UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA FUERZA APLICADA A LOS ELECTRODOS EN LA CALIDAD DE LA SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA

Autores:
Williams Mavares
Emmanuel Oliveros

Naguanagua, Noviembre del 2009.

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA FUERZA APLICADA A LOS ELECTRODOS EN LA CALIDAD DE LA SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Tutor académico:
Ing. Oswaldo Urbano

Autores:
Williams Mavares
Emmanuel Oliveros

Naguanagua, Noviembre del 2009.

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN.

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado para evaluar el Trabajo Especial de grado titulado: **"Evaluación de la Influencia de la Fuerza Aplicada a los Electrodos en la Calidad de la Soldadura por Resistencia Eléctrica"** realizado por los bachilleres: **Williams J. Mavares P.,** C.I: **18.691.470** y **Emmanuel A. Oliveros S.,** C.I: **17.258.156;** hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

_____
Ing. Oswaldo Urbano
Tutor

_____
Ing. Juan C. Pereira
Jurado

_____
Ing. Luís Sidorovas
Jurado

En Naguanagua a los 06 días del mes de noviembre del 2009.

DEDICATORIA

- ✓ *A dios por guiarnos a lo largo de este camino y por ser la principal fuente de fortaleza y sabiduría en nuestras vidas.*

- ✓ *A nuestros padres, por ser los pilares fundamentales en nuestra educación y por brindarnos su apoyo incondicional.*

- ✓ *A todas aquellas personas que tuvieron fe en Dios que íbamos a alcanzar ésta meta exitosamente.*

Williams Mavares y Emmanuel Oliveros

AGRADECIMIENTOS

- A nuestros padres y a las familias Oliveros y Castillo por sus consejos y brindarnos su apoyo incondicional durante toda la carrera.

- A la Universidad de Carabobo, por permitirnos como Alma Mater prepararnos en sus aulas y así convertirnos en profesionales.

- A todos los profesores que nos formaron, y en específico a nuestros tutores Oswaldo Urbano, Luis Sidorovas, Juan C. Pereira por brindarnos parte de su tiempo y conocimientos en la realización de éste trabajo.

- A nuestros compañeros Josue, Chiri, Fausto, Wilmer, Andrés, Omar, Cupido, El Chino, Leandro, Carlos, por ayudarnos en todo momento.

Williams Mavares y Emmanuel Oliveros

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA FUERZA APLICADA A LOS ELECTRODOS EN LA CALIDAD DE LA SOLDADURA POR RESISTENCIA ELÉCTRICA

Autores: Williams Mavares y Emmanuel Oliveros
Tutor: Ing. Oswaldo Urbano

Universidad de Carabobo
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

RESUMEN

La soldadura por electropuntos consiste en hacer pasar una intensidad de corriente por los electrodos, en los cuales se generan altas temperaturas en la zona de contacto y además están sometidos a esfuerzos de compresión producto de la fuerza que se emplea para unir las láminas en el intervalo de tiempo de soldeo. La intensidad de corriente, el tiempo de unión y la fuerza de compresión son las variables más importantes a controlar en este proyecto de investigación. Con la finalidad de determinar la influencia de la fuerza aplicada a los electrodos durante el proceso se utilizó la máquina de soldadura por electropuntos ubicada en el Laboratorio de Procesos de Fabricación de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo, donde se realizaron ensayos de soldadura determinando los parámetros más adecuados (intensidad de corriente, tiempo de unión y fuerza de compresión) para soldar láminas de diversos espesores de acero estructural AISI-1018 (e_1 = 0,7 mm; e_2 = 0,9 mm y e_3 = 1,1 mm) y de aluminio 3003*h*14 (e_1 = 0,8 mm; e_2 = 1,0 mm y e_3 = 1,27 mm). También se verificó como influye el sistema de enfriamiento en los electrodos de cobre electrolítico (punta tipo Domo) sobre la calidad superficial de la soldadura y se implementó un sistema neumático con el objetivo de controlar y conocer la fuerza que estos ejercen al material a soldar. Los resultados obtenidos fueron analizados para elaborar curvas donde se refleja el comportamiento de la fuerza en función del espesor de lámina *(F vs e)* donde las ecuaciones que rigen dicho comportamiento son: $\boldsymbol{F = 942{,}48.e^2 - 879{,}65.e + 530{,}93}$ a $\boldsymbol{(I_5: 6530\ A,\ t_3: 14\ ciclos)}$ para el acero y $\boldsymbol{F = 643{,}67.e^2 - 530{,}28.e + 389{,}27}$ a $\boldsymbol{(I_3: 5360\ A,\ t_7: 42\ ciclos)}$ para el aluminio, ambas curvas presentan una tendencia similar, sin embargo para un mismo espesor de lámina se debe aplicar mayor fuerza en el acero que en el aluminio. El enfriamiento interno en los electrodos durante el proceso de soldadura repercute notablemente en la mejoría de la calidad superficial de ésta, y en ambos materiales la ecuación que rige el comportamiento de la curva *(F vs e)* a las distintas condiciones (con y sin enfriamiento interno en los electrodos) es la misma.

Palabras Claves: *Soldadura por electropuntos, Fuerza de compresión, Intensidad de Corriente, Tiempo de Unión.*

ÍNDICE GENERAL

Índice General……. i
Índice de Figuras…… v
Índice de Tablas…….. ix
Índice de Ecuaciones…….. xiii
Nomenclatura…….. xv

Introducción…… 1

Capítulo 1. El Problema…… 3
1.1 Título del Proyecto…… 5
1.2 Situación Problemática…… 5
1.3 Formulación del Problema…….. 5
1.4 Justificación…… 6
1.5 Objetivos del Proyecto…… 6
1.5.1 Objetivo General…… 6
1.5.2 Objetivos Específicos…… 6
1.6 Alcance…… 7
1.7 Limitaciones…..…… 8

Capítulo 2. Marco Teórico…… 9
2.1 Antecedentes……... 11
2.2 Bases Teóricas……. 13
2.2.1 Evolución de la Soldadura por Resistencia Eléctrica…..……... 13
2.2.2 Definición de Soldadura por Resistencia Eléctrica……... 14
2.2.3 Tipos de Soldadura por Resistencia Eléctrica...…… 14
2.2.3.1 Por Costura……... 14

2.2.3.2 Por Proyección……. 15
2.2.3.3 A Tope...……... 16
2.2.3.4 Por electropunto……... 16
2.2.3.4.1 Principio de Funcionamiento…….. 17
2.2.3.4.2 Generación de Calor……... 18
2.2.3.4.2.1 Ecuación de Calor…….. 18
2.2.3.4.2.2 Disipación de Calor……... 20
2.2.3.4.2.3 Balance Calorífico……. 21
2.2.3.4.3 Variables que influyen en proceso…….. 21
2.2.3.4.3.1 Influencia del Tiempo…… 21
2.2.3.4.3.2 Influencia de la Corriente…….. 24
2.2.3.4.3.3 Influencia de la Presión……. 24
2.2.3.4.3.4 Influencia de los Electrodos…….. 26
2.2.3.4.3.4.1 Características……... 27
2.2.3.4.3.4.2 Mecanismo de Enfriamiento……..... 28
2.2.3.4.3.4.3 Materiales……. 29
2.2.3.4.3.4.4 Mantenimiento……. 29
2.2.3.4.3.5 Influencia de la condición de la superficie…… 30
2.2.3.4.3.6 Influencia de la Composición del Metal…… 31
2.2.3.4.4 Técnicas de la Soldadura por Electropunto…… 31
2.2.4 Ensayo Destructivo Peel…… 32
2.2.4.1 Recomendaciones para el Ensayo Destructivo Peel……. 33
2.2.5 Ley de Hooke en Resortes……. 34

Capítulo 3. Marco Metodológico…….. 35
3.1 Tipo de investigación……. 37
3.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos……... 37
3.3 Recursos utilizados…… 37
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……. 44
3.5.1 Implementación de un sistema neumático para la medición de la fuerza. 45
3.5.2 Pruebas piloto de soldadura por electropuntos en función de la intensidad de corriente vs tiempo de unión……. 45
3.5.3 Ensayos de soldadura por electropuntos en función del espesor de lámina y la fuerza aplicada a los electrodos (sin enfriamiento interno en los electrodos)……. 46
3.5.4 Ensayos de soldadura por electropuntos en función del espesor de lámina y la fuerza aplicada a los electrodos (con enfriamiento interno en los electrodos)……. 47

Capítulo 4. Desarrollo Experimental……... 49
4.1 Implementación de un sistema neumático para la medición de la fuerza….. 51
4.2 Pruebas piloto de soldadura por electropuntos en función de la intensidad de corriente vs tiempo de unión…….. 62
4.2.1 Pruebas piloto con probetas de acero estructural de bajo carbono AISI-1018 de calidad superficial ASTM-336……... 67
4.2.2 Pruebas piloto con probetas de aluminio 3003*h*14……..... 71
4.3 Ensayos de soldadura por electropuntos en función del espesor de lámina y la fuerza aplicada a los electrodos (sin enfriamiento interno en los electrodos)……... 77
4.3.1 Ensayos con probetas de acero estructural de bajo carbono AISI-1018 de calidad superficial ASTM-336…… 77
4.3.2 Ensayos con probetas de aluminio 3003*h*14……. 86
4.4 Ensayos de soldadura por resistencia eléctrica en función del espesor de lámina y la fuerza aplicada a los electrodos (con enfriamiento interno en los electrodos)……. 95

4.4.1 Ensayos con probetas de acero bajo las condiciones de *(I_5: 65430 A, t_3: 14 ciclos)*……. 95

4.4.2 Ensayos con probetas de aluminio bajo las condiciones de *(I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos)*……. 98

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones…… 101

5.1 Conclusiones……... 103

5.2 Recomendaciones…… 104

Referencias Bibliográficas……. 105

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2. Marco Teórico

Figura 2.1 Soldadura por Resistencia Eléctrica por Costura……... 15

Figura 2.2 Soldadura por Resistencia Eléctrica por Proyección…….. 15

Figura 2.3 Soldadura por Resistencia Eléctrica a Tope……... 16

Figura 2.4 Soldadura por Resistencia Eléctrica por Electropunto……... 17

Figura 2.5 Esquema de Funcionamiento de una Máquina por Electropuntos..... 18

Figura 2.6 Resistencias al paso de la corriente…… 19

Figura 2.7 Disipación de calor hacia el metal base y los electrodos…… 20

Figura 2.8 Ciclo de Operación de la Soldadura por Electropuntos…….. 22

Figura 2.9 Gráfica Tiempo vs Corriente del ciclo de operación de la Soldadura por Electropuntos…… 23

Figura 2.10 Diseño de cara estándar de los electrodos y sus partes……..... 28

Figura 2.11 Etapas del Ensayo Destructivo Peel……. 33

Capítulo 3. Marco Metodológico

Figura 3.1 Dimensiones iniciales de láminas de acero estructural de bajo carbono AISI-1018 de calidad superficial ASTM-336……. 38

Figura 3.2 Dimensiones iniciales de láminas de aluminio 3003h14…… 38

Figura 3.3 Plano del electrodo punta tipo Domo……. 39

Figura 3.4 Electrodos de cobre electrolítico punta tipo Domo..... 39

Figura 3.5 Plano de la bocina adaptadora para los electrodos……. 40

Figura 3.6 Bocina adaptadora para los electrodos……... 40

Figura 3.7 Máquina de Soldadura por Electropuntos…….. 41

Figura 3.8 Sistema de enfriamiento……. 42

Figura 3.9 Compresor…….. 42

Figura 3.10 Cizalladora…… 43

Figura 3.11 Vernier Digital…….. 43
Figura 3.12 Flujograma de actividades…… 44

Capítulo 4. Desarrollo Experimental.

Figura 4.1 Equipos que componen el sistema neumático…… 51
Figura 4.2 Esquema para transmitir la fuerza a los electrodos…… 52
Figura 4.3 Diseño de la mesa para la adaptación del actuador neumático…….. 52
Figura 4.4 Equipos y herramientas utilizados en la construcción de la mesa….. 53
Figura 4.5 Mesa construida…….. 53
Figura 4.6 Conjunto armado *(máquina de soldadura por electropuntos, mesa y sistema neumático)*……... 54
Figura 4.7 Punto de contacto entre el vástago y el portaelectrodo…….. 54
Figura 4.8 Llave de paso y perrilla reguladora de presión del compresor……... 55
Figura 4.9 Perilla reguladora de presión del aire y manómetro de la unidad de mantenimiento…….. 55
Figura 4.10 Esquema del funcionamiento de la válvula neumática……. 56
Figura 4.11 Especificaciones del actuador neumático……. 57
Figura 4.12 Catálogo de las especificaciones de los resortes de compresión….. 58
Figura 4.13 Especificaciones del resorte de compresión……. 59
Figura 4.14 Esquema para trasmitir la fuerza al resorte de compresión…….. 59
Figura 4.15 Esquema para medir la altura de compresión en el resorte…….. 60
Figura 4.16 Curvas de calibración de la fuerza del sistema neumático y del resorte en función de la presión…….. 61
Figura 4.17 Dimensiones en pulgadas recomendadas para las probetas del ensayo destructivo Peel…….. 62
Figura 4.18 Valores de intensidad de corriente y tiempo de unión para las distintas combinaciones de posición de los selectores de la máquina de soldadura por electropuntos utilizada……. 63
Figura 4.19 Patrón de marcaje de las probetas para las pruebas piloto……. 63

Figura 4.20 Fallas que se pueden generar en el ensayo destructivo Peel……. 65
Figura 4.21 Comparación entre el diámetro requerido y el de la pepita de soldadura de las muestras del ensayo destructivo Peel para láminas de acero de *e* = 1,1 mm……. 68
Figura 4.22 Comparación entre el diámetro requerido y el de la pepita de soldadura de las muestras del ensayos destructivo Peel para láminas de acero de e = 0,9 mm……. 69
Figura 4.23 Comparación entre el diámetro requerido y el de la pepita de soldadura de las muestras del ensayos destructivo Peel para láminas de acero de e = 0,7 mm……. 71
Figura 4.24 Comparación entre el diámetro requerido y el de la pepita de soldadura de las muestras del ensayos destructivo Peel para láminas de aluminio de e = 1,27 mm…….. 72
Figura 4.25 Comparación entre el diámetro requerido y el de la pepita de soldadura de las muestras del ensayos destructivo Peel para láminas de aluminio de e = 1,0 mm…… 74
Figura 4.26 Comparación entre el diámetro requerido y el de la pepita de soldadura de las muestras del ensayos destructivo Peel para láminas de aluminio de e = 0,8 mm…… 75
Figura 4.27 Dimensiones de la probeta para la realización de los ensayos…... 77
Figura 4.28 Medición de los diámetros de la huella dejada por los electrodos. 78
Figura 4.29 Probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de e = 0,7 mm *(I_5: 6430A, t_2: 9 ciclos), S/E*……... 78
Figura 4.30 Probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de e = 0,9 mm *(I_5: 6530A, t_3: 14 ciclos), S/E*……. 80
Figura 4.31 Gráfica (F vs e) del acero bajo las condiciones *(I_5: 6530A, t_3: 14 ciclos), S/E*……. 82
Figura 4.32 Líneas de tendencias de la gráfica (F vs e) del acero bajo las condiciones *(I_5: 6530A, t_3: 14 ciclos), S/E*…….. 82

Figura 4.33 Probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de e = 1,1 mm *(I_5: 6660 A, t_5: 24 ciclos), S/E*…… 84

Figura 4.34 Probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de e = 0,8 mm *(I_3: 5350 A, t_6: 32 ciclos), S/E*……. 86

Figura 4.35 Probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de e = 1,0 mm *(I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos), S/E*……. 88

Figura 4.36 Gráfica *(F vs e)* del aluminio bajo las condiciones *(I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos), S/E*…… 90

Figura 4.37 Líneas de tendencias de la gráfica *(F vs e)* del aluminio bajo las condiciones *(I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos), S/E*……. 90

Figura 4.38 Probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de *e* = 1,27 mm *(I_3: 5380 A, t_8: 59 ciclos), S/E*……. 92

Figura 4.39 Probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de *e* = 0,9 mm *(I_5: 65430A, t_3: 14 ciclos), C/E*……... 95

Figura 4.40 Probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de *e* = 1,0 *mm (I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos), C/E*……. 98

Figura 4.41 Gráfica *(F vs e)* del acero y del aluminio bajo las condiciones *(I_5: 6530 A, t_3: 14 ciclos) y (I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos) respectivamente, S/E y C/E*……. 100

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2. Marco Teórico

Tabla 2.1 Diámetro de la Cara Normalizado de los Electrodos…… 31

Capítulo 4. Desarrollo Experimental.

Tabla 4.1 Valores de fuerza por cada presión suministrada al actuador neumático…….. 58

Tabla 4.2 Valores de fuerza recibida por el resorte a diferentes presiones…… 60

Tabla 4.3 Valores para la elaboración de curvas de comparación de la fuerza del sistema neumático y del resorte…… 61

Tabla 4.4 Dimensiones en milímetros de las probetas para el ensayo destructivo Peel……. 62

Tabla 4.5 Variables a verificar durante la inspección visual de los puntos de soldadura……... 64

Tabla 4.6 Valores de tamaño de pepita de soldadura recomendado para láminas de diversos espesores…….. 65

Tabla 4.7 Presiones de trabajo fijada a cada material para la búsqueda de los parámetros óptimos……... 66

Tabla 4.8 Inspección visual y valores de diámetros de la pepita de soldadura de las muestras del ensayo destructivo Peel para láminas de acero de e = 1,1 mm…….. 67

Tabla 4.9 Inspección visual y valores de diámetros de la pepita de soldadura de las muestras del ensayo destructivo Peel para láminas de acero de e = 0,9 mm…….. 69

Tabla 4.10 Inspección visual y valores de diámetros de la pepita de soldadura de las muestras del ensayo destructivo Peel para láminas de acero de e = 0,7 mm…….. 70

Tabla 4.11 Inspección visual y valores de diámetros de la pepita de soldadura de las muestras del ensayo destructivo Peel para láminas de aluminio de e = 1,27 mm…… 72

Tabla 4.12 Inspección visual y valores de diámetros de la pepita de soldadura de las muestras del ensayo destructivo Peel para láminas de aluminio de e = 1,0 mm…….. 73

Tabla 4.13 Inspección visual y valores de diámetros de la pepita de soldadura de las muestras del ensayo destructivo Peel para láminas de aluminio de e = 0,8 mm…….. 74

Tabla 4.14 Valores óptimos de intensidad de corriente y tiempo de unión según el material y el espesor de la lámina…….. 75

Tabla 4.15 Diámetros de las huellas de las probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de e = 0,7 mm *(I_5: 6430 A, t_2: 9 ciclos), S/E*…….... 79

Tabla 4.16 Diámetros de las huellas de las probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de e = 0,9 mm *(I_5: 6530 A, t_3: 14 ciclos), S/E*……. 81

Tabla 4.17 Ecuaciones de las líneas de tendencias de la gráfica (*F vs e*) del acero bajo las condiciones *(I_5: 6530 A, t_3: 14 ciclos), S/E*…… 83

Tabla 4.18 Valores de fuerza para cada ecuación de las líneas de tendencias de la gráfica (*F vs e*) del acero bajo las condiciones *(I_5: 6530 A, t_3: 14 ciclos)* evaluados en los espesores ensayados, *S/E*…… 83

Tabla 4.19 Diámetros de las huellas de las probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de e = 1,1 mm *(I_5: 6660 A, t_5: 24 ciclos), S/E*…..... 85

Tabla 4.20 Diámetros de las huellas de las probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de e = 0,8 mm *(I_3: 5350 A, t_6: 32 ciclos),S/E.* 87

Tabla 4.21 Diámetros de las huellas de las probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de e = 1,0 mm *(I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos),S/E.* 89

Tabla 4.22 Ecuaciones de las líneas de tendencias de la gráfica *(F vs e)* del aluminio bajo las condiciones *(I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos), S/E*…….. 91

Tabla 4.23 Valores de fuerza para cada ecuación de las líneas de tendencias de la gráfica *(F vs e)* del aluminio bajo las condiciones *(I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos)* evaluados en los espesores ensayados, *S/E*…….. 91

Tabla 4.24 Diámetros de las huellas de las probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de *e* = 1,27 mm *(I_3: 5380 A, t_8: 59 ciclos), S/E*……. 93

Tabla 4.25 Diámetros de las huellas de las probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de *e* = 0,9 mm *(I_5: 65430 A, t_3: 14 ciclos), C/E*….. 96

Tabla 4.26 Comparación de los valores de los diámetros de las huellas de las probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de *e* = 0,9 mm *(I_5: 65430 A, t_3: 14 ciclos), S/E y C/E*……... 97

Tabla 4.27 Diámetros de las huellas de las probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de *e = 1,0* mm *(I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos), C/E*……. 98

Tabla 4.28 Comparación de los valores de los diámetros de las huellas de las probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de *e* = 1,0 mm *(I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos), S/E y C/E*……..... 99

ÍNDICE DE ECUACIONES

Capítulo 2. Marco Teórico

Ecuación 2.1 Ecuación de Calor…….. 18

Ecuación 2.2 Ecuación de Fuerza…… 25

Ecuación 2.3 Ecuación de Fuerza…… 26

Ecuación 2.4 Ecuación de Fuerza…… 26

Ecuación 2.5 Ecuación de Fuerza…… 26

Ecuación 2.6 Ecuación de la Ley de Hooke en Resortes……. 34

Capítulo 4. Desarrollo Experimental

Ecuación 4.1 Ecuación de Fuerza……..... 57

Ecuación 4.2 Ecuación de Área Circular……..... 57

Ecuación 4.3 Ecuación de Fuerza del Acero (S/E)……..... 83

Ecuación 4.4 Ecuación de Fuerza del Aluminio (S/E)……. 91

Ecuación 4.5 Ecuación de Fuerza del Acero (C/E)…….. 97

Ecuación 4.6 Ecuación de Fuerza del Aluminio (C/E)…… 99

NOMENCLATURA

C/E	Con enfriamiento interno en los electrodos (Adimensional)
D	Diámetro (milímetros)
e	Espesor de lámina (milímetros)
F	Fuerza (Newton)
I	Intensidad de corriente (Ampere)
Q	Calor generado (Joule)
R	Resistencias ofrecidas al paso de corriente (Ohm)
R^2	Grado de correlación (Adimensional)
S/E	Sin enfriamiento interno en los electrodos (Adimensional)
t	Tiempo de unión (segundo)

INTRODUCCIÓN

La estructura del presente proyecto de investigación comprende V capítulos destinados a desarrollar el tema, a continuación se da una breve descripción de los mismos.

