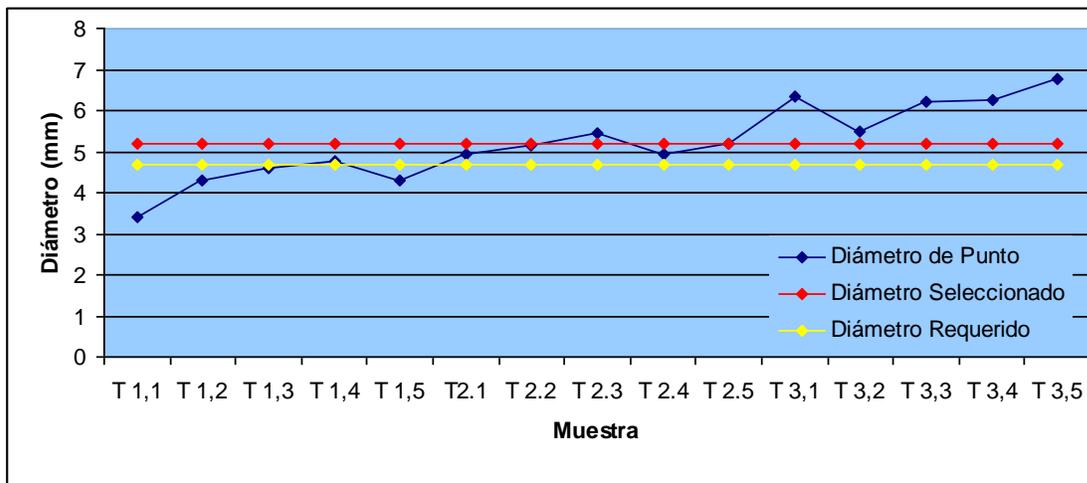


Figura 4.12. Diámetro de puntos en función del tiempo. (Espesor 1.1mm)

Se observó en la gráfica de la **Figura 4.12** que al aumentar el tiempo de soldadura, también lo hizo el diámetro del punto ya que se genera mayor cantidad de calor (De Heredia, 1959). En la posición “3” del interruptor se genera un diámetro promedio de 4,7mm requerido para el espesor 1,1mm, sin embargo la calidad de la soldadura no es óptima ya que se presentó falla por cizallamiento, por lo cual se toma como parámetro la posición “4” del temporizador que garantiza la calidad de la soldadura aun cuando el diámetro promedio del punto es de 5,2mm (Se tomó este valor como referencia para calcular el porcentaje de variación del punto de soldadura).

El interruptor en la posición “5” equivale a una intensidad de corriente de 6700 A y el temporizador en la posición “4” es equivalente a un tiempo de soldadura de 19 ciclos. Se puede notar que los parámetros obtenidos para un espesor de 1,1mm son mayores que los obtenidos para un espesor de 0.9mm. Lo cual coincide con lo esperado teóricamente (De Heredia, 1959).



Figura 4.13. Proceso de soldadura para el ensayo destructivo Peel

#### **4.6. Ensayo de desgaste para las dos geometrías de electrodo seleccionadas (Espesor 1.1mm y sin enfriamiento).**

Se llevaron a cabo los ensayos de desgaste en función del electrodo sin encender el sistema de enfriamiento para un espesor de 1.1mm



Figura 4.14. Puntos de soldadura en láminas de desgaste.

#### 4.6.1. Ensayos con electrodo Troncocónico (e = 1,1mm, sin enfriamiento)

Los diámetros superior e inferior de los electrodos aumentaron con el número de puntos (**Figura 4.15**), por otra parte, el diámetro del punto de soldadura disminuyó y se detuvo el ensayo a los 630 puntos por la variación del diámetro en un 27,88%.

Tabla 4.8. Diámetro de punto de soldadura para un electrodo troncocónico. (Espesor 1.1mm y sin enfriamiento)

| Nº de puntos | Electrodo |        |          |        | Ensayo PEEL |         |                |        |
|--------------|-----------|--------|----------|--------|-------------|---------|----------------|--------|
|              | Superior  |        | Inferior |        | D1 (mm)     | D2 (mm) | (D1+D2)/2 (mm) | %V     |
|              | D (mm)    | H (mm) | D (mm)   | H (mm) |             |         |                |        |
| 0            | 7,5       | 34,3   | 7,4      | 34,4   | X           | X       | X              |        |
| 30           | 7,5       | 34,3   | 7,4      | 34,4   | 5,7         | 5,4     | 5,55           | 6,73   |
| 60           | 7,5       | 34,3   | 7,4      | 34,4   | 5,6         | 5,3     | 5,45           | 4,81   |
| 90           | 7,5       | 34,25  | 7,5      | 34,4   | 5,2         | 4,8     | 5              | -3,85  |
| 120          | 7,6       | 34,25  | 7,5      | 34,3   | 5,4         | 5       | 5,2            | 0      |
| 150          | 7,6       | 34,25  | 7,6      | 35,35  | 5           | 5       | 5              | -3,85  |
| 180          | 7,6       | 34,25  | 7,7      | 34,35  | 5,3         | 5       | 5,15           | -0,96  |
| 210          | 7,6       | 34,2   | 7,7      | 34,35  | 5,3         | 5,2     | 5,25           | 0,96   |
| 240          | 7,65      | 34,1   | 7,7      | 34,2   | 5,2         | 5,4     | 5,3            | 1,92   |
| 270          | 7,65      | 34,1   | 7,8      | 34,2   | 5,5         | 5       | 5,25           | 0,96   |
| 300          | 7,8       | 34,1   | 7,8      | 34,2   | 6           | 5,4     | 5,7            | 9,62   |
| 330          | 7,8       | 34,1   | 7,8      | 34     | 5,3         | 5,2     | 5,25           | 0,96   |
| 360          | 7,9       | 34     | 8        | 34     | 5,4         | 5,5     | 5,45           | 4,81   |
| 390          | 7,9       | 34     | 8        | 34     | 4,9         | 5       | 4,95           | -4,81  |
| 420          | 7,8       | 34,2   | 8,2      | 33,8   | 4,7         | 4,9     | 4,8            | -7,69  |
| 450          | 7,6       | 34     | 8,4      | 33,8   | 5           | 4,8     | 4,9            | -5,77  |
| 480          | 7,65      | 33,9   | 8,4      | 33,75  | 4,6         | 4,8     | 4,7            | -9,62  |
| 510          | 7,7       | 33,7   | 8,4      | 33,6   | 4,5         | 4,6     | 4,55           | -12,5  |
| 540          | 7,9       | 33,8   | 8,35     | 33,5   | 4,4         | 4,3     | 4,35           | -16,35 |
| 570          | 7,9       | 33,6   | 8,3      | 33,3   | 3,9         | 4,1     | 4              | -23,08 |
| 600          | 8         | 33,7   | 8,25     | 33,3   | 3,7         | 4,2     | 3,95           | -24,04 |
| 630          | 8         | 33,5   | 8,2      | 33,2   | 3,5         | 4       | 3,75           | -27,88 |