En el capítulo I se plantea y formula el problema, el objetivo general y los objetivos específicos, los cuales se enfocan en realizar ensayos de soldadura en función de la intensidad de corriente, tiempo de unión y fuerza de compresión, variando el material a soldar, el espesor del mismo y las condiciones de enfriamiento en los electrodos.

Seguidamente se desarrolla el capítulo II, en el mismo se exponen investigaciones anteriores relacionadas con el tema y los fundamentos teóricos y prácticos del proceso de soldadura por electropuntos.

En el capítulo III se describe la metodología del proyecto de investigación utilizada para alcanzar los objetivos planteados.

El capítulo IV comprende el desarrollo experimental donde se explica detalladamente la metodología expuesta en capítulo anterior, también muestra los resultados obtenidos de los ensayos realizados y a través de estos se elaboraron curvas que refleja el comportamiento de la fuerza aplicada a los electrodos en función del espesor de lámina.

Finalmente en el capítulo V se realizan las conclusiones y se dan recomendaciones para la elaboración de futuros proyectos relacionados con éste.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Título del Proyecto.

Evaluación de la Influencia de la Fuerza Aplicada a los Electrodos en la Calidad de la soldadura por Resistencia Eléctrica.

1.2 Situación Problemática.

En todo proceso de elaboración en el cual se requiere de uniones permanentes, la soldadura por resistencia eléctrica es la de mayor aplicación debido a su efectividad y simplicidad. El tiempo de unión, la intensidad de corriente y la calidad de la superficie son unas de las tantas variables que influyen en este tipo de soldadura. El obtener una buena calidad superficial es indicio de una buena soldadura, por ello la fuerza que ejercen los electrodos sobre el material a soldar juega un papel muy importante, ya que al aplicar mucha fuerza podría ocasionar una penetración en el material y en caso contrario podría no soldar el mismo.

Actualmente en el Laboratorio de Procesos de Fabricación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, la máquina de soldadura por resistencia eléctrica de la cual se dispone, es accionada a través de un pedal que mediante un mecanismo de resortes y palanca proporciona la fuerza a los electrodos para lograr la unión del material, de esta forma el valor de dicha fuerza no es posible conocerla y la misma es variable. Por tal motivo se quiere adaptar un sistema que sea capaz de medir y controlar la fuerza aplicada a los electrodos y en función a esta determinar la influencia que tiene sobre la soldadura por electropuntos.

1.3 Formulación del Problema.

¿Cómo influye la fuerza aplicada a los electrodos en la calidad de la soldadura por resistencia eléctrica?

1.4 Justificación.

Al evaluar la influencia que tiene la fuerza aplicada por los electrodos al material a soldar, se tendría el conocimiento del valor a aplicarse durante la soldadura para que la calidad de la misma sea la mejor posible, también se estaría aportando conocimientos para estudios posteriores, siendo este el primero en llevarse a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Procesos de Fabricación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, en cuanto al estudio de la fuerza aplicada a los electrodos se refiere.

1.5 Objetivos del proyecto.

1.5.1 Objetivo General.

Evaluar la Influencia de la Fuerza Aplicada a los Electrodos en la Calidad de la soldadura por Resistencia Eléctrica.

1.5.2 Objetivos Específicos.

1. Implementar un sistema neumático capaz de medir y controlar la fuerza aplicada a los electrodos en la soldadura por resistencia eléctrica.

2. Determinar el comportamiento más adecuado (Fuerza *vs* espesor) en la calidad de la soldadura en láminas de acero estructural de bajo carbono AISI-1018 de calidad superficial ASTM-336, sin enfriamiento interno en los electrodos.

3. Determinar el comportamiento más adecuado (Fuerza *vs* espesor) en la calidad de la soldadura en láminas de acero estructural de bajo carbono AISI-1018 de calidad superficial ASTM-336, con enfriamiento interno en los electrodos.

4. Determinar el comportamiento más adecuado (Fuerza *vs* espesor) en la calidad de la soldadura en láminas de aluminio 3003*h*14, sin enfriamiento interno en los electrodos.

5. Determinar el comportamiento más adecuado (Fuerza *vs* espesor) en la calidad de la soldadura en láminas de aluminio 3003*h*14, con enfriamiento interno en los electrodos.

1.6 Alcance.

1. Se determinará la influencia de la fuerza aplicada a los electrodos en la calidad de la soldadura.

2. El estudio se realiza sólo para un modelo de máquina de soldadura por electropuntos (Tipo: PRC/N 15; Nº 19220) disponible en el Laboratorio de Procesos de Fabricación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

3. El estudio se enfocará en dos tipos de materiales: acero AISI-1018 y aluminio 3003*h*14, porque poseen puntos de fusión distintos lo que permitirá comparar ambos comportamientos.

4. Los espesores de las láminas de acero estructural de bajo carbono AISI-1018 de calidad superficial ASTM-336 son: e_1 = 0,7 mm; e_2 = 0,9 mm y e_3 = 1,1 mm, ya que estos son los más comerciales en el mercado y los más empleados en este tipo de soldadura.

5. Los espesores de las láminas de aluminio 3003*h*14: e_1 = 0,8 mm; e_2 = 1,0 mm y e_3 = 1,27 mm, ya que estos son los más comerciales en el mercado y los más empleados en este tipo de soldadura.

1.7 Limitaciones.

1. El equipo a utilizar en la soldadura es por resistencia eléctrica.

2. Los valores de intensidad de corriente y tiempo de unión que ofrece la máquina.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

FACULTAD DE INGENIERIA

2.1 Antecedentes.

1. Chang y Zhou (2003). Determinaron que la fuerza del electrodo es un parámetro importante en el proceso de soldadura por resistencia eléctrica a pequeña escala, sus efectos sobre el comportamiento eléctrico, térmico y mecánico cuando se utiliza la corriente directa se han estudiado numéricamente en el presente documento mediante el método de elementos finitos. Las variaciones de contacto de radio, la distribución de la densidad de corriente, la temperatura en la interface entre el perfil de la hoja y el electrodo, el umbral de soldadura y el máximo diámetro de los puntos de soldadura en tres diferentes niveles de fuerza son investigados. El cálculo de los resultados muestra que el aumento de la fuerza del electrodo, aumenta el contacto de radio y la temperatura en la interface, disminuyendo la densidad de corriente; por tanto, retrasa el inicio y el crecimiento de la pepita de soldadura. [3]

2. Hasanbasoglu y Kacar (2006). Determinaron la influencia de los principales parámetros de soldadura que afectan la entrada de calor, tales como; pico de la morfología, micro dureza, resistencia a la tracción y capacidad de carga de cizallamiento de soldaduras disímiles entre el acero inoxidable austenítico AISI 316L y DIN EN 10130-99 (grado 7114). La resistencia del punto de soldadura de materiales disímiles es generalmente más difícil que la de materiales similares debido a las diferencias en las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los metales. Si bien, un conjunto aceptable fuerza se ha obtenido en el pico de corriente de soldadura de 7 kA, los máximos parámetros de una soldadura óptima se establecieron en un pico de corriente de soldadura de 9 de kA, donde la fuerza del electrodo y el tiempo de soldadura se mantienen constantes en 6 KN y 17 ciclos, respectivamente. La principal causa de debilitamiento de la soldadura es identificada como el crecimiento excesivo de grano de la zona de alteración. [8]

3. Xu et al (2007). Optimizaron la resistencia a la soldadura en una aleación refractaria (50%Mo – 50%Re) con una hoja de 0,127 mm de calibre. Los parámetros de soldadura que se manejaron fueron: tiempo de espera, tiempo en pista, forma del electrodo y la fuerza para optimizar la calidad de la soldadura. Se constató que el aumento del tiempo de espera de 50 ms a 999 ms mejora la soldadura. El uso de electrodos en forma de vara (cuerpo del electrodo) produce una pepita de soldadura simétrica. El uso de una rampa de un tiempo de 8 ms minimiza que el electrodo se pegue al metal fundido. La fuerza del electrodo se incrementó de 4,44 N a 17,8 N, a fin de reducir la inconsistencia de la calidad de la soldadura. Las porosidades y granos columnares fueron algunos de los defectos de la soldadura. [15]

4. Aslanlar et al (2007). Estudiaron los efectos del tiempo de soldadura sobre la resistencia a la tracción y resistencia al deslizamiento de las juntas de soldadura en micro-placas de acero aleado con espesores de 1,2 mm. Un temporizador, un control de la resistencia eléctrica y un mecanismo neumático con una sola palanca, se utilizó para preparar las muestras. La corriente para soldadura fue de 5 kA y 12 kA. La fuerza del electrodo se fijó en 6 kN. La soldadura de las juntas estaban expuestas a tracción, y el efecto de tracción sobre el tiempo de soldadura fue investigado usando diagramas relacionados con el período. [1]

5. Marashi et al (2007). Estudiaron el comportamiento de la resistencia y micro estructura de la soldadura por electro punto en la unión de aceros inoxidables austeníticos y acero galvanizado de baja emisión de carbono. La relación entre el tamaño de la soldadura y su micro estructura determinan la zona característica de la misma. Se constató que la fuerza en el punto de soldadura controla el modo de falla y el tamaño de la zona de fusión de acero galvanizado. La dureza y el tamaño de la zona de fusión que se rige por la dilución entre dos metales son los factores dominantes en la determinación de los modos de falla. [11]

6. Karci et al (2008). Caracterizaron los efectos y la influencia de diferentes condiciones en la soldadura en el acero inoxidable AISI304 deformado en frio. La fuerza del electrodo, la corriente de soldadura y el tiempo de soldadura son tres parámetros esenciales en el proceso de soldadura por resistencia eléctrica. Se constató que las propiedades mecánicas de la soldadura están directamente relacionadas con los parámetros del proceso, sabiendo el tiempo de soldadura y la tasa de deformación se podrá obtener una soldadura de calidad. También en soldadura la microestructura, la dureza, la resistencia a la tracción de cizalla (Resistencia a la tracción por cizalla. Mide el valor de las tensiones máximas necesarias para producir la rotura del material) fueron determinadas. [10]

2.2 Bases Teóricas.

2.2.1 Evolución de la Soldadura por Resistencia Eléctrica. [6]

La antigüedad del proceso data del año 1.877 en el que por casualidad durante un experimento que se realizaba en el Instituto Franklin, los extremos de una bobina quedaron soldados al paso de la corriente. Al siguiente año el proceso se empezaba a usar en la industria en la fijación de asas y mangos de cacerolas.

Hacia los años de 1.915 - 1.920 la construcción de carrocerías de automóviles en láminas de acero dio un importante impulso a este tipo de soldadura, sin embargo todavía la infraestructura no era capaz de desarrollar un uso masivo de este sistema. Fue durante la segunda guerra mundial cuando el avance fue espectacular fundamentalmente en Estados Unidos de América.

Actualmente el usuario masivo de máquinas de soldar por resistencia eléctrica es la industria automotriz, una planta de fabricación de autos tiene centenares de máquinas de soldar de este tipo. En las últimas dos décadas se ha producido en la industria del automóvil un fenómeno que también se ve reflejado en otros productos, es el número de puntos soldados que se van reduciendo, por ejemplo desde 11000 hasta 6500 puntos

aproximadamente en un nuevo modelo similar (Renault modelo 12 y el Renault modelo 21 respectivamente). Esto se debe a dos factores fundamentales:

1. El diseño de los componentes que aprovechando las actuales posibilidades de troquelado permiten obtener piezas unitarias que anteriormente constaban de varios componentes, por lo que se reducen los ensambles.

2. La evolución de la electrónica ha permitido con sus posibilidades de autocorrección y control garantizar la calidad de los puntos de soldadura.

Por lo tanto se dan los puntos necesarios, bien soldados y sin tener que recurrir a multiplicar la cantidad de los mismos como precaución. Es decir, que se ha producido una evolución positiva y selectiva en la soldadura.

2.2.2 Definición de Soldadura por Resistencia Eléctrica. [13]

La soldadura por resistencia eléctrica es un proceso en el que se ponen en contacto dos chapas metálicas fuertemente apretadas una contra otra, se hace pasar a través de la unión una fuerte corriente eléctrica, la resistencia que forma la unión de las dos chapas al paso de la corriente hace que se desarrolle el calor suficiente para fundir la superficie de las piezas en su punto de contacto, esto en consecuencia forma el punto de soldadura.

2.2.3 Tipos de Soldadura por Resistencia Eléctrica. [13]

Existen varias formas de realizar la soldadura por resistencia eléctrica, estas se explican a continuación:

2.2.3.1 Por Costura.

La soldadura por costura consiste en el enlace continuo de dos piezas de lámina traslapadas. La unión se produce por el calentamiento obtenido por la resistencia al

paso de la corriente y la presión constante que se ejerce por dos electrodos circulares. Este proceso de soldadura es continuo.

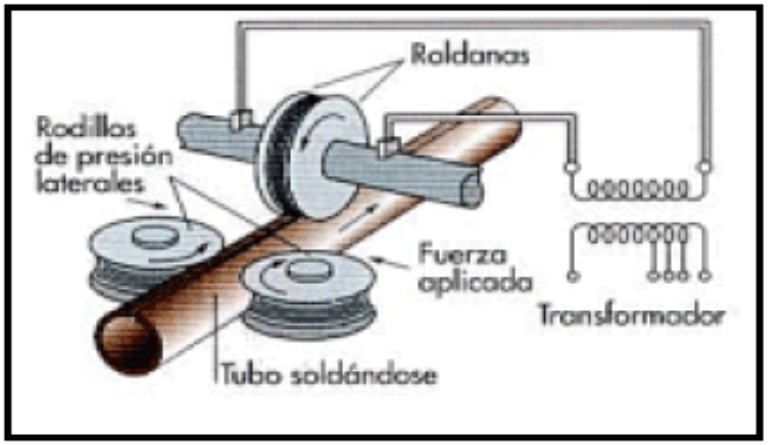


Figura 2.1 *Soldadura por Resistencia Eléctrica por Costura.* ***(Pender, 2001)***

2.2.3.2 Por Proyección.

La Soldadura por proyección es un proceso de soldadura por resistencia en el cual ocurre la coalescencia en uno o más puntos de contado relativamente pequeños en las partes. Estos puntos de contacto se determinan mediante el diseño de las partes que se van a unir y pueden consistir en proyecciones, grabados o intersecciones localizadas de las partes.

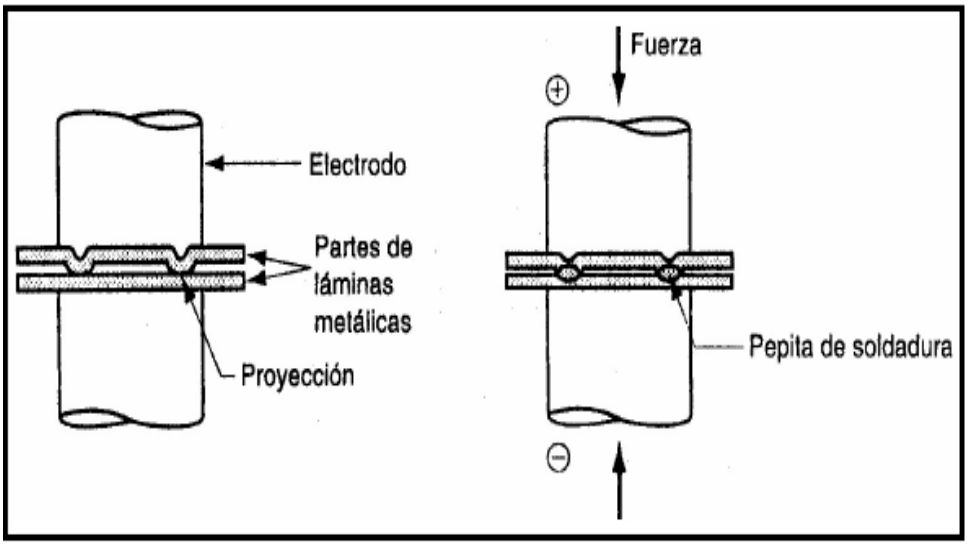


Figura 2.2 *Soldadura por Resistencia Eléctrica por Proyección.* ***(Pender, 2001)***

2.2.3.3 A Tope.

La soldadura a tope consiste en la unión de dos piezas con la misma sección, éstas se presionan cuando está pasando por ellas la corriente eléctrica, con lo que se genera calor en la superficie de contacto. Con la temperatura generada y la presión entre las dos piezas se logra la unión.

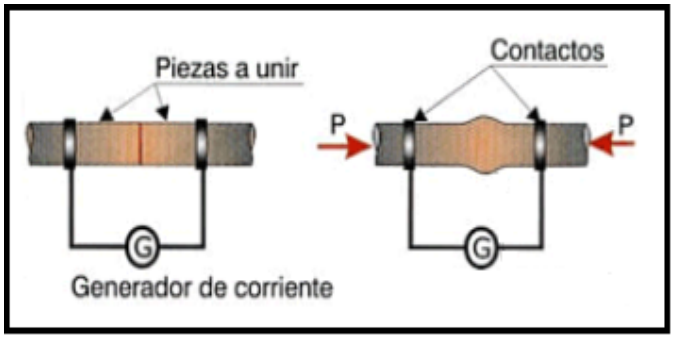


Figura 2.3 *Soldadura por Resistencia Eléctrica a Tope.* ***(Pender, 2001)***

2.2.3.4 Por Electropunto.

Las piezas generalmente chapas quedan soldadas por pequeñas zonas circulares aisladas y regularmente espaciadas que debido a su pequeño tamaño se denominan puntos. Las chapas se sujetan por medio de los electrodos por los que se hace pasar la corriente eléctrica para fundir el material y formar los puntos. Cuando estos se solidifican, la pieza queda unida y la cantidad de puntos dependerá de las aplicaciones y dimensiones de las chapas a unir.

Este tipo de soldadura por puntos tiene gran importancia en la industria moderna, sobre todo productos hechos a partir de láminas metálicas. Se emplea en la fabricación de carrocerías de automóviles, electrodomésticos (neveras), juguetería, etc. Los La espesores de las láminas varían desde valores mínimos como 0,3 mm hasta 5 mm.

El diámetro de la pepita de soldadura resultante varía según el espesor de las láminas a soldar, con una zona afectada por el calor que se extiende un poco más allá de la pepita dentro de los metates base. Si la soldadura se hace correctamente, su resistencia es comparable con la del metal circundante.