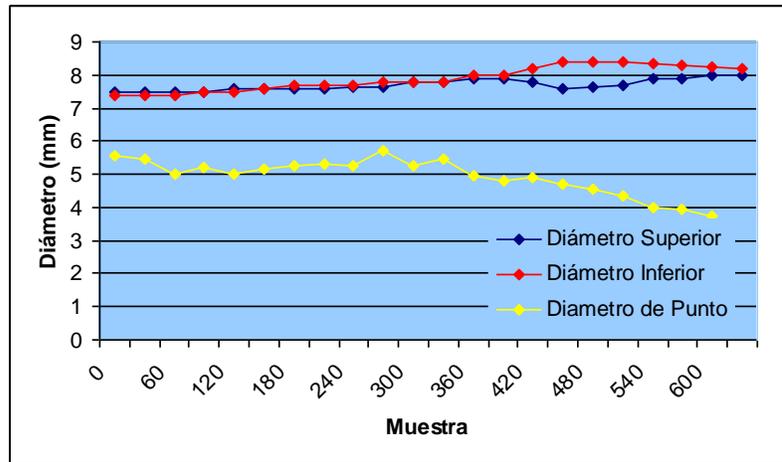


Figura 4.15. Diámetro inferior y superior del electrodo troncocónico y diámetro del punto de soldadura. (Espesor 1.1mm y sin enfriamiento)

#### 4.6.2. Ensayos con electrodo Bombeado (e = 1,1 mm, sin enfriamiento)

De acuerdo a la gráfica de la **Figura 4.16**, obtenida a partir de los datos en la **Tabla 4.9** los diámetros del electrodo se incrementaron a medida que aumentaron la cantidad de puntos de soldadura, por el contrario el diámetro del punto disminuyó hasta que se finalizó el ensayo cuando se alcanzó un 20,19% de variación a los 750 puntos.

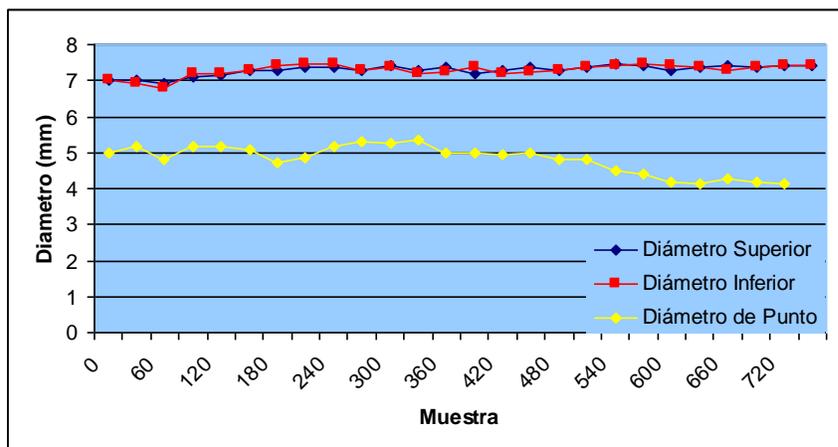


Figura 4.16. Diámetro inferior y superior del electrodo Bombeado y diámetro del punto de soldadura. (Espesor 1.1mm y sin enfriamiento)

Tabla 4.9. Diámetro de punto de soldadura para un electrodo Bombeado. (Espesor 1.1mm y sin enfriamiento)

| Nº de puntos | Electrodo |        |          |        | Ensayo PEEL |         |                | %V     |
|--------------|-----------|--------|----------|--------|-------------|---------|----------------|--------|
|              | Superior  |        | Inferior |        | D1 (mm)     | D2 (mm) | (D1+D2)/2 (mm) |        |
|              | D (mm)    | H (mm) | D (mm)   | H (mm) |             |         |                |        |
| 0            | 7         | 36,2   | 7        | 38,5   | X           | X       | X              |        |
| 30           | 7         | 36,2   | 6,9      | 38,4   | 5           | 5       | 5              | -3,85  |
| 60           | 6,9       | 36,2   | 6,8      | 38,45  | 5,3         | 5       | 5,15           | -0,96  |
| 90           | 7,1       | 36,15  | 7,2      | 38,5   | 4,6         | 5       | 4,8            | -7,69  |
| 120          | 7,15      | 36,2   | 7,2      | 38,5   | 5,2         | 5,1     | 5,15           | -0,96  |
| 150          | 7,3       | 36,25  | 7,3      | 38,4   | 5,3         | 5       | 5,15           | -0,96  |
| 180          | 7,3       | 36,15  | 7,4      | 38,3   | 5,2         | 5       | 5,1            | -1,92  |
| 210          | 7,35      | 36,1   | 7,45     | 38,25  | 4,5         | 4,9     | 4,7            | -9,62  |
| 240          | 7,35      | 36,3   | 7,45     | 38,2   | 5           | 4,7     | 4,85           | -6,73  |
| 270          | 7,3       | 36,2   | 7,3      | 38,1   | 5,5         | 4,8     | 5,15           | -0,96  |
| 300          | 7,4       | 36,25  | 7,35     | 38,2   | 5,6         | 5       | 5,3            | 1,92   |
| 330          | 7,3       | 36,2   | 7,2      | 38,15  | 5,4         | 5,1     | 5,25           | 0,96   |
| 360          | 7,35      | 36,1   | 7,25     | 38     | 5,3         | 5,4     | 5,35           | 2,88   |
| 390          | 7,2       | 36,2   | 7,35     | 38,3   | 5           | 5       | 5              | -3,85  |
| 420          | 7,3       | 36,25  | 7,2      | 38,25  | 5,1         | 4,9     | 5              | -3,85  |
| 450          | 7,35      | 36,15  | 7,25     | 38,3   | 5,15        | 4,7     | 4,925          | -5,29  |
| 480          | 7,3       | 36,3   | 7,3      | 38,35  | 5,05        | 4,9     | 4,975          | -4,33  |
| 510          | 7,35      | 36,15  | 7,35     | 38,2   | 4,9         | 4,75    | 4,825          | -7,21  |
| 540          | 7,45      | 36,25  | 7,4      | 38,1   | 4,8         | 4,8     | 4,8            | -7,69  |
| 570          | 7,4       | 36,2   | 7,45     | 38,15  | 4,6         | 4,4     | 4,5            | -13,46 |
| 600          | 7,3       | 36,25  | 7,4      | 38     | 4,3         | 4,5     | 4,4            | -15,38 |
| 630          | 7,35      | 36,15  | 7,35     | 38,05  | 4,1         | 4,3     | 4,2            | -19,23 |
| 660          | 7,4       | 36,1   | 7,3      | 38,1   | 4,2         | 4,1     | 4,15           | -20,19 |
| 690          | 7,35      | 36,15  | 7,35     | 38     | 4,2         | 4,3     | 4,25           | -18,27 |
| 720          | 7,4       | 36,1   | 7,4      | 37,9   | 4,3         | 4,1     | 4,2            | -19,23 |
| 750          | 7,4       | 36     | 7,4      | 37,9   | 4,1         | 4,2     | 4,15           | -20,19 |

**4.7. Ensayo de desgaste para las dos geometrías de electrodo seleccionadas. (Espesor 1,1mm y con enfriamiento).**

Se encendió el sistema de enfriamiento para la realización de los ensayos de desgaste con un espesor de 1.1mm variando el tipo de electrodo.

#### 4.7.1. Ensayos con electrodo Troncocónico ( $e=1,1\text{mm}$ , con enfriamiento)

La gráfica de la **Figura 4.17** muestra como el diámetro del punto disminuyó con el aumento del número de puntos mientras que los diámetros del electrodo aumentan. El ensayo se detuvo al registrarse un 27.88%.

Tabla 4.10. Diámetro de punto de soldadura para un electrodo troncocónico.

(Espesor 1.1mm y con enfriamiento)

| Nº de puntos | Electrodo |        |          |        | Ensayo PEEL |            |                   |        |
|--------------|-----------|--------|----------|--------|-------------|------------|-------------------|--------|
|              | Superior  |        | Inferior |        | D1<br>(mm)  | D2<br>(mm) | (D1+D2)/2<br>(mm) | %V     |
|              | D (mm)    | H (mm) | D (mm)   | H (mm) |             |            |                   |        |
| 0            | 8         | 33,55  | 7,9      | 33,5   | X           | X          | X                 | X      |
| 30           | 7,9       | 33,5   | 8        | 33,55  | 4,2         | 4,2        | 4,2               | -19,23 |
| 60           | 8,3       | 33,55  | 8        | 33,4   | 5,4         | 6          | 5,7               | 9,62   |
| 90           | 8         | 33,5   | 8        | 33,65  | 4,2         | 6          | 5,1               | -1,92  |
| 120          | 8         | 33,45  | 8,1      | 33,5   | 5,7         | 5,8        | 5,75              | 10,58  |
| 150          | 8,3       | 33,4   | 8,05     | 33,55  | 5,2         | 5,3        | 5,25              | 0,96   |
| 180          | 8,3       | 33,5   | 8,05     | 33,55  | 5           | 5,4        | 5,2               | 0      |
| 210          | 8,1       | 33,55  | 8,01     | 33,5   | 5,3         | 5,2        | 5,25              | 0,96   |
| 240          | 8         | 33,4   | 8,1      | 33,4   | 4,9         | 4,8        | 4,85              | -6,73  |
| 270          | 8,2       | 33,45  | 8,15     | 33,8   | 4,5         | 5          | 4,75              | -8,65  |
| 300          | 8,1       | 33,35  | 8,2      | 34     | 5           | 4,7        | 4,85              | -6,73  |
| 330          | 8,2       | 33,4   | 8,1      | 34     | 5,4         | 5          | 5,2               | 0      |
| 360          | 8,2       | 33,5   | 8,3      | 34     | 5,3         | 5          | 5,15              | -0,96  |
| 390          | 8,2       | 33,5   | 8,3      | 34     | 5,2         | 5          | 5,1               | -1,92  |
| 420          | 8,3       | 33,5   | 8,4      | 33,8   | 5,2         | 4,8        | 5                 | -3,85  |
| 450          | 8,3       | 33,55  | 8,4      | 33,8   | 4,8         | 5          | 4,9               | -5,77  |
| 480          | 8,3       | 33,4   | 8,7      | 33,7   | 4,7         | 4,8        | 4,9               | -5,77  |
| 510          | 8,3       | 33,45  | 8,7      | 33,7   | 5,5         | 5          | 4,75              | -8,65  |
| 540          | 8,4       | 33,5   | 8,7      | 33,7   | 5,5         | 5          | 5,25              | 0,96   |
| 570          | 8,4       | 33,55  | 8,7      | 33,8   | 4,7         | 5,2        | 5,25              | 0,96   |
| 600          | 8,4       | 33,45  | 8,7      | 33,8   | 4,2         | 4,2        | 4,95              | -4,81  |
| 630          | 8,3       | 33,4   | 8,2      | 34     | 5,9         | 4,9        | 4,2               | -19,23 |
| 660          | 8,3       | 33,45  | 8,3      | 33,2   | 5           | 4,8        | 5,4               | 3,85   |
| 690          | 8,35      | 33,3   | 8,4      | 33,35  | 4,8         | 4,8        | 4,9               | -5,77  |
| 720          | 7,7       | 33,3   | 8,3      | 33,2   | 4,9         | 4,8        | 4,8               | -7,69  |
| 750          | 7,8       | 33,35  | 8,4      | 33,4   | 4,2         | 4,3        | 4,25              | -18,27 |
| 780          | 7,8       | 33,4   | 8,4      | 33,3   | 4,4         | 4,4        | 4,4               | -15,38 |
| 810          | 8         | 33,45  | 8,5      | 33,4   | 4,4         | 4,2        | 4,3               | -17,31 |
| 840          | 8         | 33,35  | 8,5      | 32,7   | 4           | 3,8        | 3,9               | -25    |
| 870          | 8,2       | 33,3   | 8,55     | 33,2   | 4           | 4,2        | 4,1               | -21,15 |
| 900          | 8,25      | 33,3   | 8,5      | 33,2   | 3,5         | 4          | 3,75              | -27,88 |

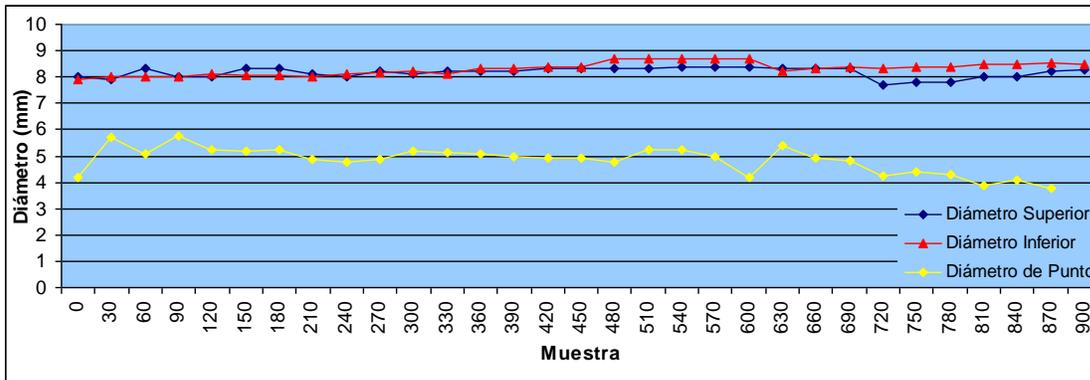


Figura 4.17. Diámetro inferior y superior del electrodo troncocónico y diámetro del punto de soldadura. (Espesor 1.1mm y con enfriamiento)

#### 4.7.2. Ensayos con electrodo Bombeado ( $e = 1,1\text{mm}$ , con enfriamiento)

Se detiene el ensayo a los 1050 puntos al registrarse una variación del 22.12% del diámetro de soldadura, el cual ha ido disminuyendo a lo largo del ensayo, al contrario de los diámetros del electrodo que han aumentado su valor.