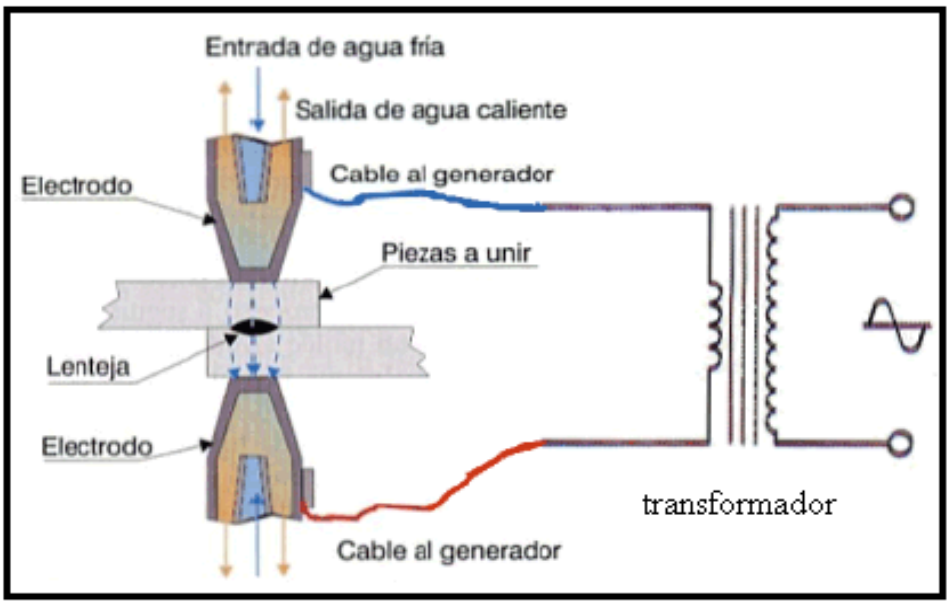


Figura 2.4 *Soldadura por Resistencia Eléctrica por Electropunto.* ***(Pender, 2001)***

2.2.3.4.1 Principio de Funcionamiento. [4]

Las operaciones de soldadura por electropuntos implican la aplicación coordinada de corriente eléctrica y presión mecánica con las magnitudes y duraciones adecuadas. La corriente de soldadura debe pasar entre los electrodos atravesando las láminas del trabajo y su continuidad se asegura mediante fuerzas aplicadas a los electrodos. La secuencia de operación debe generar suficiente calor para llevar un volumen confinado del metal al estado semi-fundido y luego permitir que este metal se enfríe bajo presión hasta que tenga adherencia suficiente para mantener unidas las piezas.

La densidad de corriente y la presión deben ser suficientes para formar un punto de soldadura, pero no tan altas para que el metal semi fundido sea expulsado de la zona de soldadura. La duración de la corriente debe ser lo bastante corta como para evitar un calentamiento excesivo en la cara de los electrodos, pues semejante calentamiento podría pegar los electrodos a las láminas de trabajo y reducir considerablemente su vida útil.

El calor requerido para estos procesos de soldadura de resistencia eléctrica se produce por la resistencia que oponen las piezas de trabajo al paso de una corriente eléctrica por el material. Debido a lo relativamente corto del trayecto de la corriente eléctrica en el material y a lo limitado del tiempo de soldadura, se requieren corrientes relativamente altas para generar el calor necesario para la soldadura.

Las máquinas que se emplean en este tipo de soldadura poseen transformadores que regulan la intensidad de corriente en el primario. A continuación se ilustra el esquema fundamental de estas máquinas.

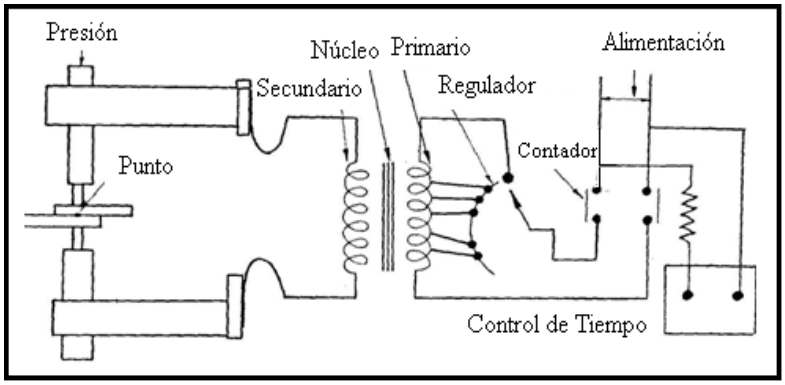


Figura 2.5 *Esquema de Funcionamiento de una Máquina por Electropuntos.* ***(De Heredia, 1959)***

2.2.3.4.2 Generación de Calor. [9]

El calor generado por un conductor eléctrico depende de tres factores: la intensidad del flujo eléctrico, la resistencia de conducción de la corriente (incluye el paso de la misma por el electrodo y el material a soldar) y la duración de la corriente. Estos tres factores afectan el calor generado y se expresa mediante la siguiente ecuación:

2.2.3.4.2.1 Ecuación de Calor.

En la soldadura por electropunto el calor se genera por efecto Joule, por lo que la cantidad de calor generado es:

$$Q = I^2.R.t \qquad \text{(Ec. 2.1)}$$

Donde:

Q: Calor (Joule)

I: Intensidad de corriente (Amperios)

R: Resistencia al paso de la corriente (Ohm)

t: Tiempo de circulación de la corriente (segundos)

La corriente requerida para producir una soldadura dada es aproximadamente inversamente proporcionar a la raíz cuadrada del tiempo, por lo que si el tempo es extremadamente corto, la corriente requerida será muy alta. Una combinación de corriente elevada y tiempo insuficiente puede dar pie a una distribución indeseable de calor en la zona de soldadura produciendo una fusión excesiva de la superficie y un rápido deterioro de los electrodos.

Los materiales soldados constituyen una serie de resistencias, en donde la resistencia total del trayecto afecta la magnitud de la corriente. Hay que hacer que la suma de las resistencias sea pequeña, para lo cual todos los sumandos que la integren han de serlo también. Para lograr esto hay que ejercer una presión sobre las superficies a soldar las cuales deben estar limpias. A continuación se ilustran las resistencias presentes durante el proceso de soldadura.

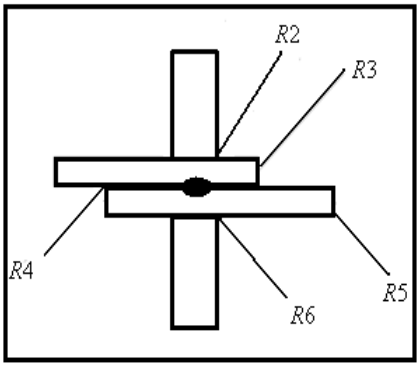


Figura 2.6 *Resistencias al paso de la corriente.* ***(Horwitz, 1990)***

La resistencia que se obtiene es casi inversamente proporcional a la presión de contacto en $R2$, $R6$ y $R4$. Las resistencias $R3$ y $R5$ dependen del material a soldar, por lo que quedan como parámetros de soldadura la intensidad (I), el tiempo (t) y la presión de soldadura para obtener la cantidad total de calor (Q). La mayor resistencia que se encuentra en la soldadura es la $R4$, la cual también puede variarse mediante la presión. Variando estos parámetros de soldadura se puede influir en la calidad de la unión obtenida.

2.2.3.4.2.2 Disipación de Calor. [12]

Durante la soldadura hay pérdida de calor por conducción hacia el metal base adyacente y los electrodos. Esta disipación de calor ocurre a 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 fases:

Fase 1: Durante la aplicación de la corriente, aquí el grado de disipación depende de la composición y la masa de las piezas de trabajo, del tiempo de soldadura y de los mecanismos de enfriamiento externos.

Fase 2: Después de interrumpida la corriente, si aun los electrodos permanecen en contacto con el material de trabajo se enfriará rápidamente la pepita de soldadura.

La velocidad de disipación del calor hacia el metal base circundante disminuye al aumentar el tiempo de soldadura porque se habrá calentado un volumen más grande el metal base. Esto reduce el gradiente de temperatura entre el metal base y la pepita de soldadura.

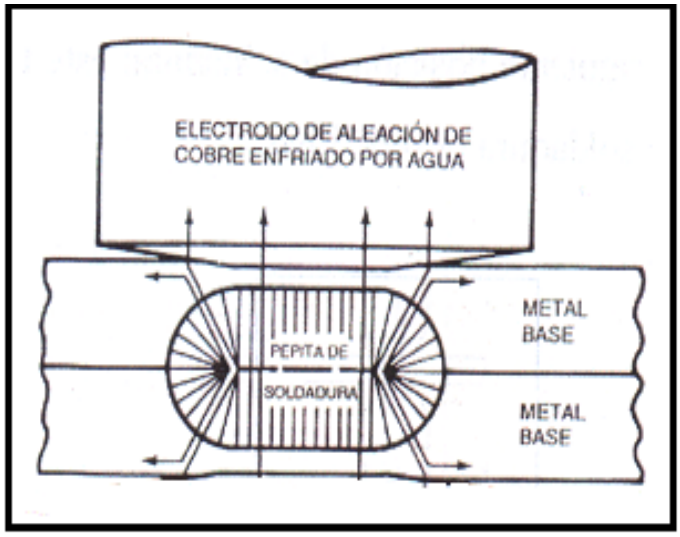


Figura 2.7 *Disipación de calor hacia el metal base y los electrodos.* ***(O`Brien, 1996)***

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 pueden ser por radiación y 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.

2.2.3.4.2.3 Balance Calorífico.

El equilibrio del calor ocurre cuando las profundidades de penetración en ambas piezas de trabajo son aproximadamente iguales. La mayor parte de las aplicaciones de soldaduras por electropunto se limitan a soldar espesores iguales del mismo metal, con electrodo de la misma aleación, forma y tamaño. En estos casos el balance calorífico es simétrico. Sin embargo, en muchas aplicaciones el calor generado en las piezas no está equilibrado.

El balance calorífico puede ser afectado por lo siguiente:

- La conductividad eléctrica y térmica relativa de los metales a unir.
- La geometría relativa de las piezas en la unión.
- La conductividad eléctrica y térmica de los electrodos.
- La geometría de los electrodos.

El calentamiento será desequilibrado cuando la composición, el espesor, o ambos parámetros sean significativamente distintos en las piezas a soldar.

2.2.3.4.3 Variables que influyen en el proceso. [6]

Existen seis variables que son fundamentales en el proceso de soldadura por electropunto, a continuación se reseña la influencia de cada una de ellas.

2.2.3.4.3.1 Influencia del Tiempo.

En la soldadura por electropuntos la velocidad de generación de calor debe ser tal que se produzcan soldaduras con la resistencia mecánica adecuada sin un calentamiento excesivo ni deterioro precoz de los electrodos. Un tiempo de soldadura demasiado largo surtirá el mismo efecto sobre el metal base y los electrodos, que el de un

amperaje excesivo. Además la zona térmicamente afectada de la soldadura se extenderá a mayor distancia en el metal base.

El calor se transfiere por conducción hacia el metal base circundante, mientras que en los electrodos se pierde una cantidad muy pequeña por radiación. Durante una operación de soldadura por electropuntos se requiere un cierto tiempo mínimo para alcanzar la temperatura de fusión con una densidad de corriente adecuada. Si se sigue aplicando corriente, la temperatura en la pepita de soldadura en formación excederá por mucho la temperatura de fusión y posiblemente la presión interna expulse el metal fundido de la soldadura.

Los tiempos normalmente van desde medio ciclo (1/120s) para láminas muy delgadas hasta varios segundos para placas gruesas. A continuación se muestra el ciclo de operación de la soldadura por electropuntos.

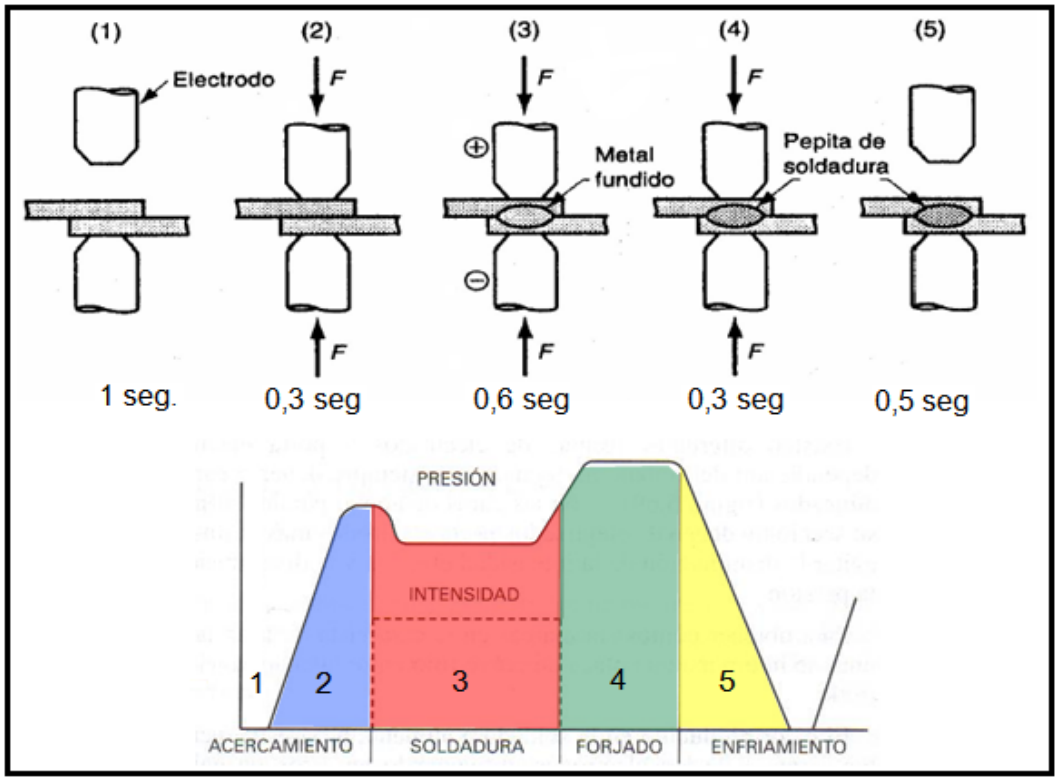


Figura 2.8 *Ciclo de Operación de la Soldadura por Electropuntos.* ***(Horwitz, 1990)***

Donde:

(1) Colocación de las chapas: es decir, de los electrodos sobre las chapas.

(2) Tiempo de bajada: es el tiempo que transcurre desde que se inicia la operación de acercamiento de los electrodos hasta que comienza el paso de la corriente. En este tiempo se consiguen aproximar las chapas que se van a unir para obtener una buena conductividad.

(3) Tiempo de Soldadura: es el tiempo durante el cual está pasando la corriente eléctrica.

(4) Tiempo de forjado o mantenimiento: es el tiempo transcurrido entre el corte de la corriente y el levantamiento de los electrodos.

(5) Tiempo de enfriamiento: es el tiempo en que desaparece la presión y se separan los electrodos.

A continuación se muestra una gráfica donde se ilustra el comportamiento del tiempo y la corriente durante el ciclo de operación de la soldadura por electropuntos.

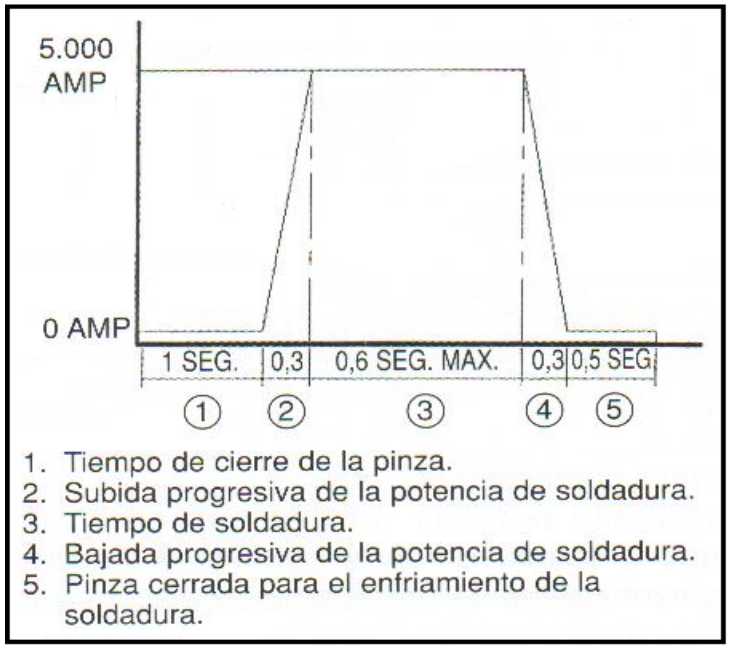


Figura 2.9 *Gráfica Tiempo vs Corriente del ciclo de operación de la Soldadura por Electropuntos.* ***(Horwitz, 1990)***

2.2.3.4.3.2 Influencia de la Corriente.

La corriente tiene un efecto grande sobre la generación de calor que la resistencia o que el tiempo, por lo que es una variable importante que debe controlarse. Dos factores que causan variaciones en la corriente de soldadura son las fluctuaciones en el voltaje de línea y las variaciones en la impedancia del circuito secundario en las máquinas de corriente alterna. Las máquinas de corriente continua (CC) no son afectadas significativamente por la presencia de metales magnéticos en el lazo secundario ni por la geometría del circuito.

Además de las variaciones en la magnitud de la corriente de soldadura, la densidad de corriente puede variar en las caras internas de soldado. Esto puede deberse a la variación de la corriente por soldaduras anteriores y puntos de contacto distintos del punto de soldadura. Un aumento en el área de la cara de los electrodos, reducirá la densidad de corriente y el calor de soldadura y esto puede causar una reducción significativa de la resistencia mecánica de la soldadura.

Una densidad de corriente excesiva causará la expulsión de metal semi-fundido produciendo huecos internos, agrietamiento en la superficie de la soldadura y menor resistencia mecánica.

2.2.3.4.3.3 Influencia de la Presión.

Se considera que la presión resultante de la fuerza dinámica neta aplicada por los electrodos contra las láminas de trabajo es la que afecta la resistencia de contacto, por lo tanto 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. Si todos los demás factores son iguales, al aumentar la fuerza de los electrodos o la presión de soldadura, el amperaje o el tiempo de soldadura también deberán aumentar para incrementar el calor y compensar la reducción en la resistencia eléctrica.

El cierre del circuito eléctrico a través de los electrodos y el material de trabajo se garantizan mediante la aplicación de una fuerza a los electrodos. Esta fuerza se produce a través de dispositivos hidráulicos, neumáticos, magnéticos o mecánicos. La presión ejercida en la interfaz depende del área de las caras de los electrodos que están en contacto con las piezas de trabajo.

La función de esta fuerza es establecer un contacto íntimo entre las diversas caras internas, reducir la resistencia de contacto inicial en las caras internas, suprimir la expulsión de metal semi-fundido de la unión y consolidar el punto de soldadura.

Durante el ciclo de operación de la soldadura por electropunto (Ver ***Fig. 2.8, Pág 22***), la fuerza puede aplicarse de la siguiente manera:

(1) Una fuerza de soldadura constante.
(2) Fuerzas de pre comprensión y soldadura: un nivel inicial alto para reducir la resistencia de contacto inicial y poner las piezas en contacto íntimo, seguido de un nivel menor para soldar.
(3) Fuerzas de pre comprensión, soldadura y forjado: los dos primeros niveles son como los descritos en el ítem anterior, seguidos por una fuerza de forjado cerca del final del tiempo de soldadura para reducir la porosidad y grietas en la pepita de soldadura.
(4) Fuerzas de soldadura y forjado: un nivel de presión media para soldar seguido por una fuerza de forjado cerca del final del tiempo de soldadura para lo descrito anteriormente.

También existe el caso cuando la soldadura se realiza a presión constante, el valor de ésta debe ser el producido por una fuerza de compresión calculada a través de la siguiente ecuación ***(De Heredia, 1959)*:**

$$F = 1030{,}05.e \qquad \text{(Ec. 2.2)}$$

Esta ecuación es cierta nada más que dentro de una estrecha gama de espesores y la misma varía con estos. Como fórmulas más exactas se pueden dar las siguientes:

- Piezas de acero con superficie de alta calidad superficial.

$$F = 22{,}563.e^{3{,}2} + 392{,}4 \qquad \text{(Ec. 2.3)}$$

Esta ecuación es válida para la unión de dos espesores iguales o diferentes y para cualquier valor de e, al menos igual a 1mm.

- Piezas de acero con superficie con calidad superficial media.

$$F = 58{,}86.e^{3} + 49 \qquad \text{(Ec. 2.4)}$$

- Piezas de acero con superficie de contacto con baja calidad superficial.

$$F = 392{,}4.e^{2{,}3} + 1569{,}6 \qquad \text{(Ec. 2.5)}$$

Para las ecuaciones ***2.2, 2.3, 2.4 y 2.5***:

***F*:** Fuerza (Newton).

***e*:** espesor total a soldar (milímetros).

2.2.3.4.3.4 Influencia de los Electrodos.

Los electrodos desempeñan un papel vital en la generación de calor porque conducen la corriente de soldadura al material de trabajo. En el caso de la soldadura por electropunto, el área de contacto de los electrodos controla en gran medida la densidad de la corriente de soldadura y el tamaño de la soldadura resultante. Los electrodos deben tener buena conductividad térmica y a su vez la resistencia mecánica y dureza adecuadas para resistir los esfuerzos que generan la aplicación repetida de una fuerza de compresión elevada.

La calidad de la soldadura disminuye una vez que las puntas de los electrodos tienen un porcentaje considerable de desgaste y deformación, es por ello que es preciso rectificar o reemplazar los electrodos cada cierto tiempo con el fin de mantener una generación de calor adecuada para obtener soldaduras con propiedades satisfactorias.

Cuando los electrodos se calientan mucho se pueden formar marcas de calor sobre la superficie del metal. Para eliminar estos problemas los electrodos son enfriados con agua, el agua fluye por una cavidad interna de ellos con el objeto de disipar el calor.

La soldadura por electropunto dependen del grado de conductividad eléctrica del metal a ser soldado, para incrementar la conductividad los electrodos están sujetados por dos brazos que funcionan como prensas y que someten a los electrodos a una gran presión uno en contra del otro, las laminas metálicas que van a ser soldadas se colocan entre los electrodos que presionan fuertemente asegurando el contacto y una corriente de bajo voltaje y alto amperaje.