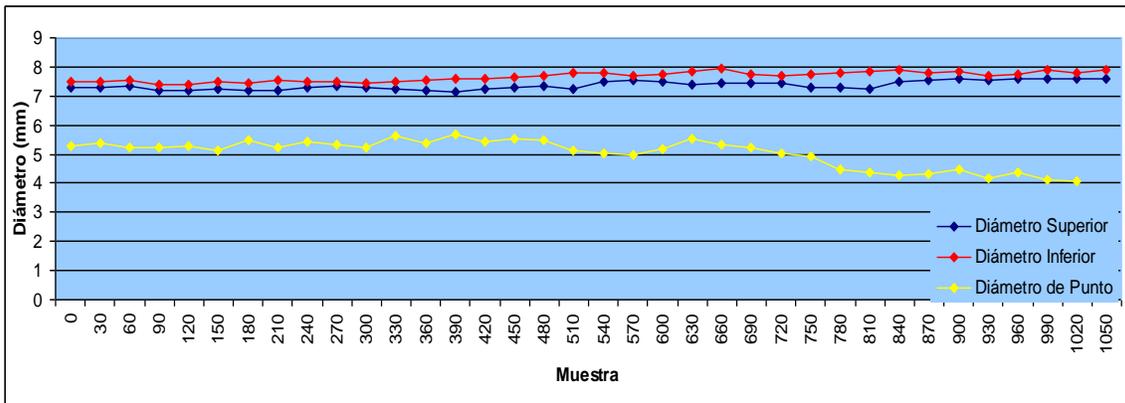


Figura 4.18. Diámetro inferior y superior del electrodo Bombeado y diámetro del punto de soldadura. (Espesor 1.1mm y con enfriamiento)

Tabla 4.11. Diámetro de punto de soldadura para un electrodo Bombeado. (Espesor 1.1mm y con enfriamiento)

| Nº de puntos | Electrodo |        |          |        | Ensayo PEEL |      |           | %V     |
|--------------|-----------|--------|----------|--------|-------------|------|-----------|--------|
|              | Superior  |        | Inferior |        | D1          | D2   | (D1+D2)/2 |        |
|              | D (mm)    | H (mm) | D (mm)   | H (mm) | (mm)        | (mm) | (mm)      |        |
| 0            | 7,3       | 35     | 7,5      | 36     | X           | X    | X         | X      |
| 30           | 7,3       | 35     | 7,5      | 36     | 5,4         | 5,2  | 5,3       | 1,92   |
| 60           | 7,35      | 34,9   | 7,55     | 35,9   | 5           | 5,8  | 5,4       | 3,85   |
| 90           | 7,2       | 34,95  | 7,4      | 35,95  | 5,5         | 5    | 5,25      | 0,96   |
| 120          | 7,2       | 34,7   | 7,4      | 35,95  | 5,6         | 4,9  | 5,25      | 0,96   |
| 150          | 7,25      | 34,95  | 7,5      | 35,8   | 5,6         | 5    | 5,3       | 1,92   |
| 180          | 7,2       | 34,95  | 7,45     | 35,85  | 5,4         | 4,9  | 5,15      | -0,96  |
| 210          | 7,2       | 34,9   | 7,55     | 35,85  | 5,5         | 5,5  | 5,5       | 5,77   |
| 240          | 7,3       | 34,8   | 7,5      | 35,9   | 5           | 5,5  | 5,25      | 0,96   |
| 270          | 7,35      | 34,85  | 7,5      | 35,8   | 5,5         | 5,4  | 5,45      | 4,81   |
| 300          | 7,3       | 34,9   | 7,45     | 35,85  | 5,4         | 5,3  | 5,35      | 2,88   |
| 330          | 7,25      | 34,85  | 7,5      | 35,75  | 5,3         | 5,2  | 5,25      | 0,96   |
| 360          | 7,2       | 34,7   | 7,55     | 35,8   | 5,4         | 5,9  | 5,65      | 8,65   |
| 390          | 7,15      | 34,75  | 7,6      | 35,8   | 5,5         | 5,3  | 5,4       | 3,85   |
| 420          | 7,25      | 34,8   | 7,6      | 35,9   | 5,6         | 5,8  | 5,7       | 9,62   |
| 450          | 7,3       | 34,85  | 7,65     | 35,85  | 5,8         | 5,1  | 5,45      | 4,81   |
| 480          | 7,35      | 34,75  | 7,7      | 35,85  | 5,9         | 5,2  | 5,55      | 6,73   |
| 510          | 7,25      | 34,7   | 7,8      | 35,8   | 6           | 5    | 5,5       | 5,77   |
| 540          | 7,5       | 34,6   | 7,8      | 35,85  | 5,4         | 4,9  | 5,15      | -0,96  |
| 570          | 7,55      | 34,5   | 7,7      | 35,9   | 5,3         | 4,8  | 5,05      | -2,88  |
| 600          | 7,5       | 34,65  | 7,75     | 35,75  | 5,1         | 4,9  | 5         | -3,85  |
| 630          | 7,4       | 34,75  | 7,85     | 35,75  | 5,2         | 5,2  | 5,2       | 0      |
| 660          | 7,45      | 34,85  | 7,95     | 35,8   | 5,7         | 5,4  | 5,55      | 6,73   |
| 690          | 7,45      | 34,6   | 7,75     | 35,85  | 5,4         | 5,3  | 5,35      | 2,88   |
| 720          | 7,45      | 34,7   | 7,7      | 35,7   | 5,3         | 5,2  | 5,25      | 0,96   |
| 750          | 7,3       | 34,65  | 7,75     | 35,75  | 5           | 5,1  | 5,05      | -2,88  |
| 780          | 7,3       | 34,6   | 7,8      | 35,75  | 5,1         | 4,8  | 4,95      | -4,81  |
| 810          | 7,25      | 34,6   | 7,85     | 35,75  | 4,8         | 4,2  | 4,5       | -13,46 |
| 840          | 7,5       | 34,7   | 7,9      | 35,8   | 4,6         | 4,1  | 4,35      | -16,35 |
| 870          | 7,55      | 34,65  | 7,8      | 35,85  | 4,5         | 4    | 4,25      | -18,27 |
| 900          | 7,6       | 34,6   | 7,85     | 35,75  | 4,1         | 4,5  | 4,3       | -17,31 |
| 930          | 7,55      | 34,5   | 7,7      | 35,7   | 4,3         | 4,6  | 4,45      | -14,42 |
| 960          | 7,6       | 34,55  | 7,75     | 35,75  | 4,2         | 4,1  | 4,15      | -20,19 |
| 990          | 7,6       | 34,55  | 7,9      | 35,7   | 4,5         | 4,2  | 4,35      | -16,35 |
| 1020         | 7,6       | 34,5   | 7,8      | 35,7   | 4,2         | 4    | 4,1       | -21,15 |
| 1050         | 7,6       | 34,5   | 7,9      | 35,7   | 4,1         | 4    | 4,05      | -22,12 |