En casi todas las aplicaciones de soldadura por electropuntos se emplean porta electrodos o adaptadores para la unión no permanente de los electrodos en las máquinas.

La función de los electrodos es:

1. Fijar o colocar las piezas con la alineación correcta.
2. Eliminar calor de la soldadura o la parte adyacente.
3. Conducir la corriente de soldadura a las piezas.
4. Transmitir una fuerza a la unión.

El electrodo deberá tener la masa suficiente para transmitir la fuerza y corriente de soldadura requeridas y proporcionar un enfriamiento adecuado de ser necesario. Las aplicaciones de alto volumen de producción a veces trabajan con secciones gruesas que requieren electrodos de diseño especial.

2.2.3.4.3.4.1 Características.

Un electrodo de soldadura por electropuntos tiene tres características principales:

a. ***La cara:*** es la porción que hace contacto con el trabajo. En su diseño influyen la composición, espesor y geometría de las piezas por soldar. A su vez la

geometría de la cara del electrodo determina las densidades de corriente y de presión en la zona de soldadura.

A continuación se ilustran los diseños de cara estándar para los electrodos y también los contornos de radio y domo de uso más común. La cara puede ser concéntrica respecto al eje del electrodo, excéntrica o acodada, o formando un ángulo con el eje.

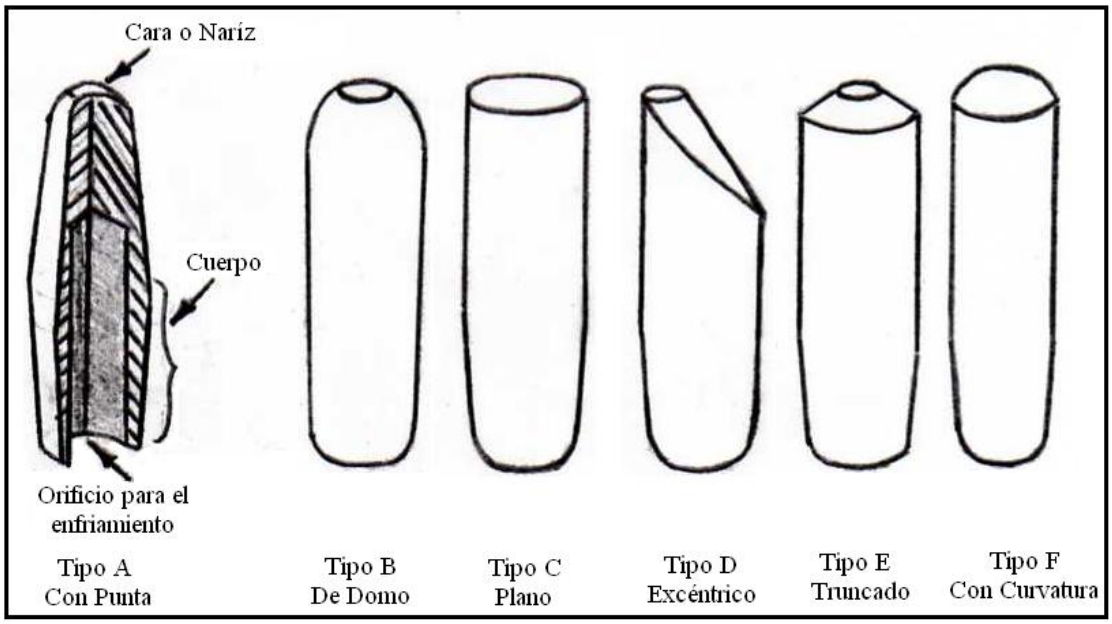


Figura 2.10 *Diseño de cara estándar de los electrodos y sus partes.* ***(Horwitz, 1990)***

b. ***El Vástago:*** debe tener un área de sección transversal suficiente para soportar la fuerza de electrodos y transportar la corriente de soldadura. El vástago puede ser recto o pueden ser doblados.

c. **El Extremo o Conexión:** El método de conexión del extremo del vástago al portaelectrodos por lo general utiliza uno de estos tres tipos de conexión: ahusado, roscado o de vástago recto.

2.2.3.4.3.4.2 Mecanismo de Enfriamiento.

Los electrodos para la soldadura por electropuntos deberán tener un conducto de enfriamiento interno que llegue cerca de la cara, este conducto deberá diseñarse de modo que en él quepa un tubo de entrada de agua y el agua pueda fluir hacia afuera del

tubo, el cual deberá colocarse de modo que dirija el agua de enfriamiento contra la parte inferior de la punta del electrodo. Si el enfriamiento interno no resulta práctico, conviene considerar el enfriamiento externo de los electrodos por inmersión, inundación o espirales de enfriamientos.

2.2.3.4.3.4.3 Materiales.

Los materiales usados para los electrodos en la soldadura por electropunto consisten en dos grupos principales:

Grupo 1.

- Aleaciones basadas en cobre. Los electrodos son usados de cobre porque comparado con la mayoría de los metales, el cobre tiene una resistencia eléctrica más baja y una conductividad térmica más alta, esto asegura que el calor será generado en la pieza de trabajo y no en los electrodos.
- Compuestos de metales refractarios, tales como combinaciones de cobre y tungsteno.

Grupo 2.

- El segundo grupo tiene una mayor resistencia al desgaste. Igual que en la mayoría de los procesos de manufactura, las herramientas para la soldadura de puntos se desgastan gradualmente con el uso.

2.2.3.4.3.4.4 Mantenimiento.

Los electrodos para soldadura de puntos tienen un área de cara específica que hace contacto con el trabajo y con el uso esta área crecerá por el achatamiento y con ellos se reducirán las densidades de corriente y de presión.

No es posible predecir cuantas soldaduras pueden hacerse con una configuración dada antes de que se haga necesario rectificar los electrodos, una revisión periódica de la calidad de la soldadura y de la forma de los electrodos ayudará a determinar el número de soldaduras o ensambles que pueden hacerse antes de rectificar. Luego se

deberá establecer un programa de rectificación de electrodos como mantenimiento preventivo para mantener la calidad de las soldaduras.

Nunca debe usarse una lima para rectificar los electrodos en la máquina por que las caras de los electrodos pueden quedar irregulares tanto en su tamaño como en su contorno.

2.2.3.4.3.5 Influencia de la condición de la superficie.

A veces una de las variables que tiene una gran influencia pero es ignorada es el estado de la superficie del metal. El polvo, contaminantes y óxidos pueden alearse con la punta del electrodo y quemar o agrietar la pieza.

La capa superficial resultante de un tratamiento con fosfato, cinc o aluminio, aumenta grandemente la dificultad para realizar buenas soldaduras. El acero galvanizado requiere mayores esfuerzos, corrientes y tiempos de soldeo más prolongados que un acero al carbono de iguales dimensiones.

El acabado y condiciones de limpieza en que se encuentran las superficies del material a soldar influye en la generación de calor, los óxidos, impurezas, aceites y otras sustancias ajenas en las superficies afectan la resistencia de contacto. Las mejores soldaduras se obtienen cuando las superficies están limpias, allí se logran las propiedades mecánicas más uniformes y con los mejores acabados finales.

La existencia de una capa no uniforme de óxido, incrustaciones u otras sustancias ajenas en la superficie de las piezas a soldar produce variaciones en la resistencia de contacto y trae como consecuencia inconsistencias en la generación de calor, en muchos casos se observa como las incrustaciones existentes en el metal de trabajo pasan a las caras del electrodo contribuyendo con su deterioro por desgaste y deformación.

2.2.3.4.3.6 Influencia de la Composición del Metal.

La composición de un metal determina su calor específico, temperatura de fusión, calor latente de fusión y conductividad térmica. Estas propiedades controlan la cantidad de calor requerida para fundir el metal y producir una soldadura.

2.2.3.4.4 Técnica de la Soldadura por Electropunto. [9]

Los puntos de soldadura deben hacerse en ciclos de corriente relativamente pequeños por varias razones:

- No debe permitirse que el calor se difunda fuera del área del punto.
- El metal se reblandece y el electrodo puede hacer un hoyo en la pieza si el tiempo es excesivo.
- La resistencia eléctrica cambia constantemente con el calor de la pieza.
- Los efectos del tratamiento térmico deben ser mínimos: una soldadura rápida en un acero inoxidable austenítico producirá una precipitación mínima de carbonos.

La densidad de corriente en la pieza se regula por el tamaño de la punta del electrodo. A continuación se muestran los diámetros de puntas normalizados:

Tabla 2.1 *Diámetro de la Cara Normalizado de los Electrodos.* ***(Horwitz, 1990)***

Diámetro de la cara del electrodo	
(Pulg.)	**(mm)**
3/16	4,762
1/4	6,35
3/8	9,525
1/2	12,7
5/8	15,875
3/4	19,05
7/8	22,225

La densidad de corriente en la punta propiamente dicha, normalmente no es mayor de 70000 A/pulg^2 (110 A/mm^2) para evitar el deterioro de la punta. Cuando la pieza y el electrodo tienen la misma resistencia eléctrica, tienden a pegarse y si se tienen que soldar dos piezas de diferentes espesores se originan problemas por efecto del calentamiento. La chapa más gruesa tiene más resistencia y recibirá más calor, esto puede corregirse utilizando una punta de diámetro más pequeño en la chapa más delgada para aumentar la densidad de corriente y asegurar una distribución más uniforme del calor. Un problema similar surge cuando se sueldan dos metales de diferentes conductividades eléctricas. El material de más conductividad debe ser de mayor espesor para lograr el equilibrio térmico.

Teóricamente la penetración de una soldadura por electropuntos sólo necesita ser de unas milésimas de centímetro para asegurar la unión de dos chapas. Sin embargo, los puntos de soldadura hechos con esta penetración mínima no son uniformes en diámetro ni en resistencia, por lo que se requiere normalmente una penetración mínima de un 20 % del espesor de la chapa. La penetración completa produce una soldadura resistente que es de mal aspecto debido al hundimiento del electrodo en la pieza y es más perjudicial para la punta. La penetración máxima debe mantenerse en el 80% de espesor de la pieza. El tiempo de mantenimiento en la secuencia de soldeo tiene varias funciones, durante este las chapas se mantienen en contacto por la presión del electrodo hasta que la zona fundida alcanza suficiente dureza y resistencia para realizar por sí misma esta función.

2.2.4 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 láminas que han sido unidas previamente con soldadura por electropunto, 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 lámina 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 tamaño de pepita de soldadura requerido según el espesor de la láminas de trabajo, mientras más similar sean dichos diámetros mejor habrá sido la soldadura. A continuación se ilustra las etapas del ensayo destructivo peel.

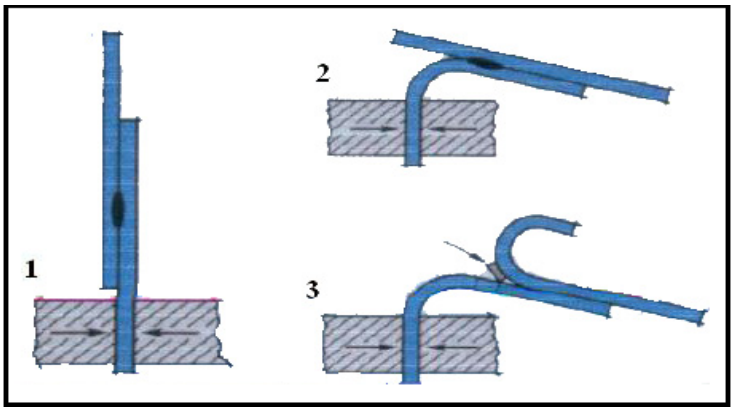


Figura 2.11 *Etapas del Ensayo Destructivo Peel.* ***(Norma ISO 10447:2007)***

2.2.4.1 Recomendaciones para el Ensayo Destructivo Peel.

Es importante efectuar pruebas visuales y de resistencia para asegurarse que los puntos de soldadura son consistentes y su calidad es aceptable para producción. Se recomienda hacer estas pruebas en cada una de las siguientes ocasiones:

- En cada inicio y fin de ciclo.
- Inmediatamente antes y después que se reemplaza un electrodo.
- Cada vez que alguno de los servicios de la máquina se ha alterado o alguno de sus sub-ensambles ha sido cambiado.
- Inmediatamente después de cambiar cualquier elemento o material relacionado suministro de energía eléctrica.

2.2.5 Ley de Hooke en Resortes.

Si un cuerpo después de ser deformado por una fuerza, vuelve a su forma o tamaño original cuando deja de actuar la fuerza deformadora se dice que es un cuerpo elástico. Las fuerzas elásticas reaccionan contra la fuerza deformadora para mantener estable la estructura molecular del sólido. Los resortes son un modelo bastante interesante en la interpretación de la teoría de la elasticidad.

En la Física no sólo hay que observar y describir los fenómenos naturales, aplicaciones tecnológicas o propiedades de los cuerpos sino que hay explicarlos mediante leyes Físicas. Esa ley indica la relación entre las magnitudes que intervienen en el fenómeno físico mediante un análisis cualitativo y cuantitativo. Con la valiosa ayuda de las Matemáticas se realiza la formulación y se expresa mediante ecuaciones, entregando como resultado una Ley.

Por ejemplo, la Ley de Hooke establece que el límite de la tensión elástica de un cuerpo es directamente proporcional a la fuerza. Mediante un análisis e interpretación de esta ley se estudia aspectos relacionados con la ley de fuerzas, trabajo, fuerzas conservativas y energía de resortes. Hooke estudió los efectos producidos por las fuerzas de tensión, observó que había un aumento de la longitud del cuerpo que era proporcional a la fuerza aplicada, esto se puede apreciar de forma más clara a través de la siguiente ecuación:

$$F = -K.X \qquad \text{(Ec. 2.6)}$$

Donde:

***F*:** Es la fuerza resistente del sólido (Newton)

***K*:** Es la constante de proporcionalidad (Newton/milímetros)

***X*:** Es la deformación, esto es lo que se ha comprimido o estirado a partir del estado que no tiene deformación (milímetros)

***(-)*:** El signo negativo en la ecuación se debe a la fuerza restauradora que tiene sentido contrario al desplazamiento.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

FACULTAD DE INGENIERIA

3.1 Tipo de investigación.

El presente proyecto de investigación es considerado dentro del campo de las ciencias aplicadas, ya que amplía el conocimiento existente en el área de la soldadura por electropuntos, siendo aplicable dentro de los procesos de fabricación. También es una investigación documental de tipo bibliográfica, ya que se apoyó en consultas de libros e investigaciones anteriores. Además se trató de una investigación tipo experimental, debido a que se llevaron a cabo ensayos de soldadura a partir de los cuales se extrajo información que fue observada y analizada para el cumplimiento de los objetivos planteados.

3.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

a. ***Registro histórico:*** Consiste en utilizar y analizar información de tipo experimental y bibliográfica existente relacionada con la soldadura por electropuntos, dando la orientación necesaria para el manejo de la información generada por los ensayos a realizados.

b. ***Observación directa:*** Permite obtener datos mediante una inspección visual de los distintos ensayos para determinar la existencia de soldadura y calidad de la misma, así como también las variaciones de los parámetros que rigen el proceso de soldadura como lo son el tiempo de unión, la intensidad de corriente y la fuerza aplicada a los electrodos entre otros.

3.3 Recursos utilizados.

Para la realización de los ensayos se dispuso de las instalaciones del Laboratorio de Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

3.3.1 Materiales.

a. Láminas de acero estructural de bajo carbono AISI-1018 de calidad superficial ASTM-336, de dimensiones iniciales:

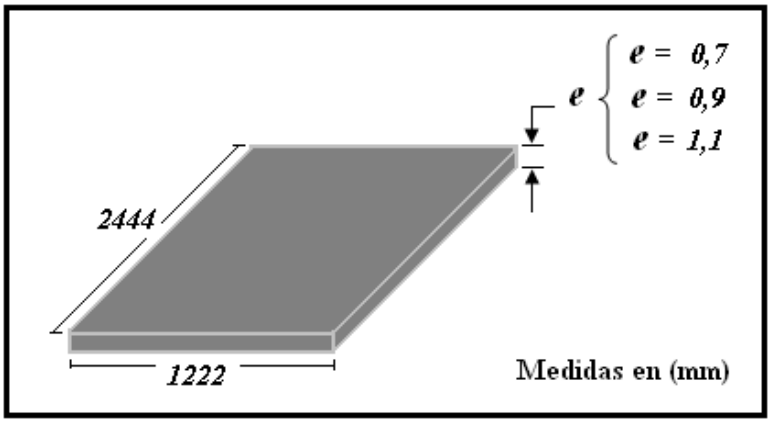


Figura 3.1 *Dimensiones iniciales de láminas de acero estructural de bajo carbono AISI-1018 de calidad superficial ASTM-336.* ***(Fuente propia, 2009)***

b. Láminas de aluminio 3003*h*14, de dimensiones iniciales:

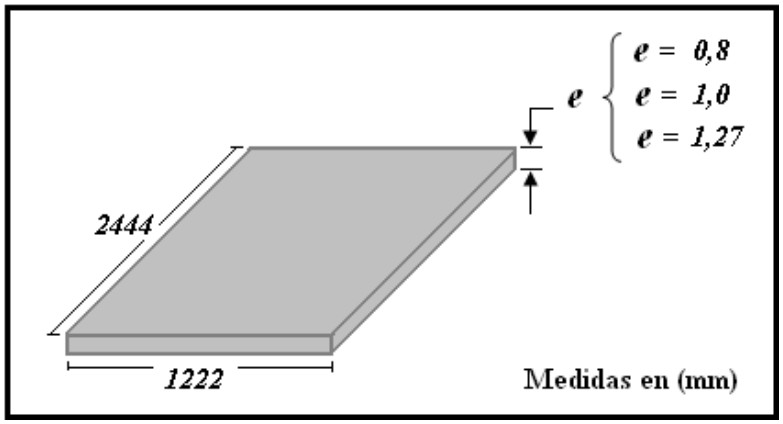


Figura 3.2 *Dimensiones iniciales de láminas de aluminio 3003h14.* ***(Fuente propia, 2009)***

c. Electrodos de cobre electrolítico, los cuales fueron fabricados tomando en cuenta las dimensiones estándares para la aplicación. El electrodo seleccionado para esta aplicación es el de punta tipo Domo.

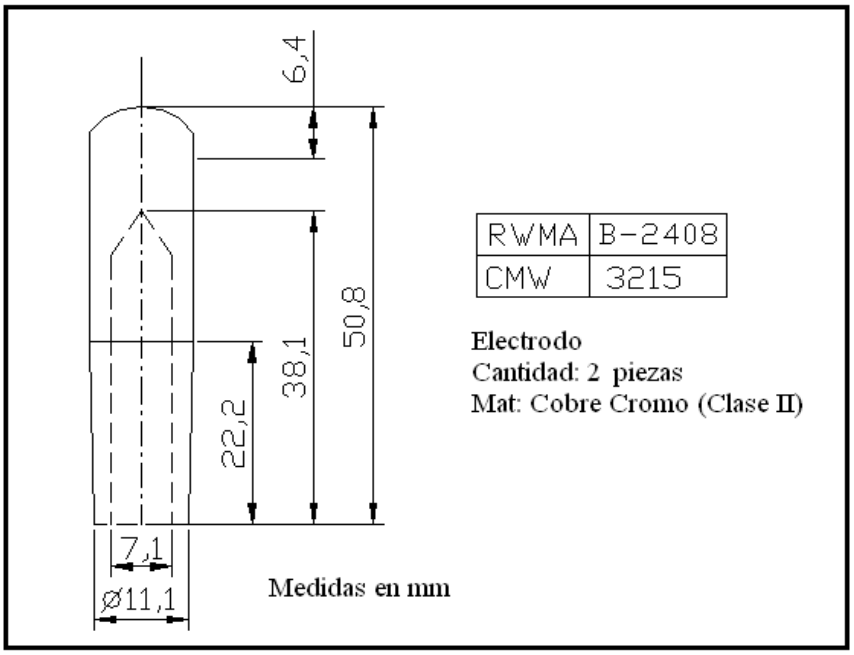


Figura 3.3 *Plano del electrodo punta tipo Domo.* ***(Tuffaloy Resistance Welding Products, 1998)***

Figura 3.4 *Electrodos de cobre electrolítico punta tipo Domo.*
(Fuente propia, 2009)

d. Bocinas adaptadoras, permiten adaptar los electrodos a la máquina de soldar.