#### **4.8. Comparación de la vida útil del electrodo en cada ensayo:**

Se llevaron a cabo ocho ensayos de desgaste. A continuación se presenta el resumen de la cantidad de puntos logrados en cada uno al detener el ensayo:

Electrodo Truncocónico ( $e = 0,9\text{mm}$  y sin enfriamiento): 390 puntos.

Electrodo Bombeado ( $e = 0,9\text{mm}$  y sin enfriamiento): 480 puntos.

Electrodo Truncocónico ( $e = 0,9\text{mm}$  y con enfriamiento): 720 puntos.

Electrodo Bombeado ( $e = 0,9\text{mm}$  y con enfriamiento): 810 puntos.

Electrodo Truncocónico ( $e = 1,1\text{mm}$  y sin enfriamiento): 630 puntos.

Electrodo Bombeado ( $e = 1,1\text{mm}$  y sin enfriamiento): 750 puntos.

Electrodo Truncocónico ( $e = 1,1\text{mm}$  y con enfriamiento): 900 puntos.

Electrodo Bombeado ( $e = 1,1\text{mm}$  y con enfriamiento): 1050 puntos.

En los ensayos de desgaste, al comparar la geometría de los electrodos se puede observar lo siguiente: en el ensayo sin enfriamiento y con un espesor de 0.9mm la vida útil del electrodo de tipo bombeado supera a la del tipo truncocónico en un 18,75% (**Figura 4.19**); en el ensayo con enfriamiento y con un espesor de 0.9mm la vida útil del electrodo de tipo bombeado supera a la del tipo truncocónico en un 11,11% (**Figura 4.20**); en el ensayo sin enfriamiento y con un espesor de 1,1mm la vida útil del electrodo de tipo bombeado supera a la del tipo truncocónico en un 16% (**Figura 4.21**) y finalmente en el ensayo con enfriamiento y con un espesor de 1,1mm la vida útil del electrodo de tipo bombeado supera a la del tipo truncocónico en un 14,20% (**Figura 4.22**). Los electrodos bombeados son mas duraderos ya que su radio se adapta más al espesor del material, además tienen más facilidad de adaptación para diferentes espesores de chapas y una refrigeración más fácil (Hufnagel, Coca y Company, 1992)

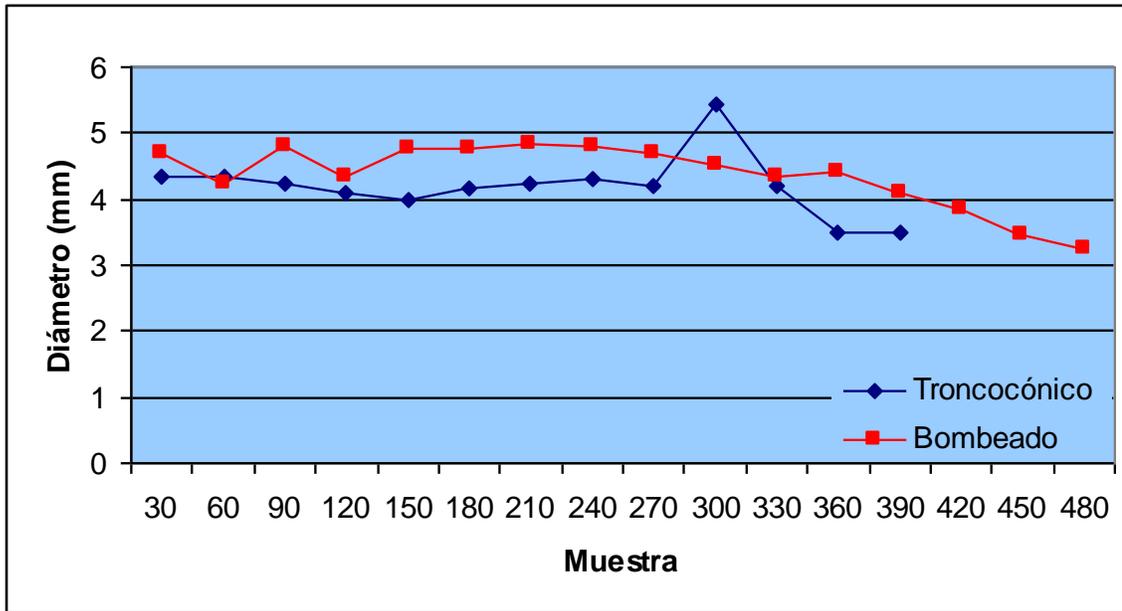


Figura 4.19. Comparación de vida útil según la geometría de electrodos (Espesor 0,9 sin enfriamiento)

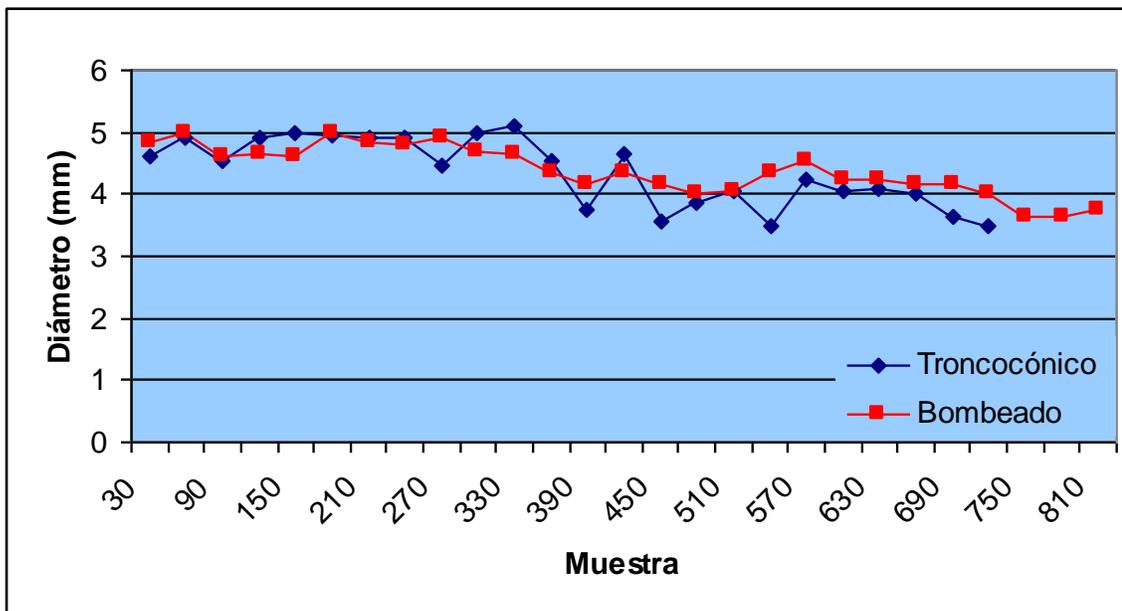


Figura 4.20. Comparación de vida útil según la geometría de electrodos (Espesor 0,9 con enfriamiento)

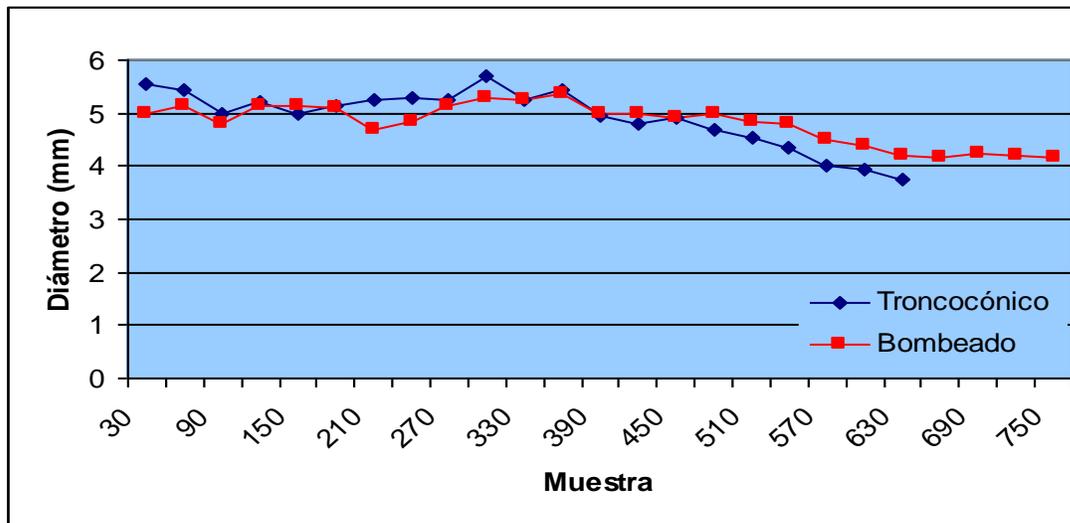


Figura 4.21. Comparación de vida útil según la geometría de electrodos (Espesor 1,1 sin enfriamiento)

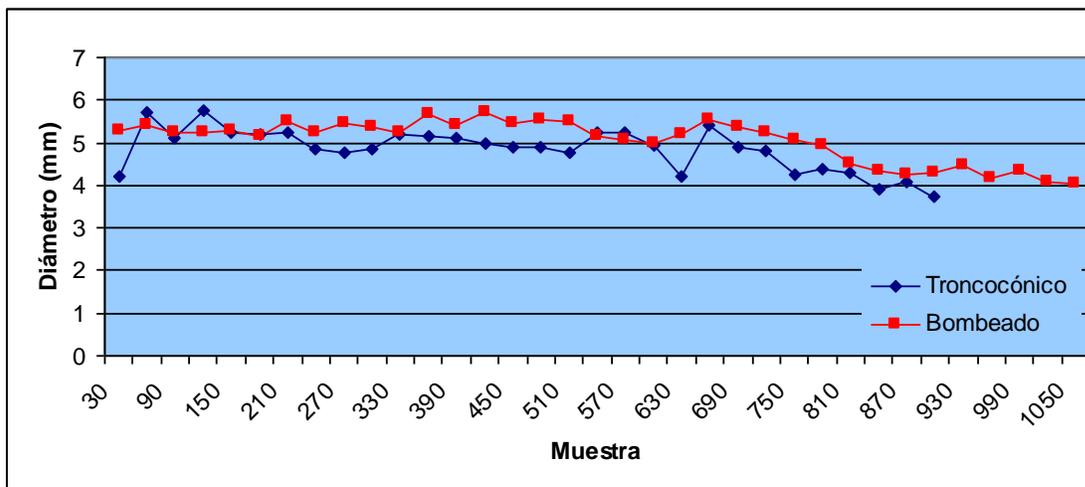


Figura 4.22. Comparación de vida útil según la geometría de electrodos (Espesor 1,1 con enfriamiento)

Al comparar la utilización o no de enfriamiento en los ensayos de desgaste se obtienen los siguientes resultados: utilizando un electrodo de tipo truncocónico y un espesor de lámina de 0,9mm, la vida útil se incrementa en un 45,83% al utilizar enfriamiento (**Figura 4.23**); utilizando un electrodo de tipo bombeado y un espesor de lámina de 0,9mm, la vida útil se incrementa en un

40,74% al utilizar enfriamiento (**Figura 4.24**); utilizando un electrodo de tipo troncocónico y un espesor de lámina de 1,1mm, la vida útil se incrementa en un 30% al utilizar enfriamiento (**Figura 4.25**); utilizando un electrodo de tipo bombeado y un espesor de lámina de 1,1mm, la vida útil se incrementa en un 28,57% al utilizar enfriamiento(**Figura 4.26**). El sistema de refrigeración permite una mayor disipación de calor de los electrodos, lo cual se traduce en menores temperaturas para los mismos y por lo tanto disminuye la fluencia del material.

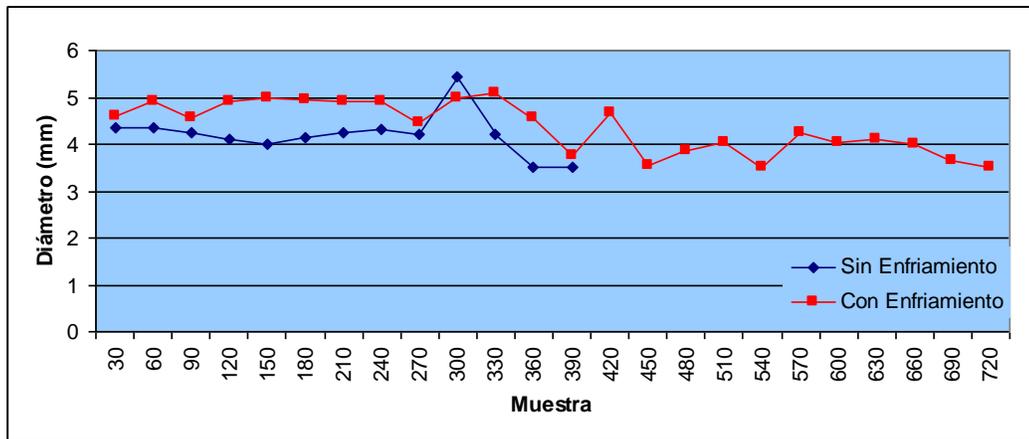


Figura 4.23. Comparación de vida útil usando el sistema de enfriamiento (Espesor 0,9 electrodo troncocónico)