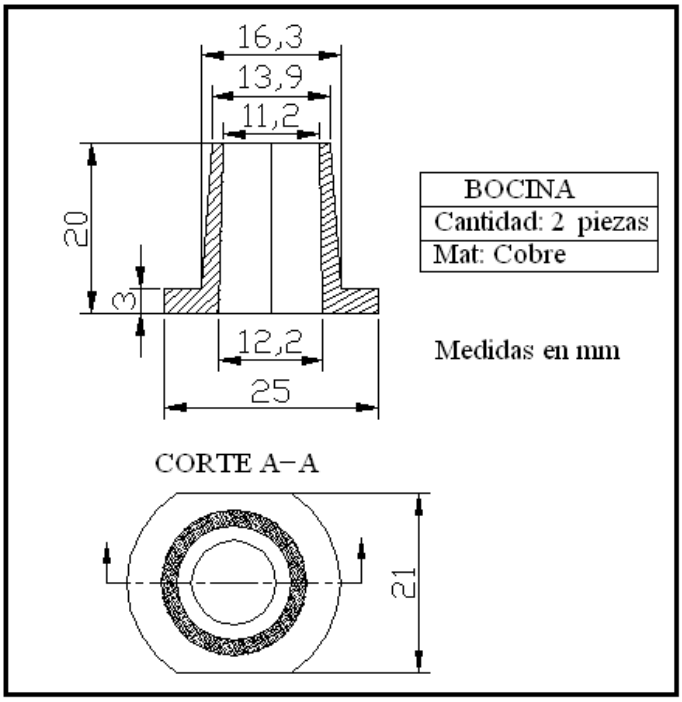


Figura 3.5 *Plano de la bocina adaptadora para los electrodos.* ***(Tuffaloy Resistance Welding Products, 1998)***

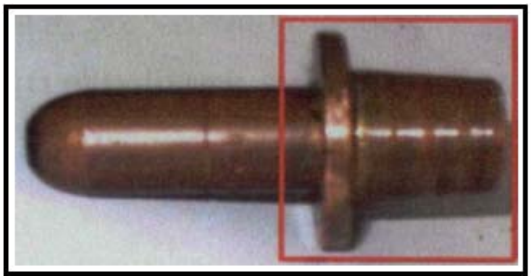


Figura 3.6 *Bocina adaptadora para los electrodos.* ***(Fuente propia, 2009)***

3.3.2 Equipos e instrumentos utilizados.

a. Máquina de soldadura por Electropuntos, ubicada en el Laboratorio de Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

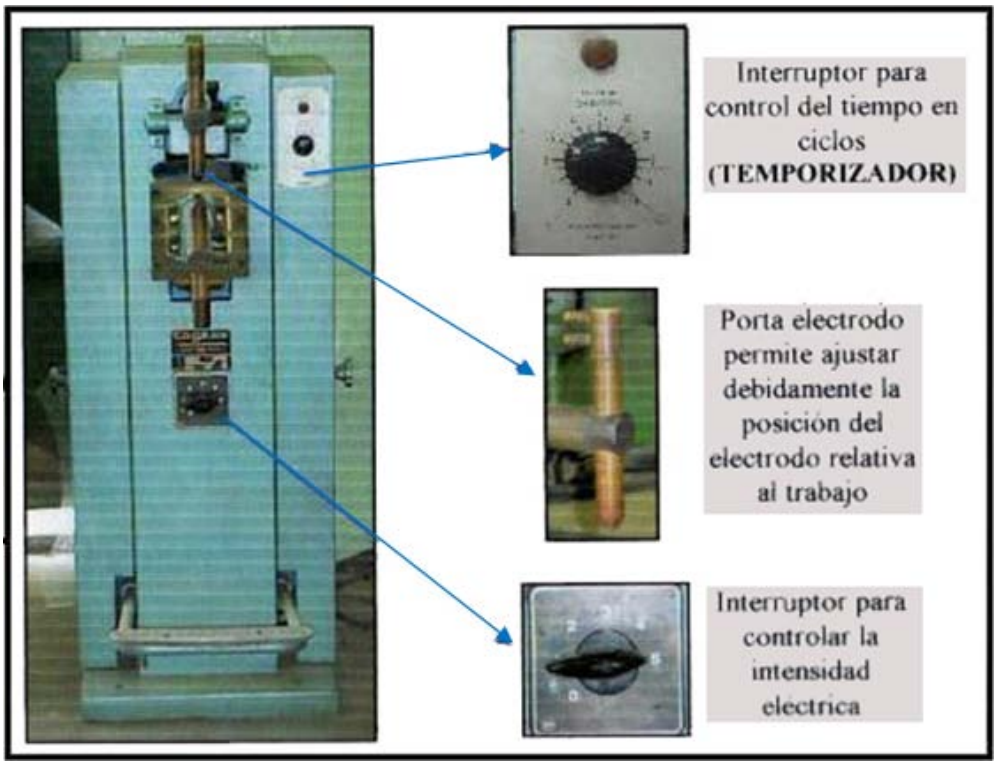


Figura 3.7 *Máquina de Soldadura por Electropuntos.* ***(Fuente propia, 2009)***

b. Sistema de enfriamiento, se trata de un flujo de agua que impulsado por una bomba centrífuga pasa a través de una perforación axial que tiene el electrodo, luego del enfriamiento el agua se dirige a un serpentín donde pierde calor por convección forzada para finalmente regresar al depósito que la contiene.

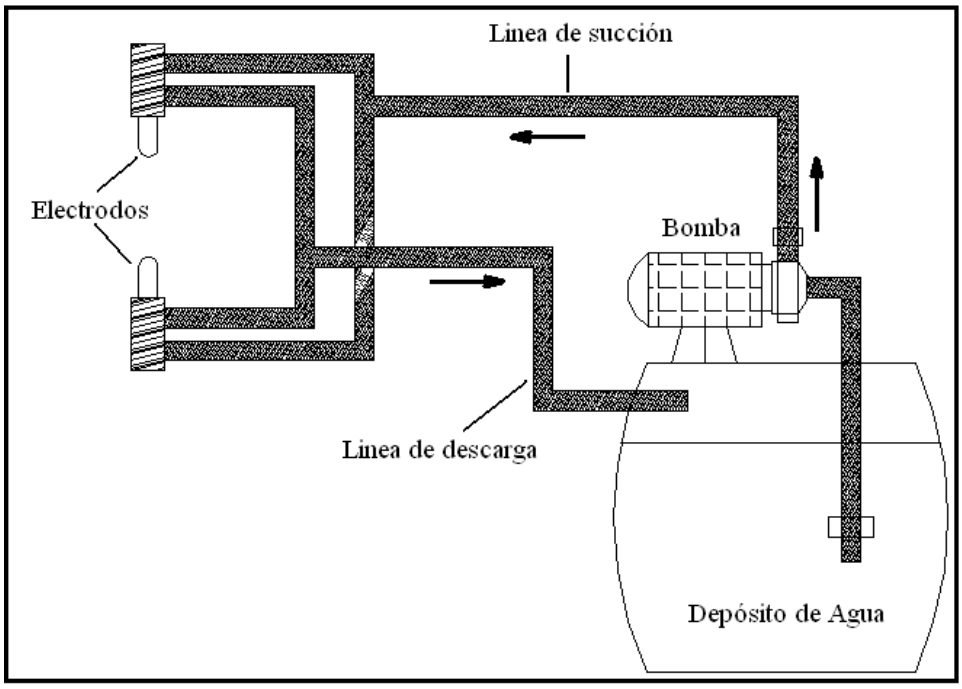


Figura 3.8 *Sistema de enfriamiento.* ***(Fuente propia, 2009)***

c. Compresor, equipo encargado de proporcionar el aire al sistema neumático. Está ubicado en el Laboratorio de Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

Figura 3.9 *Compresor.* ***(Fuente propia, 2009)***

d. Cizalladora, permitió cortar las láminas de su tamaño inicial a las dimensiones requeridas para realizar las pruebas pilotos y los ensayos. Está ubicada en el Laboratorio de Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

Figura 3.10 *Cizalladora.* ***(Fuente propia, 2009)***

e. Vernier digital,

Figura 3.11 *Vernier Digital.* ***(Fuente propia, 2009)***

Marca: Mitutoyo. ***Rango:*** (0-150) mm. ***Apreciación:*** 0,01 mm.

3.4 Técnicas de análisis de datos.

Inicialmente se empleo la evaluación de los puntos de soldadura y la calidad superficial de la misma durante los ensayos, luego la interpretación de los datos recopilados para la elaboración de curvas donde se refleje el comportamiento de la fuerza aplicada a los electrodos en función del espesor de la lámina y finalmente determinar la influencia que ésta tiene sobre la soldadura.

3.5 Metodología aplicada.

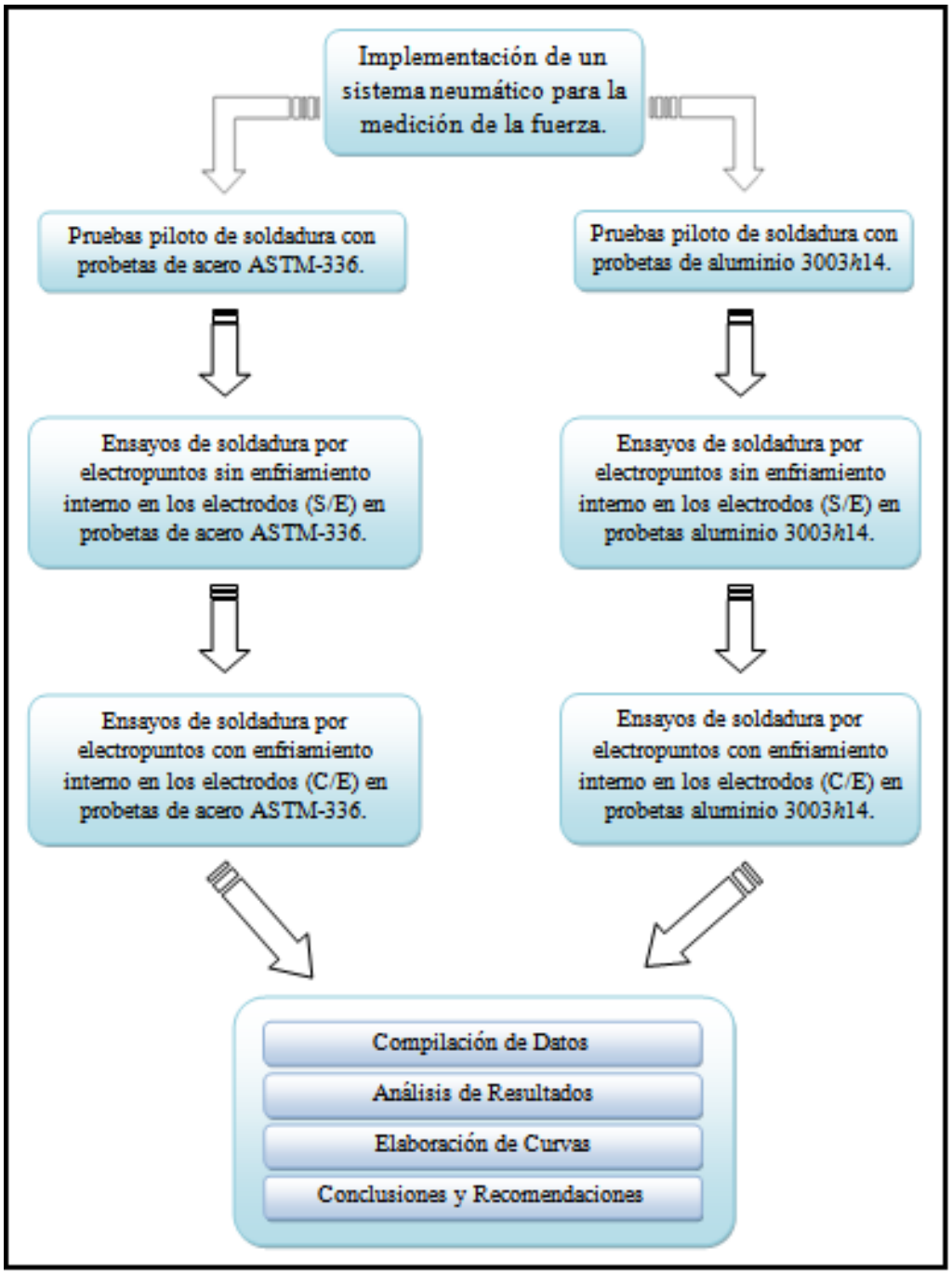


Figura 3.12 *Flujograma de actividades.*

El procedimiento experimental se realizó en el Laboratorio de Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo. En el mismo se llevaron a cabo las labores de mantenimiento necesarias para colocar en buenas condiciones el equipo de soldadura por resistencia eléctrica que se utilizó, así como también la implementación de un sistema neumático capaz de medir y controlar la fuerza aplicada a los electrodos.

Para la implementación del sistema neumático y la obtención de los parámetros más adecuados con los que se operó el equipo de soldadura para soldar láminas de acero estructural de bajo carbono cuyos espesores son e_1 = 0,7 mm; e_2 = 0,9 mm y e_3 = 1,1 mm y láminas de aluminio de e_1 = 0,8 mm; e_2 = 1 mm y e_3 = 1,27 mm se llevo a cabo el siguiente procedimiento:

3.5.1 Implementación de un sistema neumático para la medición de la fuerza.

Mediante el sistema neumático podremos conocer y controlar el valor de la fuerza aplicada a los electrodos durante la soldadura por electropuntos, el mismo consta de un compresor quien es la fuente de alimentación encargada de proporcionar el aire que llega a una unidad de mantenimiento, cuya función es purificar y regular la presión del aire que puede ser observada en un manómetro, luego el aire expulsado de la unidad de mantenimiento viaja hacia un actuador neumático con el propósito de generar la fuerza que aplican los electrodos sobre el material a soldar, el mismo es comandado por una válvula neumática de accionamiento manual la cual manipula la extensión y retracción del vástago.

3.5.2 Pruebas piloto de soldadura por electropuntos en función de la intensidad de corriente vs tiempo de unión, para el acero y el aluminio.

Mediante estas pruebas se determinaron los parámetros más adecuados (intensidad de corriente eléctrica y tiempo de unión) del equipo de soldadura por electropuntos. Estas pruebas se llevan a cabo variando ambos parámetros hasta determinar mediante observación directa y pruebas Peel la combinación adecuada para luego realizar los ensayos.

Procedimiento:

1. Adquisición del material.

2. Corte del material para el ensayo destructivo peel.

3. Búsqueda de los parámetros (intensidad de corriente eléctrica y tiempo de unión) óptimos de operatividad de la máquina de soldadura.

4. Realización de un punto de soldadura a cada par de lámina (probeta) para las distintas magnitudes de intensidad de corriente y tiempo de unión preseleccionadas.

5. Realización del ensayo destructivo Peel (Inspección visual de los puntos de soldadura verificando la existencia, calidad superficial, resistencia a la tracción y medición de los diámetros del punto de soldadura).

6. Selección de los parámetros a utilizar durante los ensayos.

3.5.3 Ensayos de soldadura por electropuntos en función del espesor de lámina y la fuerza aplicada a los electrodos, para el acero y el aluminio (sin enfriamiento interno en los electrodos).

Una vez determinadas las magnitudes de intensidad de corriente y tiempo de unión, a través de ensayos donde variando el espesor de lámina y la presión de suministro al sistema neumático (fuerza que se transmite a los electrodos), se lleva a cabo la evaluación de la influencia que tiene la fuerza aplicada a los electrodos en la calidad de la soldadura por electropuntos.

Procedimiento:

1. Corte del material para realizar el ensayo.

2. Realizar puntos de soldadura bajo los parámetros más adecuados de cada espesor.

3. Medición de los diámetros de las huellas dejada por los electrodos para determinar una buena soldadura.

4. Construcción de gráficas que ilustren el comportamiento de la fuerza en función del espesor de la lámina.

5. Determinación de la ecuación de la curva.

3.5.4 Ensayos de soldadura por electropuntos en función del espesor de lámina y la fuerza aplicada a los electrodos, para el acero y el aluminio (con enfriamiento interno en los electrodos).

Con los mismos parámetros de intensidad de corriente y tiempo de unión fijados en el ensayo anterior y siguiendo la misma metodología se determinará la influencia del sistema de enfriamiento en los electrodos en la soldadura por electropuntos y ver como repercute esto en la calidad de la misma.

Procedimiento:

1. Soldar probetas bajo las mismas condiciones del ensayo anterior.

2. Medición de los diámetros de las huellas dejada por los electrodos e inspección visual de las mismas para determinar la influencia del sistema de enfriamiento sobre la calidad de la soldadura.

3. Construcción de gráficas que ilustren el comportamiento de la fuerza en función del espesor de la lámina.

4. Determinación de la ecuación de la curva.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL

FACULTAD DE INGENIERIA

Este capítulo explica detalladamente la metodología aplicada para el cumplimiento de los objetivos planteados, así como también muestra los resultados obtenidos de los ensayos realizados.

4.1 Implementación de un sistema neumático para la medición de la fuerza.

Como se ha descrito anteriormente el sistema neumático consta de varios equipos, un compresor (disponible en las instalaciones del laboratorio), una válvula neumática, un actuador neumático y una unidad de mantenimiento; los cuales fueron adquiridos en FESTO (proveedor de artículos para la automatización de sistemas neumáticos, eléctricos, etc.). A continuación se muestran los equipos que conforman dicho sistema:

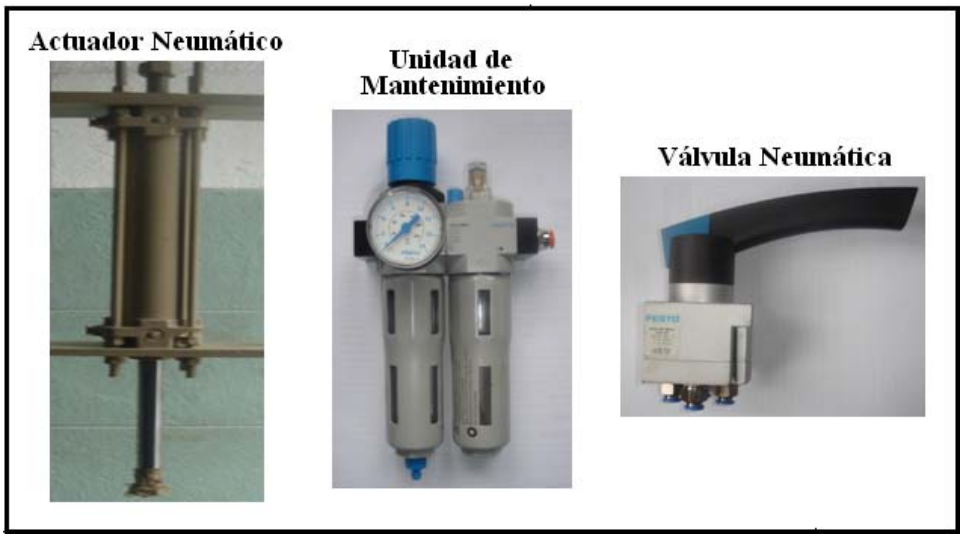


Figura 4.1 *Equipos que componen el sistema neumático.* ***(Fuente propia, 2009)***

La máquina de soldadura por electropuntos consta de dos brazos, uno fijo y otro móvil donde están fijados los portaelectrodos. La fuerza generada por el sistema neumático es transmitida a los electrodos mediante el actuador neumático, éste a través del vástago hace contacto con la parte superior del portaelectrodo que está fijado al brazo móvil para así lograr la unión del electrodo con el material a soldar. A continuación se ilustra mediante un dibujo lo descrito anteriormente.

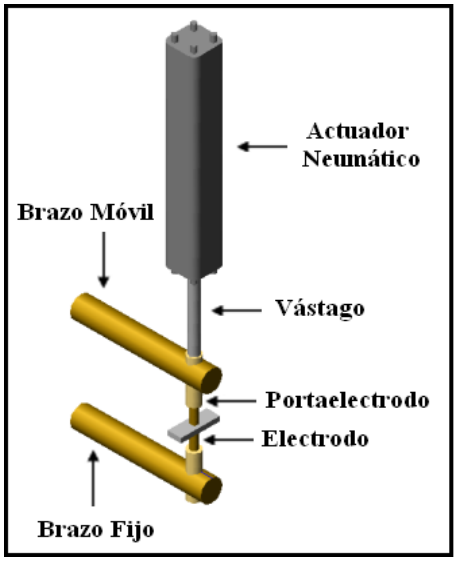


Figura 4.2 *Esquema para transmitir la fuerza a los electrodos.*
(Fuente propia, 2009)

Para adaptar el actuador neumático a la posición deseada fue necesario construir una mesa. Con el fin de alcanzar éste objetivo se realizo lo siguiente:

1. Diseño de la mesa, se realizó tomando en cuenta las dimensiones del actuador neumático y de la máquina de soldadura por electropuntos.