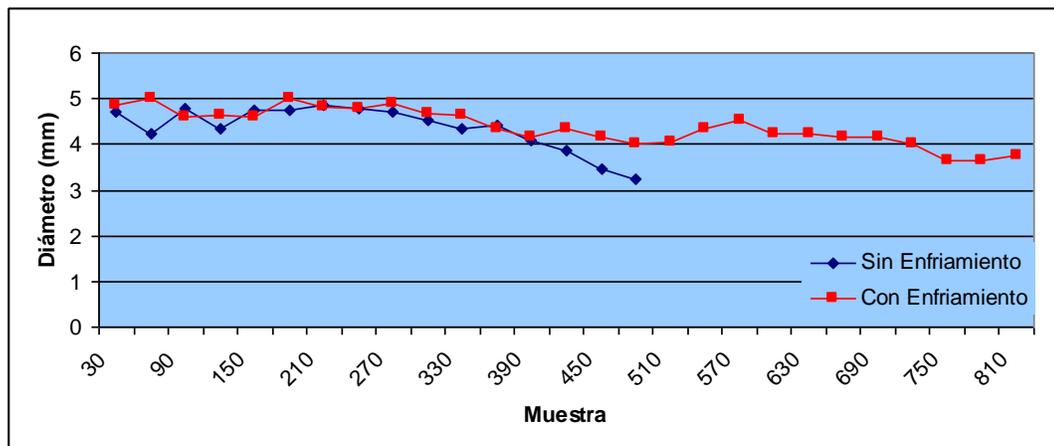


Figura 4.24. Comparación de vida útil usando el sistema de enfriamiento (Espesor 0,9 electrodo bombeado)

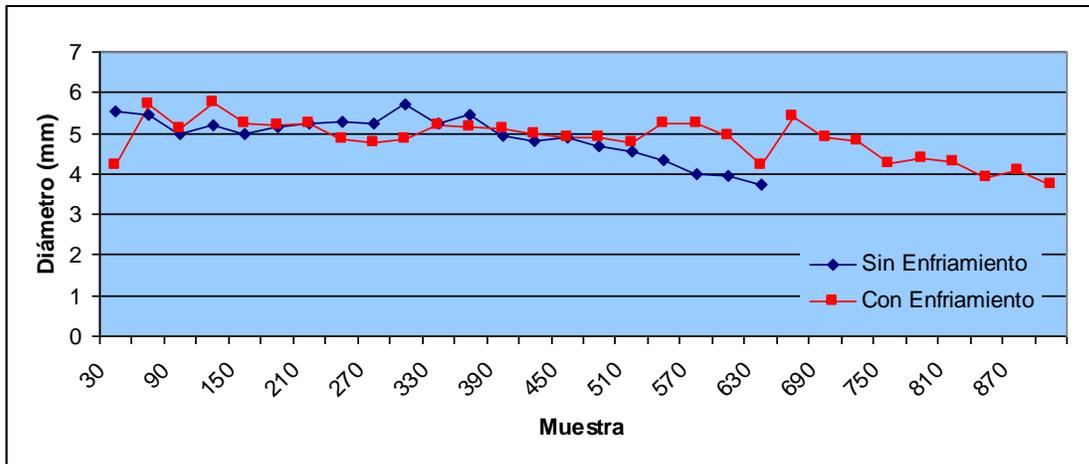


Figura 4.25. Comparación de vida útil usando el sistema de enfriamiento (Espesor 1,1 electrodo troncocónico)

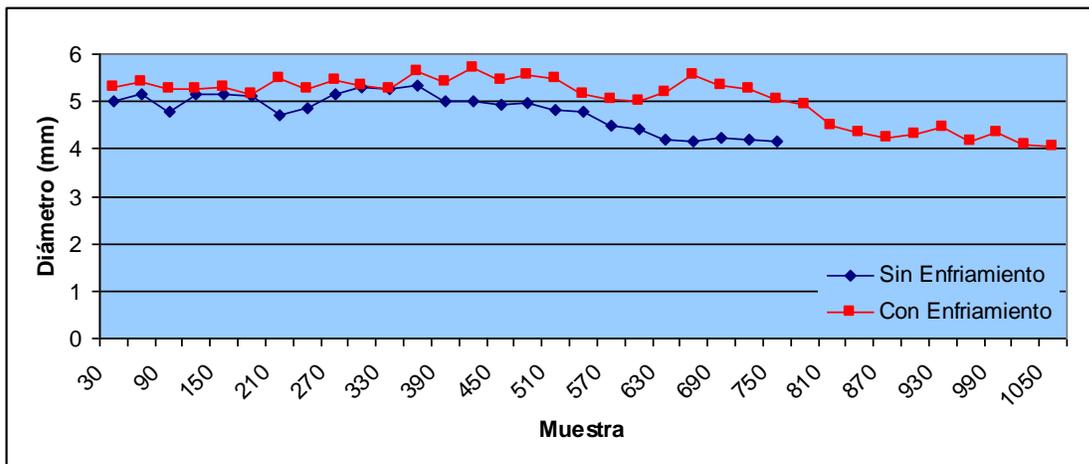


Figura 4.26. Comparación de vida útil usando el sistema de enfriamiento (Espesor 1,1 electrodo bombeado)

Al comparar el desgaste de los electrodos en los ensayos realizados en función del espesor de lámina se obtiene lo siguiente: en el ensayo sin enfriamiento y con un tipo de electrodo troncocónico la vida útil para un espesor de 1,1mm supera a la del espesor de 0,9mm en un 38,09% (**Figura 4.27**); en el ensayo sin enfriamiento y con un tipo de electrodo bombeado la

vida útil para un espesor de 1,1mm supera a la del espesor de 0,9mm en un 36% (**Figura 4.28**); en el ensayo con enfriamiento y con un tipo de electrodo troncocónico la vida útil para un espesor de 1,1mm supera a la del espesor de 0,9mm en un 20% (**Figura 4.29**) y finalmente el ensayo con enfriamiento y con un tipo de electrodo bombeado la vida útil para un espesor de 1,1mm supera a la del espesor de 0,9mm en un 22,85% (**Figura 4.30**). Éste comportamiento se debe a que las láminas de mayor espesor son capaces de conducir mayor cantidad de calor, reduciendo así el calor disipado a través de los electrodos y por lo tanto reduciendo la temperatura alcanzada por los mismos (De Heredia, 1959)