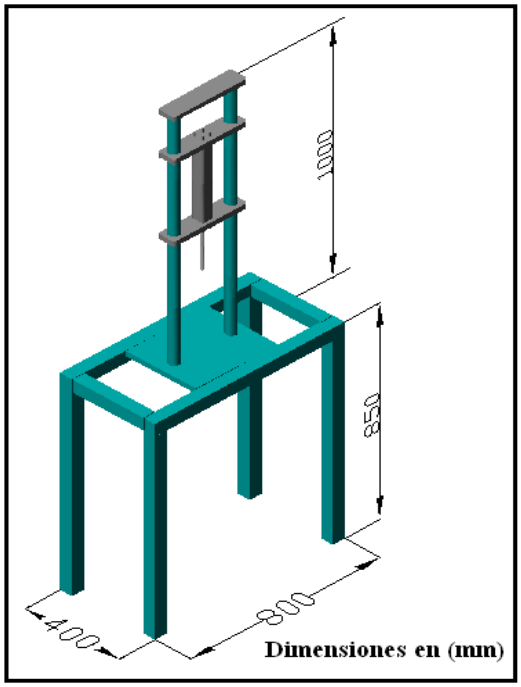


Figura 4.3 *Diseño de la mesa para la adaptación del actuador neumático.*
(Fuente propia, 2009)

2. Construcción de la mesa, se realizó según las especificaciones del diseño. Para esto se utilizaron los siguientes equipos y herramientas: esmeril, taladro, maquina de soldar, alicates, seguetas, pinturas, barras cilíndricas macizas, vigas de acero estructural, plancha de acero, retenes de fijación, etc.

Figura 4.4 *Equipos y herramientas utilizados en la construcción de la mesa.* ***(Fuente propia, 2009)***

Figura 4.5 *Mesa construida.* ***(Fuente propia, 2009)***

Una vez construida la mesa se instaló el sistema neumático. A continuación se ilustra todo el conjunto armado.

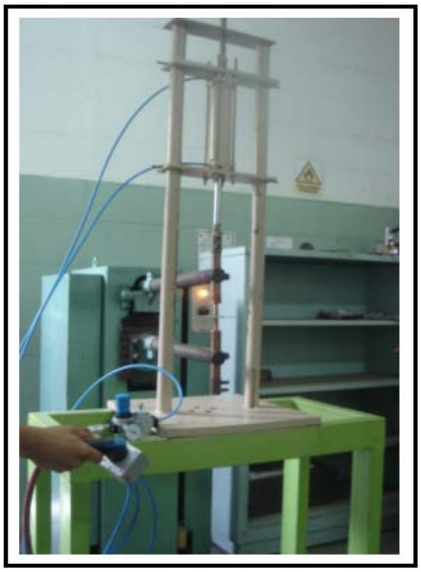


Figura 4.6 *Conjunto armado (máquina de soldadura por electropuntos, mesa y sistema neumático).* ***(Fuente propia, 2009)***

Ahora para verificar el funcionamiento de la máquina de soldadura y del sistema neumático se realizó el siguiente procedimiento:

1. Posicionar la mesa de manera tal que el vástago del actuador y el portaelectrodo estén alineados verticalmente en el punto de contacto.

Figura 4.7 *Punto de contacto entre el vástago y el portaelectrodo.* ***(Fuente propia, 2009)***

2. Encender el compresor.

La presión máxima de trabajo generada por el compresor es de 7,5 Bar y la misma se regula al girar la perilla roja.

Figura 4.8 *Llave de paso y perrilla reguladora de presión del compresor.*
(Fuente propia, 2009)

3. Encender la máquina de soldadura.

Moviendo los selectores de tiempo y corriente (Ver ***Fig. 3.7, Pág 41***) se varían las magnitudes de tiempo de unión e intensidad de corriente respectivamente.

4. Graduar la presión de suministro al actuador neumático.

Girando la perilla en la unidad de mantenimiento se regula la presión de trabajo y su valor se puede observar en el manómetro acoplado a este equipo.

Figura 4.9 *Perilla reguladora de presión del aire y manómetro de la unidad de mantenimiento.*
(Fuente propia, 2009)

5. Realizar un punto de soldadura.

Colocando una dupla de láminas del mismo material y espesor entre los electrodos, y posicionando el selector de la válvula neumática en la posición 2 se logra la extensión del vástago del actuador, acción que permite realizar la soldadura. Luego colocando el selector en la posición 4 el vástago se retrae a su posición inicial permitiendo que se liberen las láminas de los electrodos. Finalmente se verifica la existencia o no del punto de soldadura.

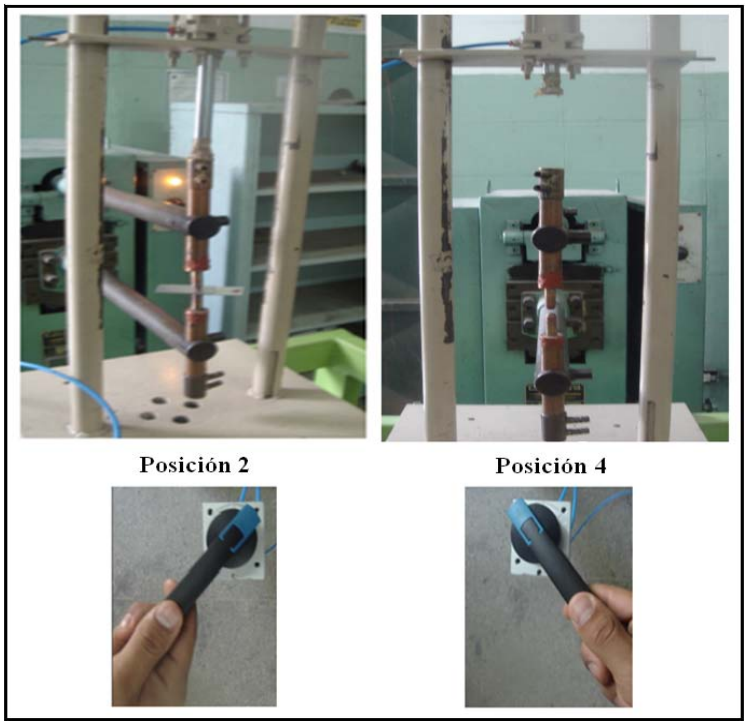


Figura 4.10 *Esquema del funcionamiento de la válvula neumática.* ***(Fuente propia, 2009)***

Es importante acotar que para poder realizar la soldadura se tuvo que regular la presión en el actuador neumático en un mínimo valor de 2 Bar, esto para poder vencer la resistencia ofrecida por el brazo móvil. Por lo que el rango de trabajo estará comprendido entre 2 y 7 Bar.

Una vez verificado el correcto funcionamiento de la máquina de soldadura y del sistema neumático, se comprobó que la fuerza generada por el sistema neumático es la misma aplicada a los electrodos y por ende la que estos ejercen sobre el material a soldar.

Para garantizar que la fuerza transmitida por el actuador neumático es igual a la recibida por electrodos, se comprobó de la siguiente manera:

1. Se calculó la fuerza que ejerce el actuador mediante la siguiente ecuación:

$$F = P.A.f \qquad \text{(Ec. 4.1)}$$

Donde:

F: Fuerza transmitida por el actuador neumático (Newton)

P: Presión del aire en la cámara del émbolo (Bar)

A: Área del émbolo (mm^2)

f: Factor de conversión ($Pascal.m^2/Bar.mm^2$)

Las especificaciones del actuador neumático se muestran a continuación:

FESTO

Hoja de datos de Cilindro Normalizado
DNCB - 40 - PPV - A - 532736

CARACTERÍSTICA	PROPIEDADES
Carrera	20 mm
Diametro del émbolo	40 mm
Presión de funcionamiento	(0,6 - 12) Bar
Posición de montaje	Indistinto
Forma de funcionamiento	De doble efecto
Fluido	Aire seco, con o sin lubricación

Figura 4.11 *Especificaciones del actuador neumático.* ***(Catálogos FESTO.com)***

Debido a que el émbolo del actuador neumático es de sección circular, el área se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$A = \frac{(\pi.D^2)}{4} \qquad \text{(Ec. 4.2)}$$

Donde:

A: Área del émbolo (mm^2)

D: Diámetro del émbolo (mm); **D =** 40 mm.

Al sustituir el valor del diámetro en ***la Ec. 4.2*** el área calculada es: **A =** 1256 mm^2.

A partir del cálculo del área del émbolo y con la presión de suministro al actuador neumático, se calculó la fuerza que éste genera a través de la ***Ec 4.1.***

Tabla 4.1 *Valores de fuerza por cada presión suministrada al actuador neumático.* ***(Fuente propia)***

Presión (Bar)	Área (mm^2)	Factor de Conversión ($Pa.m^2$)/($Bar.mm^2$)	Fuerza (Newton)
0	1256,63	0,1	**0**
1	1256,63	0,1	**126**
2	1256,63	0,1	**251**
3	1256,63	0,1	**377**
4	1256,63	0,1	**503**
5	1256,63	0,1	**628**
6	1256,63	0,1	**754**
7	1256,63	0,1	**880**

2. Se adquirió un resorte de compresión.

En la empresa CENTURY RESORTES, C.A fueron facilitados los catálogo donde se escogió el resorte de compresión utilizado.

DIAMETRO EXTERIOR	No. DE PARTE	LARGO LIBRE	DIAMETRO ALAMBRE	MATERIAL	VUELTAS TOTALES	ALTURA SOLIDA	RATE LB/IN	TERMINACION FINAL
1.625	C-638	1.000	0.135	PIANO	5.000	0.641	84.750	CERR. Y ESM.
	C-639	1.750	0.062	PIANO	4.500	0.465	5.720	CERRADO
	C-640	2.500	0.105	PIANO	8.000	1.050	34.820	CERRADO
	C-641	2.500	0.120	PIANO	6.250	1.200	54.680	CERR. Y ESM.
	C-642	3.000	0.120	PIANO	4.750	1.410	44.860	CERR. Y ESM.
	C-643	3.375	0.095	PIANO	6.500	0.998	18.580	CERR. Y ESM.
	C-644	3.500	0.120	PIANO	9.500	1.710	35.710	CERR. Y ESM.
	C-645	3.500	0.162	PIANO	7.000	2.106	95.100	CERR. Y ESM.
	C-646	3.750	0.144	PIANO	9.000	1.340	61.150	CERR. Y ESM.
	C-647	5.000	0.177	PIANO	10.000	3.629	75.120	CERR. Y ESM.
	C-648	10.000	0.105	PIANO	11.750	3.990	6.960	CERRADO
	C-649	12.000	0.072	PIANO	10.500	2.142	1.810	CERRADO
	C-650	12.000	0.192	PIANO	15.750	7.584	98.750	CERR. Y ESM.

Medidas en pulgadas

Figura 4.12 *Catálogo de las especificaciones de los resortes de compresión.*
(Catálogos CENTURY RESORTES.com)

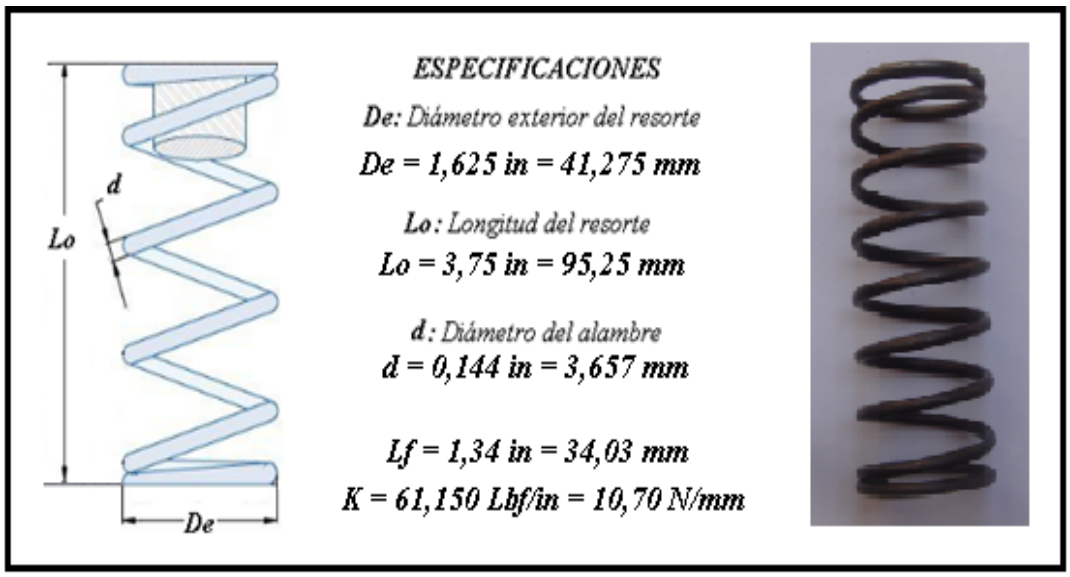


Figura 4.13 *Especificaciones del resorte de compresión.*
(Fuente propia, 2009)

3. Se calculó la fuerza en el resorte.

Haciendo uso de Ley de Hooke (*Ver* ***Ec. 2.6, Pág 34***) se calcula la fuerza transmita por el actuador neumático al resorte, para ello se realizó lo siguiente: Se posicionó el resorte de manera tal que el extremo superior de este quedó alineado verticalmente con el vástago del actuador neumático.

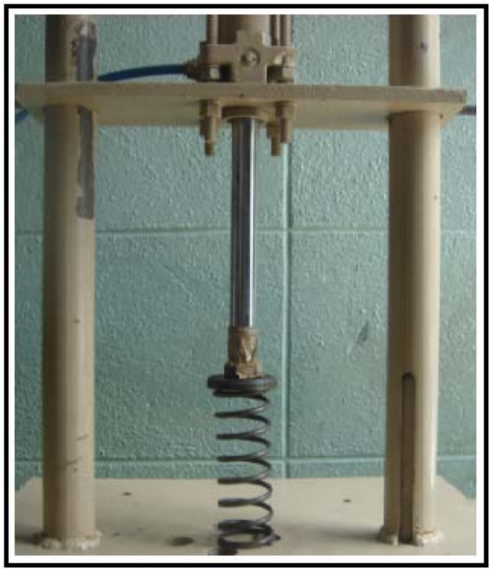


Figura 4.14 *Esquema para trasmitir la fuerza al resorte de compresión.*
(Fuente propia, 2009)

Por cada valor de presión regulada en la unidad de mantenimiento se genera una fuerza en el actuador neumático y por medio de la extensión del vástago se comprime el resorte, midiendo este desplazamiento se calcula la fuerza de compresión aplicada sobre éste.

Figura 4.15 *Esquema para medir la altura de compresión en el resorte.* ***(Fuente propia, 2009)***

A continuación se muestran los valores obtenidos:

Tabla 4.2 *Valores de fuerza recibida por el resorte a diferentes presiones.* ***(Fuente propia, 2009)***

Presión (Bar)	Constante de Elasticidad (N/mm)	Altura de compresión (mm)	Fuerza (Newton)
0	10,7	0	**0**
1	10,7	11,23	**120**
2	10,7	22,76	**244**
3	10,7	34,09	**365**
4	10,7	46,68	**499**
5	10,7	57,95	**620**

A partir de los valores de fuerzas calculados se elaboró una gráfica donde se observa el comportamiento de cada curva, esto con el fin de verificar que la fuerza generada en el actuador neumático es la misma que se transmitirá a los electrodos al momento de realizar la soldadura por electropuntos.

Tabla 4.3 *Valores para la elaboración de curvas de comparación de la fuerza del sistema neumático y del resorte.* ***(Fuente propia, 2009)***

	SISTEMA NEUMÁTICO	RESORTE
Presión (Bar)	**Fuerza (Newton)**	**Fuerza (Newton)**
0	**0**	**0**
1	**126**	**120**
2	**251**	**244**
3	**377**	**365**
4	**503**	**499**
5	**628**	**620**
6	**754**	
7	**880**	

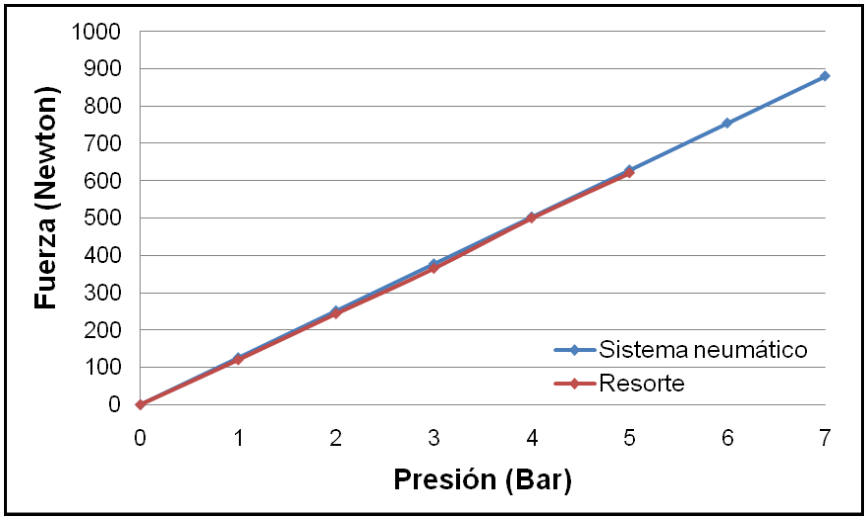


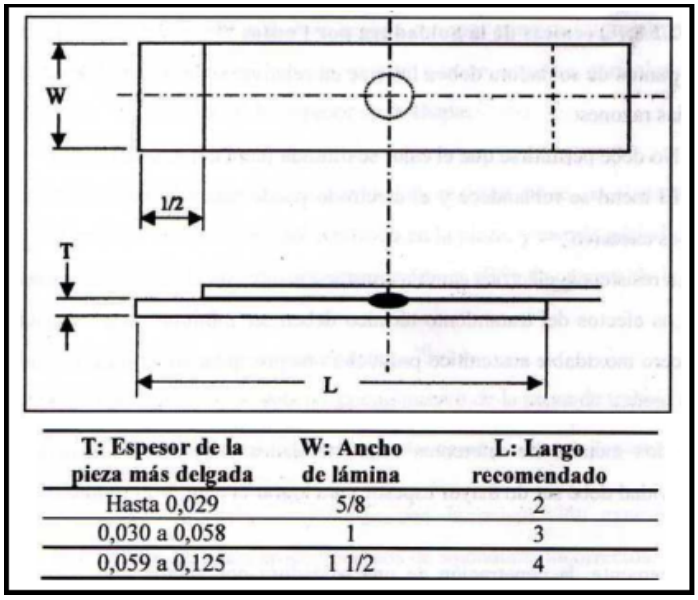
Figura 4.16 *Curvas de calibración de la fuerza del sistema neumático y del resorte en función de la presión.* ***(Fuente propia, 2009)***

Del gráfico se puede observar que ambas curvas tienen la misma muy parecida, sin embargo los valores de fuerzas en el resorte son ligeramente menores debido a errores en la medición de la altura de compresión, ésta desviación oscila en el 1%.

4.2 Pruebas piloto de soldadura por electropuntos en función de la intensidad de corriente vs tiempo de unión.

Primeramente se tuvo que adquirir el material de trabajo, las láminas de acero estructural de bajo carbono AISI-1018 de calidad superficial ASTM-336 fueron compradas en FERUM, C.A. (Valencia – Edo. Carabobo) y las de aluminio 3003*h*14 en ALUMINIOS UNIÓN, C.A. (Valencia – Edo. Carabobo), ambas en dimensiones estándares de (1220 x 2440) mm y de distintos espesores.

Las láminas fueron cortadas de sus dimensiones iniciales a las recomendadas para este tipo de ensayo (destructivo Peel) empleando la cizalladora ubicada en el laboratorio de procesos.



T: Espesor de la pieza más delgada	W: Ancho de lámina	L: Largo recomendado
Hasta 0,029	5/8	2
0,030 a 0,058	1	3
0,059 a 0,125	1 1/2	4

Figura 4.17 *Dimensiones en pulgadas recomendadas para las probetas del ensayo destructivo Peel.* ***(Norma ISO 10447:2007)***

Tabla 4.4 *Dimensiones en milímetros de las probetas para el ensayo destructivo Peel.* ***(Norma ISO 10447:2007)***

MATERIAL	T	W	L
Aluminio	0,8	25,4	76,2
	1	25,4	76,2
	1,27	25,4	76,2
Acero	0,7	15,87	50,8
	0,9	25,4	76,2
	1,1	25,4	76,2

Con la finalidad de obtener la combinación (intensidad de corriente y tiempo de unión) adecuada para soldar las duplas de láminas se realizaron puntos de soldadura permutando las posiciones de los selectores (Ver ***Fig. 3.7, Pág 41***) que controlan estas variables. A continuación se muestran las magnitudes de tiempo y corriente para cada combinación de estos:

		Posición del selector de tiempo										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
		4	9	14	19	24	32	42	59	150	198	→ T (ciclos)
Posición del selector de corriente	1	2970	3420	3460	3360	3420	3430	3420	3440	3500	3540	I (Ampere)
	2	4130	4240	4380	4350	4350	4360	4400	4380	4480	4490	
	3	5080	5220	5290	5290	5330	5350	5360	5380	5470	5460	
	4	5630	5920	6030	6140	6090	6110	6160	6190	6260	6210	
	5	6590	6430	6530	6700	6660	6760	6710	6740	6790	6780	

Figura 4.18 *Valores de intensidad de corriente y tiempo de unión para las distintas combinaciones de posición de los selectores de la máquina de soldadura por electropuntos utilizada.* ***(Enriquez y Malavé, 2004)***

Para identificar la intensidad de corriente y el tiempo de unión con el cual se realizó el punto de soldadura, las láminas se marcaron de la siguiente manera:

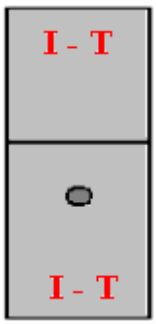


Figura 4.19 *Patrón de marcaje de las probetas para las pruebas piloto.* ***(Fuente propia, 2009)***

En la ***Fig. 4.19*** el primer número indica la posición del interruptor de corriente y el segundo la del interruptor de tiempo.

Una vez realizados los puntos de soldadura se observaron las características de cada uno de ellos y simultáneamente se hacia la prueba destructiva peel. Las variables a evaluar durante esta observación se identificaron de la siguiente manera:

Tabla 4.5 *Variables a verificar durante la inspección visual de los puntos de soldadura.* ***(Fuente propia, 2009)***

	INSPECCIÓN VISUAL			
	Existencia de Soldadura	**Calidad de la Superficie**	**Resistencia al corte**	**Tipo de Falla**
DESCRIPCIÓN	Si No	Buena Regular Mala	Fuerte Débil	Desgarramiento Cizallamiento

Calidad de la superficie: contempla todo lo relacionado con la existencia de imperfecciones en el punto de soldadura (hoyos, grietas, rebabas del metal fundido, depósito de electrodo, marcado excesivo por el electrodo).

- **Buena:** no existe ninguna imperfección.
- **Regular:** presencia de pocas imperfecciones.
- **Mala:** presencia de gran parte de las imperfecciones.

Resistencia al corte: es la oposición que ofrece la dupla de lámina soldada a ser desprendida.

- **Fuerte:** difícil desprendimiento.
- **Débil:** facilidad a ser desprendida.

Tipo de falla: al separar la dupla de lámina soldada se puede presentar 2 tipos de fallas, por desgarramiento o por cizallamiento.

- **Desgarramiento:** se presenta cuando en una de las láminas queda totalmente adherida la pepita de soldadura y en la otra queda un hueco.
- **Cizallamiento:** se presenta cuando al separar ambas láminas queda una marca en cada una de ellas rompiéndose solo el punto de soldadura.

A continuación en la siguiente figura se ilustran estos tipos de falla:

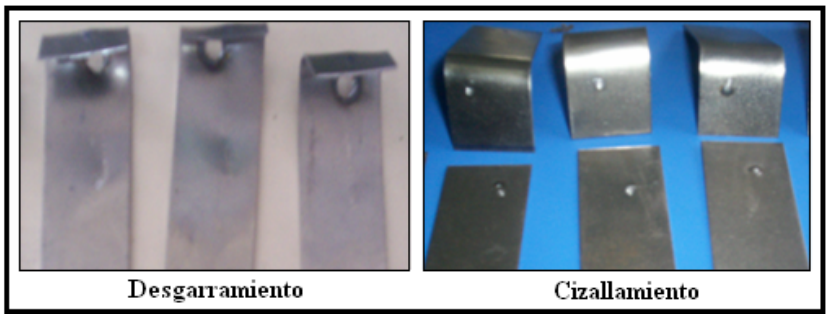


Figura 4.20 *Fallas que se pueden generar en el ensayo destructivo Peel.* ***(Castellano y Cardozo, 2009)***

Los requerimientos apropiados para que una soldadura sea óptima son: buena calidad superficial, resistencia a la tracción fuerte y que presente falla por desgarramiento.

En función al tamaño de la pepita de soldadura generada se determinarán las magnitudes de tiempo de unión e intensidad de corriente, para ello se tomo en cuenta los valores de diámetros recomendados para una buena unión de las láminas. A continuación se muestran dichos valores:

Tabla 4.6 *Valores de tamaño de pepita de soldadura recomendado para láminas de diversos espesores.* ***(Horwitz, 1990)***

Espesor nominal de la lámina (mm)	Diámetro de la pepita (mm)	Espesor nominal de la lámina (mm)	Diámetro de la pepita (mm)
0,05	0,38	0,7	3,3
0,08	0,5	0,8	3,58
0,1	0,75	0,9	3,81
0,12	0,89	1	4.06
0,16	1,02	1,1	4,32
0,18	1,14	1,2	4,57
0,2	1,27	1,4	4,82
0,25	1,52	1,6	5,08
0,3	1,78	1,8	5,33
0,4	2,16	2	5,72
0,45	2,29	2,3	6,1
0,5	2,54	2,5	6,35
0,55	2,68	2,8	6,6
0,65	3,05	3,2	7,11
	Acero	**Aluminio**	

Es importante acotar que para la determinación de los parametros óptimos de cada espesor de lámina se consideraron las ecuaciones ***2.2, 2.3, 2.4 y 2.5 (Pág 25 y 26)***; a través de estas se apreció que hay que aplicar una fuerza mayor a medida que aumenta el espesor de la lámina, por lo que:

- Para las láminas de menor espesor, se fijó el mínimo valor de presión del rango de trabajo y así a medida que se aumente el espesor de la lámina se pueda aumentar la fuerza aplicada a los electrodos para obtener una buena soldadura.

- Para las láminas de mayor espesor se hizo lo contrario, se fijó el máximo valor de presión del rango de trabajo y así a medida que se disminuya el espesor de la lámina se pueda disminuir la fuerza aplicada a los electrodos para el mismo fin.

- Para las láminas de espesores intermedios, se fijó un valor medio dentro del rango de presión de trabajo y así a medida que se aumente o se disminuya el espesor de la lámina se pueda aumentar o disminuir la fuerza aplicada a los electrodos respectivamente.

En función a esto las presiones de trabajo para determinar las magnitudes de tiempo y corriente a cada espesor de lámina se muestran a continuación:

Tabla 4.7 *Presiones de trabajo fijada a cada material para la búsqueda de los parámetros óptimos.* ***(Fuente propia, 2009)***

MATERIAL	Espesor de la lámina (mm)	Presión de trabajo (Bar)
Aluminio	0,8	2
	1	4
	1,27	7
Acero	0,7	2
	0,9	4
	1,1	7

4.2.1 Pruebas piloto con probetas de acero estructural de bajo carbono AISI-1018 de calidad superficial ASTM-336.

Para reducir el número de combinaciones de las posiciones de los selectores de tiempo y corriente en la búsqueda de los parámetros adecuados de operatividad de la máquina de soldadura por electropuntos se tomó en cuenta el trabajo de grado (Cardozo y Castellano (2009)), en el cual se soldaron láminas de acero al carbono de 1,1 mm de espesor colocando los interruptores de intensidad de corriente y tiempo de unión en las posiciones 5 y 4 respectivamente ***(I_5: 6700 A, t_4: 19 ciclos (0,316 segundos)),*** por lo que se tomaron estos valores como punto de partida en la búsqueda de los parámetros. A continuación los resultados obtenidos:

- ***e* = 1,1 mm.**

Tabla 4.8 *Inspección visual y valores de diámetros de la pepita de soldadura de las muestras del ensayo destructivo Peel para láminas de acero de e = 1,1 mm.* ***(Fuente propia, 2009)***

Muestra	INSPECCIÓN VISUAL			ENSAYO DESTRUCTIVO PEEL				
	Existencia de Soldadura	Calidad de la Superficie	Resistencia al corte	Tipo de Falla	D_1 (mm)	D_2 (mm)	$\frac{(D_1 + D_2)}{2}$	D prom total
5 - 4	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	4,98	4,88	4,93	4,86
5 - 4	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	4,69	4,87	4,78	
5 - 4	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	4,75	4,93	4,84	
5 - 4	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	4,80	4,96	4,88	
4 - 4	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	2,10	2,22	2,16	2,13
4 - 4	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	2,14	2,02	2,08	
4 - 4	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	2,27	2,11	2,19	
4 - 4	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	2,03	2,11	2,07	
5 - 3	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	3,16	3,26	3,21	3,29
5 - 3	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	3,22	3,44	3,33	
5 - 3	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	3,31	3,45	3,38	
5 - 3	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	3,13	3,37	3,25	
5 - 5	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	4,06	4,14	4,10	**4,14**
5 - 5	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	4,16	4,26	4,21	
5 - 5	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	4,15	4,23	4,19	
5 - 5	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	4,10	4,02	4,06	

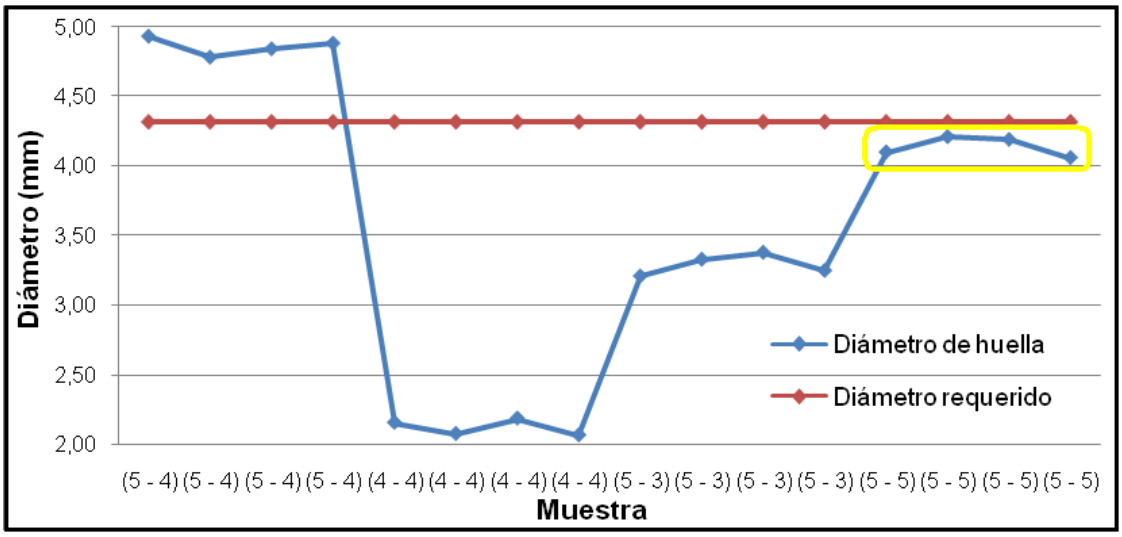


Figura 4.21 *Comparación entre el diámetro requerido y el de la pepita de soldadura de las muestras del ensayo destructivo Peel para láminas de acero de e = 1,1 mm.* ***(Fuente propia, 2009)***

De la ***Figura 4.21*** se puede apreciar que los valores de diámetros de las muestras soldadas con los parámetros de máquina (I_5 – t_5) están más cerca del diámetro requerido (4,32 mm), y de la ***Tabla 4.8*** se observa que el diámetro promedio total de éstas muestras es de 4,14 mm, las mismas cumplen con todos los requerimientos apropiados en la inspección visual, por lo que se seleccionaron estas magnitudes de intensidad de corriente y tiempo de unión ***(I_5: 6660 A, t_5: 24 ciclos (0,4 segundos))*** para obtener una buena soldadura.

- ***e* = 0,9 mm.**

Tabla 4.9 *Inspección visual y valores de diámetros de la pepita de soldadura de las muestras del ensayo destructivo Peel para láminas de acero de e = 0,9 mm.* ***(Fuente propia, 2009)***

Muestra	INSPECCIÓN VISUAL			ENSAYO DESTRUCTIVO PEEL				
	Existencia de Soldadura	Calidad de la Superficie	Resistencia al corte	Tipo de Falla	D1 (mm)	D2 (mm)	$\frac{(D_1 + D_2)}{2}$	D prom total
5 - 5	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	4,20	4,34	4,27	4,34
5 - 5	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	4,40	4,32	4,36	
5 - 5	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	4,31	4,47	4,39	
5 - 5	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	4,38	4,26	4,32	
5 - 3	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	3,61	3,47	3,54	**3,61**
5 - 3	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	3,70	3,60	3,65	
5 - 3	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	3,74	3,62	3,68	
5 - 3	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	3,64	3,50	3,57	
5 - 2	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	2,74	2,86	2,80	2,77
5 - 2	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	2,76	2,68	2,72	
5 - 2	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	2,90	2,76	2,83	
5 - 2	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	2,66	2,82	2,74	

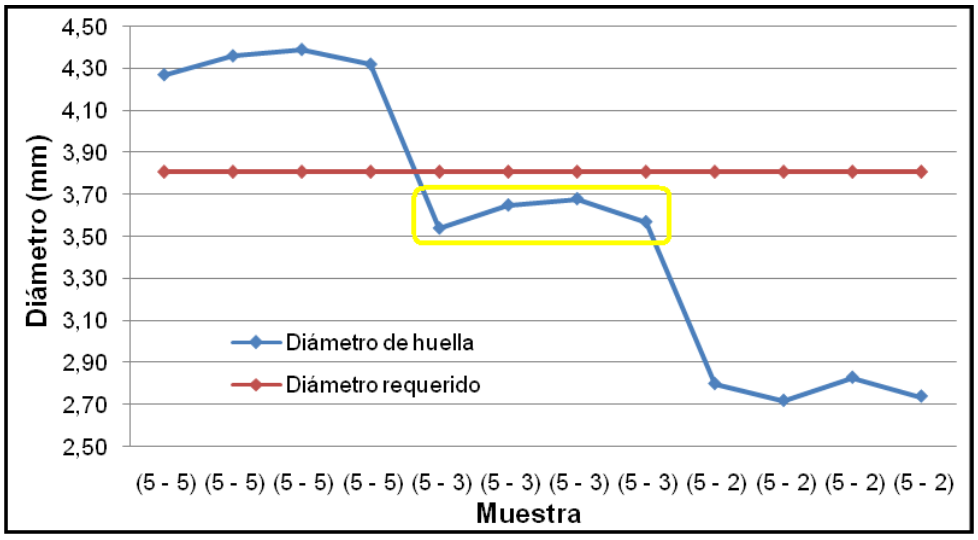


Figura 4.22 *Comparación entre el diámetro requerido y el de la pepita de soldadura de las muestras del ensayos destructivo Peel para laminas de acero de e = 0,9 mm.* ***(Fuente propia, 2009)***

De la ***Figura 4.22*** se puede apreciar que los valores de diámetros de las muestras soldadas con los parámetros de máquina (I_5 – t_3) están mas cerca del diámetro requerido (3,81 mm), y de la ***Tabla 4.9*** se observa que el diámetro promedio total de éstas muestras es de 3,61 mm, las mismas cumplen con todos los requerimientos

apropiados en la inspección visual, por lo que se seleccionaron estas magnitudes de intensidad de corriente y tiempo de unión ***(I_5: 6530 A, t_3: 14 ciclos (0,23 segundos))*** para obtener una buena soldadura.

- ***e* = 0,7 mm.**

Tabla 4.10 *Inspección visual y valores de diámetros de la pepita de soldadura de las muestras del ensayo destructivo Peel para láminas de acero de e = 0,7 mm.* ***(Fuente propia, 2009)***

Muestra	INSPECCIÓN VISUAL			ENSAYO DESTRUCTIVO PEEI				
	Existencia de Soldadura	Calidad de la Superficie	Resistencia al corte	Tipo de Falla	D_1 (mm)	D_2 (mm)	$\frac{(D_1 + D_2)}{2}$	D prom total
5 - 3	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	3,84	3,70	3,77	3,79
5 - 3	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	3,77	3,89	3,83	
5 - 3	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	3,80	3,64	3,72	
5 - 3	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	3,91	3,79	3,85	
5 - 2	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	3,09	2,97	3,03	**3,11**
5 - 2	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	3,07	3,21	3,14	
5 - 2	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	3,05	3,15	3,10	
5 - 2	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	3,22	3,12	3,17	
5 - 1	Si	Regular	Débil	Cizallamiento	2,55	2,39	2,47	2,45
5 - 1	Si	Regular	Débil	Cizallamiento	2,31	2,45	2,38	
5 - 1	Si	Regular	Débil	Cizallamiento	2,50	2,34	2,42	
5 - 1	Si	Regular	Débil	Cizallamiento	2,42	2,60	2,51	

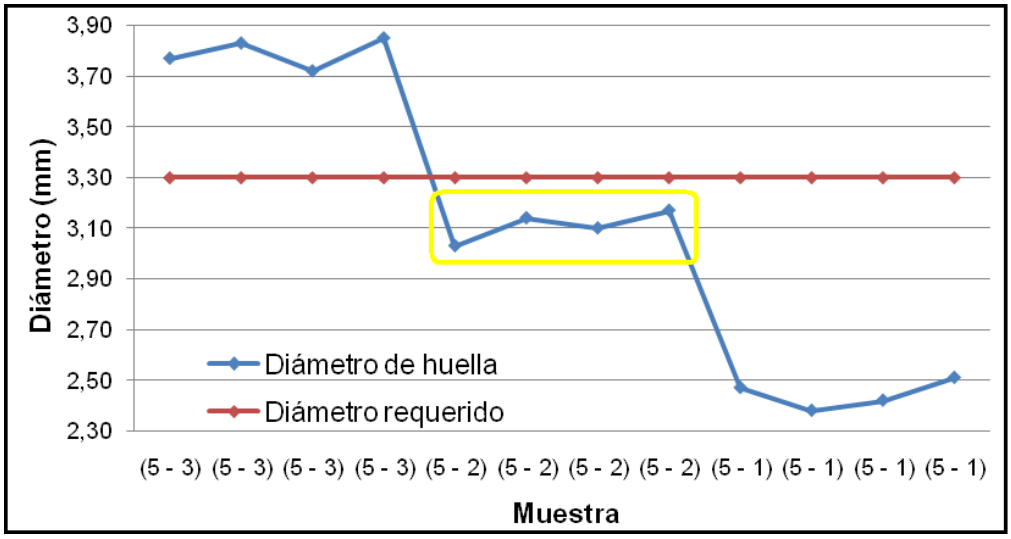


Figura 4.23 *Comparación entre el diámetro requerido y el de la pepita de soldadura de las muestras del ensayos destructivo Peel para laminas de acero de e = 0,7 mm.* ***(Fuente propia, 2009)***

De la ***Figura 4.23*** se puede apreciar que los valores de diámetros de las muestras soldadas con los parámetros de máquina (I_5 – t_2) están mas cerca del diámetro requerido (3,30 mm), y de la ***Tabla 4.10*** se observa que el diámetro promedio total de éstas muestras es de 3,11 mm, las mismas cumplen con todos los requerimientos apropiados en la inspección visual, por lo que se seleccionaron estas magnitudes de intensidad de corriente y tiempo de unión ***(I_5: 6430 A, t_2: 9 ciclos (0,15 segundos))*** para obtener una buena soldadura.

4.2.2 Pruebas piloto con probetas de aluminio 3003*h*14.

Para el aluminio 3003*h*14 se tomó en cuenta el trabajo de grado (Dorta y Ortega (2006)), en el cual se soldaron láminas de aluminio de 1,3 mm de espesor colocando los interruptores de intensidad de corriente y tiempo de unión en las posiciones 3 y 9 respectivamente ***(I_3: 5470 A, t_9: 150 ciclos (2,5 segundos)),*** por lo que se tomaron estos valores como punto de partida en la búsqueda de los parámetros. A continuación los resultados obtenidos:

- ***e* = 1,27 mm.**

Tabla 4.11 *Inspección visual y valores de diámetros de la pepita de soldadura de las muestras del ensayo destructivo Peel para láminas de aluminio de e = 1,27 mm.* ***(Fuente propia, 2009)***

Muestra	INSPECCIÓN VISUAL				ENSAYO DESTRUCTIVO PEEL			
	Existencia de Soldadura	Calidad de la Superficie	Resistencia al corte	Tipo de Falla	D_1 (mm)	D_2 (mm)	$\frac{(D_1 + D_2)}{2}$	D prom total
3 - 9	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	3,10	2,94	3,02	3,09
3 - 9	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	3,03	3,27	3,15	
3 - 9	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	3,18	3,02	3,10	
2 - 9	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	1,23	1,35	1,29	1,27
2 - 9	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	1,17	1,25	1,21	
2 - 9	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	1,27	1,37	1,32	
4 - 9	Si	Mala	Débil	Cizallamiento	4,50	4,54	4,52	4,49
4 - 9	Si	Mala	Débil	Cizallamiento	4,53	4,37	4,45	
3 - 10	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	3,37	3,23	3,30	3,25
3 - 10	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	3,25	3,13	3,19	
3 - 8	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	2,36	2,12	2,24	**2,15**
3 - 8	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	2,19	2,07	2,13	
3 - 8	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	2,11	2,23	2,17	
3 - 8	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	2,14	2,00	2,07	
3 - 7	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	1,58	1,76	1,67	1,59
3 - 7	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	1,65	1,43	1,54	
3 - 7	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	1,53	1,71	1,62	
3 - 7	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	1,60	1,42	1,51	

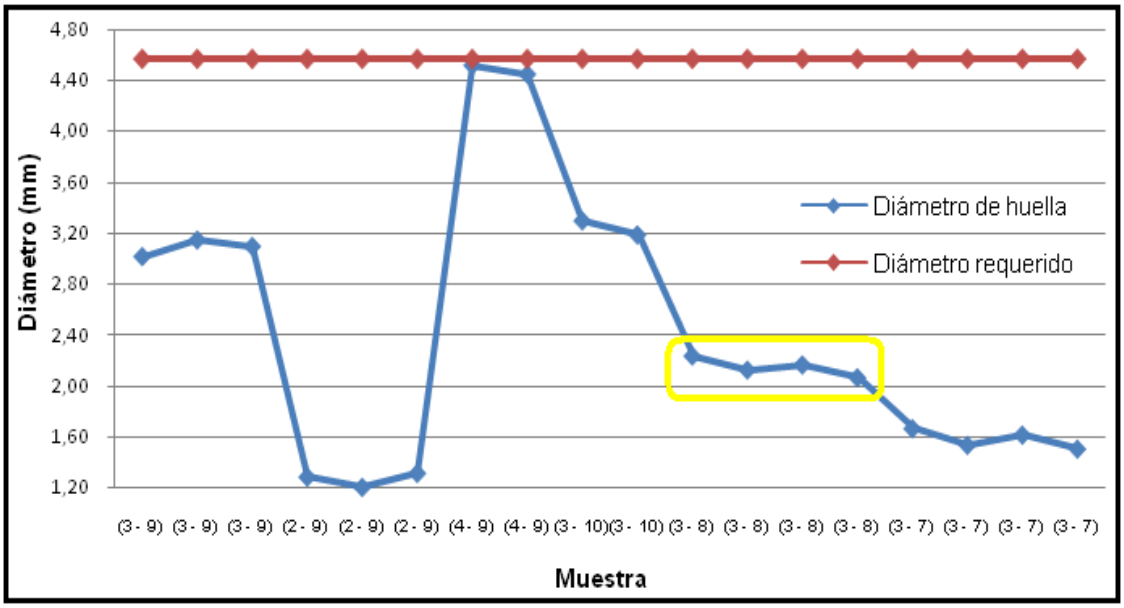


Figura 4.24 *Comparación entre el diámetro requerido y el de la pepita de soldadura de las muestras del ensayos destructivo Peel para láminas de aluminio de e = 1,27 mm.* ***(Fuente propia, 2009)***

De la ***Figura 4.24*** se puede apreciar que los valores de diámetros de las muestras soldadas con los parámetros de máquina (I_4 – t_9) están mas cerca del diámetro requerido (4,57 mm), pero en la ***Tabla 4.11*** se observa que las mismas no cumplen con los requerimientos apropiados en la inspección visual, sin embargo del resto de las muestras soldadas las que si cumplen con estos requerimientos son las realizadas con los parámetros (I_3 – t_8), por lo que se seleccionaron estas magnitudes de intensidad de corriente y tiempo de unión ***(I_3: 5380 A, t_8: 59 ciclos (0,98 segundos))*** para obtener una buena soldadura a pesar de que el diámetro promedio total es de 2,15 mm.