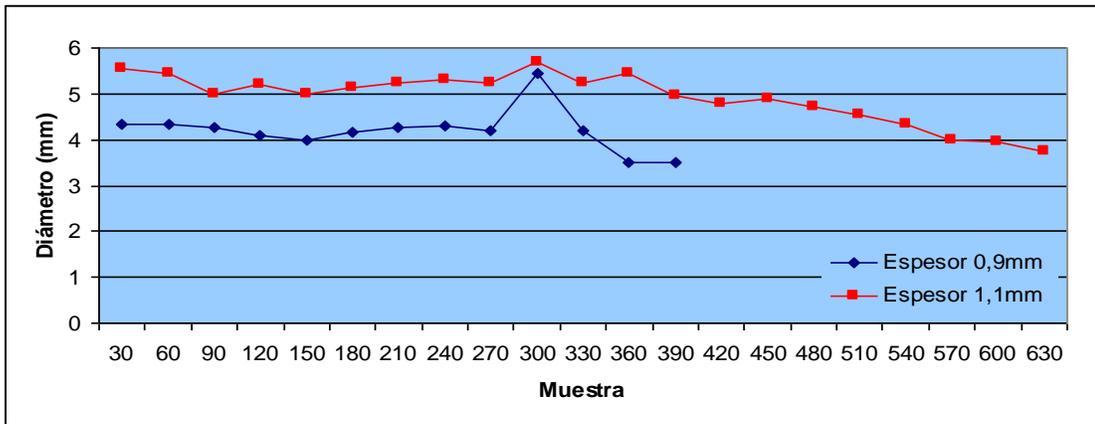


Figura 4.27. Comparación de vida útil en función del espesor de lámina (Sin enfriamiento, electrodo troncocónico)

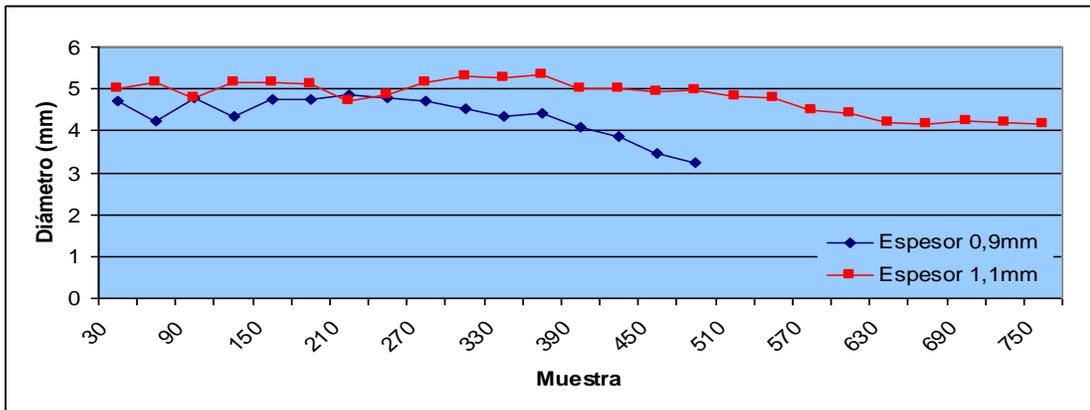


Figura 4.28. Comparación de vida útil en función del espesor de lámina (Sin enfriamiento, electrodo bombeado)

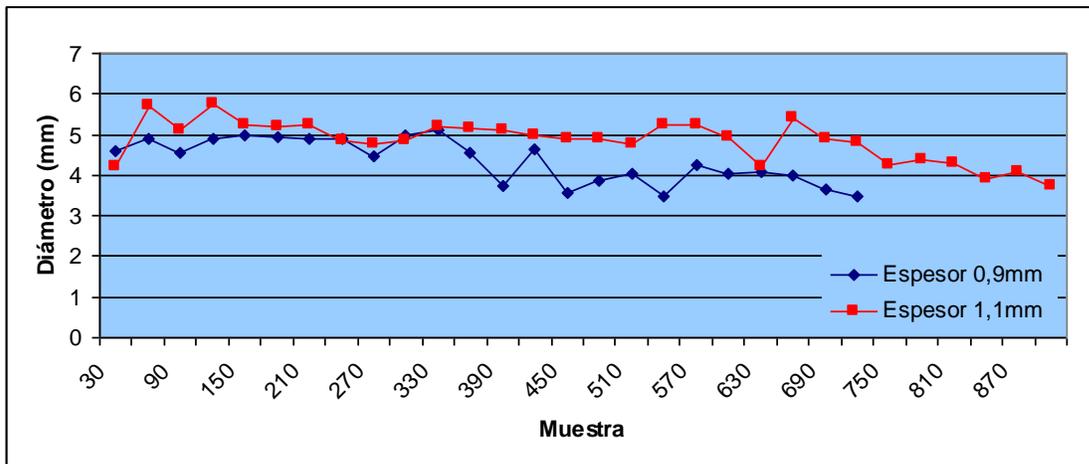


Figura 4.29. Comparación de vida útil en función del espesor de lámina (Con enfriamiento, electrodo troncocónico)

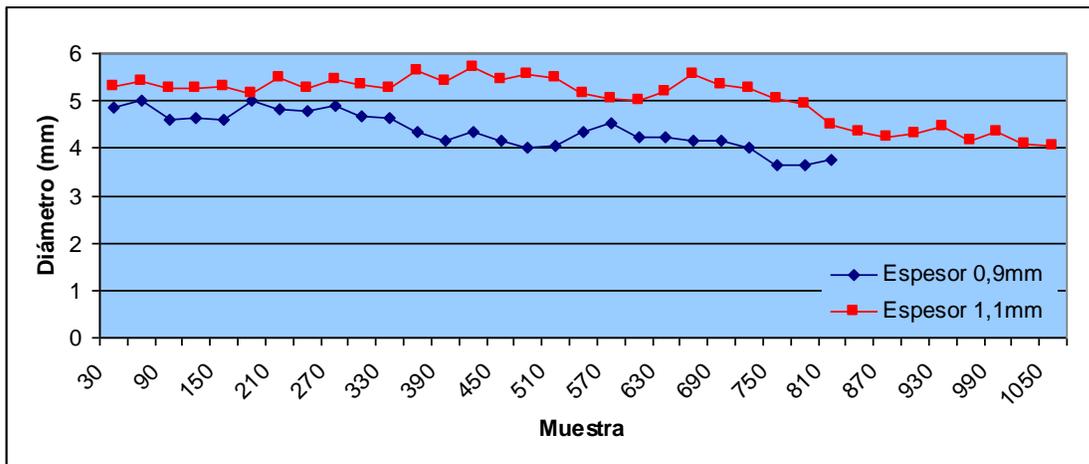


Figura 4.30. Comparación de vida útil en función del espesor de lámina (Con enfriamiento, electrodo bombeado)