- ***e* = 1,0 mm.**

Tabla 4.12 *Inspección visual y valores de diámetros de la pepita de soldadura de las muestras del ensayo destructivo Peel para láminas de aluminio de e = 1,0 mm.* ***(Fuente propia, 2009)***

Muestra	INSPECCIÓN VISUAL			ENSAYO DESTRUCTIVO PEEL				
	Existencia de Soldadura	Calidad de la Superficie	Resistencia al corte	Tipo de Falla	D_1 (mm)	D_2 (mm)	$\frac{(D_1 + D_2)}{2}$	D prom total
3 - 8	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	2,28	2,44	2,36	2,39
3 - 8	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	2,35	2,53	2,44	
3 - 8	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	2,41	2,37	2,39	
3 - 8	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	2,50	2,26	2,38	
3 - 7	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	1,73	1,87	1,80	**1,79**
3 - 7	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	1,79	1,89	1,84	
3 - 7	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	1,80	1,70	1,75	
3 - 7	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	1,83	1,73	1,78	
3 - 6	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	1,31	1,51	1,41	1,42
3 - 6	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	1,33	1,57	1,45	
3 - 6	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	1,44	1,30	1,37	
3 - 6	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	1,37	1,51	1,44	

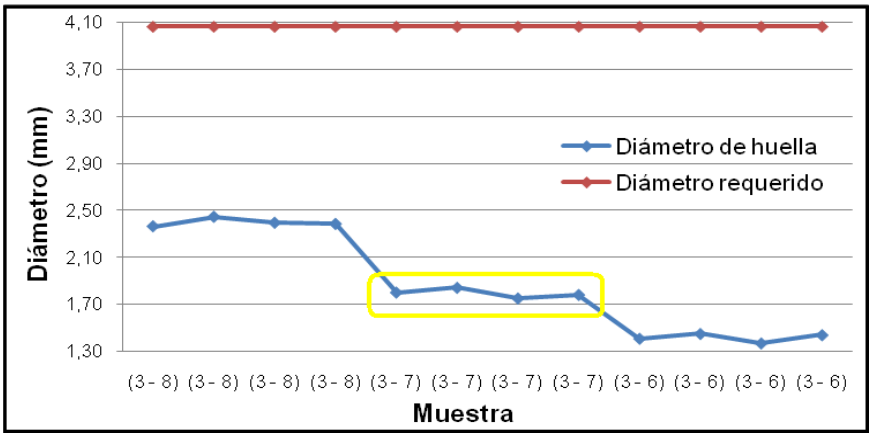


Figura 4.25 *Comparación entre el diámetro requerido y el de la pepita de soldadura de las muestras del ensayos destructivo Peel para láminas de aluminio de e = 1,0 mm.* ***(Fuente propia, 2009)***

De la ***Figura 4.25*** se puede apreciar que ninguno de los valores de diámetros de las muestras soldadas se acerca al requerido (4,06 mm), pero en la ***Tabla 4.12*** se observa que las muestras soldadas con los parámetros ($I_3 - t_7$) son las únicas que cumplen con los requerimientos apropiados en la inspección visual, por lo que se seleccionaron estas magnitudes de intensidad de corriente y tiempo de unión ***(I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos (0,7 segundos))*** para obtener una buena soldadura a pesar de que el diámetro promedio total es de 1,79 mm.

- ***e* = 0,8 mm.**

Tabla 4.13 *Inspección visual y valores de diámetros de la pepita de soldadura de las muestras del ensayo destructivo Peel para láminas de aluminio de e = 0,8 mm.* ***(Fuente propia, 2009)***

Muestra	INSPECCIÓN VISUAL				ENSAYO DESTRUCTIVO PEEL			
	Existencia de Soldadura	Calidad de la Superficie	Resistencia al corte	Tipo de Falla	D_1 (mm)	D_2 (mm)	$\frac{(D_1 + D_2)}{2}$	D prom total
3 - 7	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	1,95	2,11	2,03	2,01
3 - 7	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	1,99	2,17	2,08	
3 - 7	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	2,03	1,85	1,94	
3 - 7	Si	Regular	Fuerte	Desgarramiento	1,90	2,06	1,98	
3 - 6	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	1,49	1,63	1,56	**1,58**
3 - 6	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	1,60	1,70	1,65	
3 - 6	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	1,56	1,62	1,59	
3 - 6	Si	Buena	Fuerte	Desgarramiento	1,62	1,44	1,53	
3 - 5	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	1,41	1,29	1,35	1,30
3 - 5	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	1,31	1,17	1,24	
3 - 5	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	1,22	1,32	1,27	
3 - 5	Si	Buena	Débil	Cizallamiento	1,39	1,27	1,33	

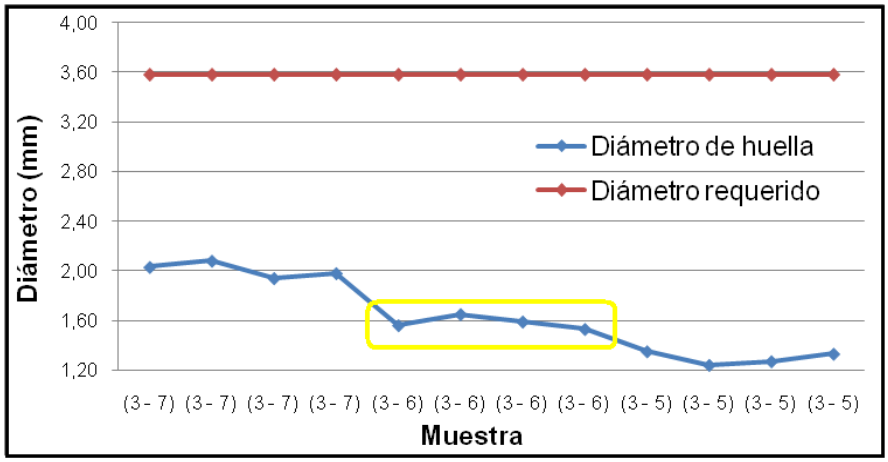


Figura 4.26 *Comparación entre el diámetro requerido y el de la pepita de soldadura de las muestras del ensayos destructivo Peel para láminas de aluminio de e = 0,8 mm.* ***(Fuente propia, 2009)***

De la ***Figura 4.26*** se puede apreciar que ninguno de los valores de diámetros de las muestras soldadas se acerca al requerido (3,58 mm), pero en la ***Tabla 4.13*** se observa que las muestras soldadas con los parámetros ($I_3 - t_6$) son las únicas que cumplen con los requerimientos apropiados en la inspección visual, por lo que se seleccionaron estas magnitudes de intensidad de corriente y tiempo de unión ***(I_3: 5350 A, t_6: 32 ciclos (0,53 segundos))*** para obtener una buena soldadura a pesar de que el diámetro promedio total es de 1,58 mm.

A continuación se muestran los valores óptimos de intensidad de corriente y tiempo de unión seleccionados para cada material y espesor de la lámina.

Tabla 4.14 *Valores óptimos de intensidad de corriente y tiempo de unión según el material y el espesor de la lámina.* ***(Fuente propia, 2009)***

MATERIAL	espesor (mm)	Intensidad de corriente (Ampere)	Tiempo de unión		Diámetro requerido (mm)	D prom total (mm)
			(Ciclos)	(segundos)		
Acero	0,7	6430	9	0,15	3,30	3,11
	0,9	6530	14	0,23	3,81	3,61
	1,1	6660	24	0,316	4,32	4,14
Aluminio	0,8	5350	32	0,4	3,58	1,60
	1	5360	42	0,7	4,06	1,80
	1,27	5380	59	0,98	4,57	2,15

En la ***Tabla 4.14*** al comparar los diámetros requeridos para una buena soldadura con los diámetros promedio totales generados en las pruebas pilotos, se observa que para el aluminio la variación de estos valores es considerable, por lo que se tomaron los valores de los diámetros promedios totales como referencia para determinar una buena soldadura en los ensayos.

4.3 Ensayos de soldadura por electropuntos en función del espesor de lámina y la fuerza aplicada a los electrodos (sin enfriamiento interno en los electrodos).

Para estos ensayos se realizaron 4 puntos de soldadura en cada dupla ensayada. A continuación se ilustran las dimensiones de la probeta y la disposición de los puntos en la misma.

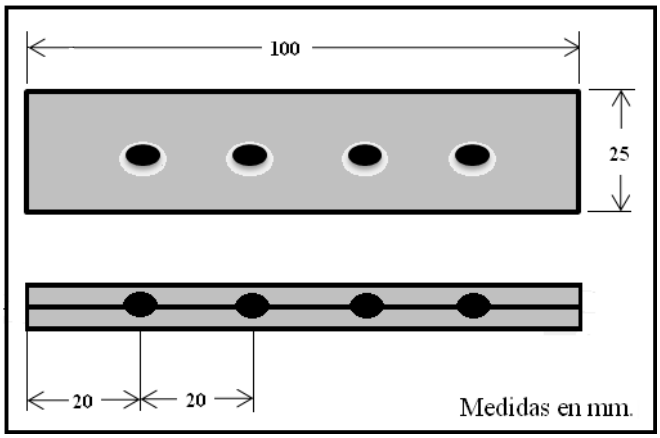


Figura 4.27 *Dimensiones de la probeta para la realización de los ensayos.* ***(Fuente propia, 2009)***

Para ilustrar el comportamiento de la fuerza aplicada a los electrodos durante la soldadura en función del espesor de la lámina se elaboraron gráficas donde la curva generada refleja dicho comportamiento, para ello los ensayos se enfocaron de la siguiente manera:

4.3.1 Ensayos con probetas de acero estructural de bajo carbono AISI-1018 de calidad superficial ASTM-336.

- ***e* = 0,7 mm.**

Con los valores óptimos de intensidad de corriente y tiempo de unión hallados en las pruebas pilotos (Ver ***Tabla 4.14***) se realizaron puntos de soldadura para los espesores de lámina restantes (0,9 mm y 1,1 mm), la fuerza aplicada a los electrodos se varió regulando la presión del aire en el actuador neumático dentro del rango de trabajo hasta alcanzar una buena soldadura.

Para determinar la buena soldadura se midió el diámetro de la huella externa dejada por los electrodos, tomando en cuenta que el diámetro de la huella y el de la pepita de soldadura son casi del mismo tamaño, se tomó como referencia los valores de diámetro recomendados en la ***Tabla 4.6***. A continuación se ilustra la forma en que fueron medidos los diámetros de las huellas:

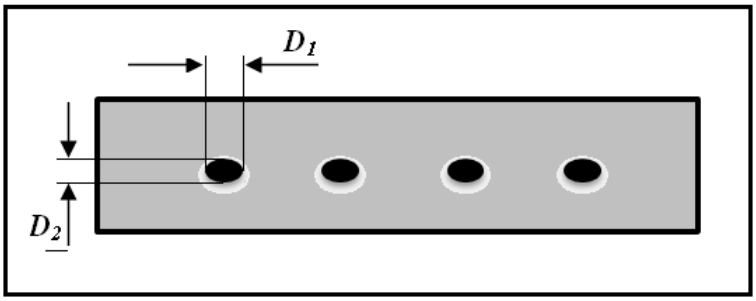


Figura 4.28 *Medición de los diámetros de la huella dejada por los electrodos.* ***(Fuente propia, 2009)***

En total se midieron 4 diámetros por cada huella, dos superiores y dos inferiores. A continuación se muestran los resultados obtenidos en el ensayo.

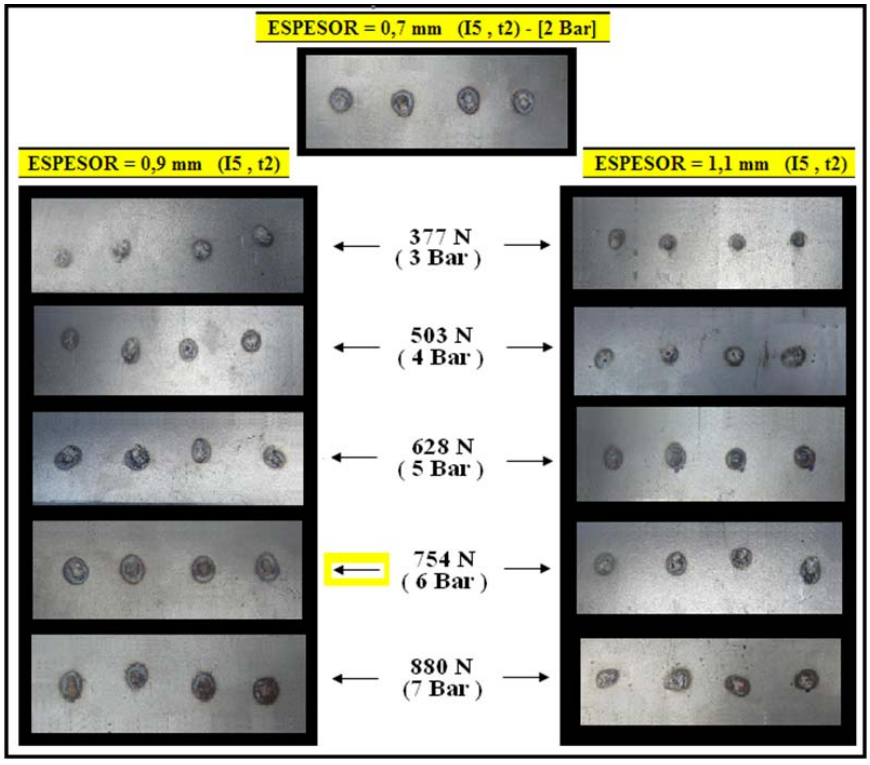


Figura 4.29 *Probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de e = 0,7 mm (I_5: 6430A, t_2: 9 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

Tabla 4.15 *Diámetros de las huellas de las probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de e = 0,7 mm (I_5: 6430A, t_2: 9 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

ESPESOR = 0,7 mm (I5 , t2)						
Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[2] 1	3,36	3,28	3,16	3,08	3,22	3,24
[2] 2	3,47	3,21	3,38	3,24	3,33	
[2] 3	3,33	3,12	3,27	3,03	3,19	
[2] 4	3,44	2,97	3,42	3,16	3,25	

ESPESOR = 0,9 mm (I5 , t2)						
Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[3] 1	2,74	2,67	2,57	2,51	2,62	2,64
[3] 2	2,83	2,62	2,76	2,64	2,71	
[3] 3	2,72	2,54	2,67	2,47	2,60	
[3] 4	2,81	2,42	2,79	2,57	2,65	
[4] 1	3,01	2,94	2,83	2,75	2,88	2,90
[4] 2	3,11	2,87	3,03	2,90	2,98	
[4] 3	2,98	2,79	2,93	2,71	2,85	
[4] 4	3,08	2,66	3,06	2,83	2,91	
[5] 1	3,52	3,44	3,31	3,23	3,38	3,40
[5] 2	3,64	3,37	3,55	3,40	3,49	
[5] 3	3,49	3,27	3,43	3,17	3,34	
[5] 4	3,61	3,11	3,59	3,31	3,41	
[6] 1	3,86	3,77	3,63	3,53	3,70	3,73
[6] 2	3,99	3,68	3,88	3,72	3,82	
[6] 3	3,82	3,58	3,75	3,48	3,66	
[6] 4	3,95	3,41	3,93	3,63	3,73	
[7] 1	4,36	4,26	4,10	3,99	4,18	4,21
[7] 2	4,51	4,16	4,39	4,20	4,32	
[7] 3	4,32	4,05	4,24	3,93	4,13	
[7] 4	4,47	3,85	4,44	4,10	4,21	

ESPESOR = 1,1 mm (I5 , t2)						
Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[3] 1	2,41	2,36	2,27	2,21	2,31	2,33
[3] 2	2,49	2,30	2,43	2,33	2,39	
[3] 3	2,39	2,24	2,35	2,17	2,29	
[3] 4	2,47	2,13	2,46	2,27	2,33	
[4] 1	2,75	2,69	2,59	2,52	2,64	2,66
[4] 2	2,84	2,63	2,77	2,65	2,72	
[4] 3	2,73	2,55	2,68	2,48	2,61	
[4] 4	2,82	2,43	2,80	2,59	2,66	
[5] 1	3,08	3,01	2,89	2,82	2,95	2,97
[5] 2	3,18	2,94	3,10	2,97	3,05	
[5] 3	3,05	2,86	3,00	2,77	2,92	
[5] 4	3,15	2,72	3,14	2,89	2,98	
[6] 1	3,31	3,23	3,11	3,03	3,17	3,20
[6] 2	3,42	3,16	3,33	3,19	3,28	
[6] 3	3,28	3,07	3,22	2,98	3,14	
[6] 4	3,39	2,92	3,37	3,11	3,20	
[7] 1	3,84	3,74	3,60	3,51	3,67	3,70
[7] 2	3,96	3,66	3,86	3,70	3,79	
[7] 3	3,80	3,56	3,73	3,45	3,64	
[7] 4	3,93	3,38	3,90	3,60	3,71	

De la ***Tabla 4.15*** se puede observar que para el *e* = 0,7 mm el diámetro promedio total es de 3,24 mm esto a la presión de trabajo fijada 2 Bar (251 N), mientras que para el *e* = 0,9 mm la óptima soldadura se alcanzó a los 754 N (6 Bar) con un diámetro promedio total de 3,73 mm y para el *e* = 1,1 mm no se halló una óptima soldadura debido a que es necesario aplicar una fuerza mayor a la máxima que es capaz de trasmitir el actuador neumático 880 N (7 Bar). Esto se debe porque al aumentar el espesor de la lámina y manteniendo las mismas condiciones de trabajo (intensidad de corriente y tiempo de unión) se requiere aplicar más fuerza para alcanzar una buena soldadura.

En la ***Figura 4.29*** se puede apreciar que para un mismo espesor de lámina (0,9 mm y 1,1 mm) el tamaño de las huellas aumenta a medida que la fuerza también lo hace y la calidad superficial de éstas va mejorando hasta alcanzar el valor de la fuerza óptima (754 N), luego a partir de este valor presentan una calidad superficial regular.

Debido a que no se alcanzó el valor de la fuerza necesaria para obtener una óptima soldadura para el *e* = 1,1 mm, no se elaboró la curva que refleja el comportamiento de ésta en función del espesor de la lámina.

- ***e* = 0,9 mm.**

Siguiendo la misma metodología aplicada con *e* = 0,7 mm, pero variando los valores de intensidad de corriente y tiempo de unión (Ver ***Tabla 4.14***) se realizaron puntos de soldadura para los espesores de lámina restantes (0,7 mm y 1,1 mm). A continuación se muestran los resultados obtenidos en el ensayo.

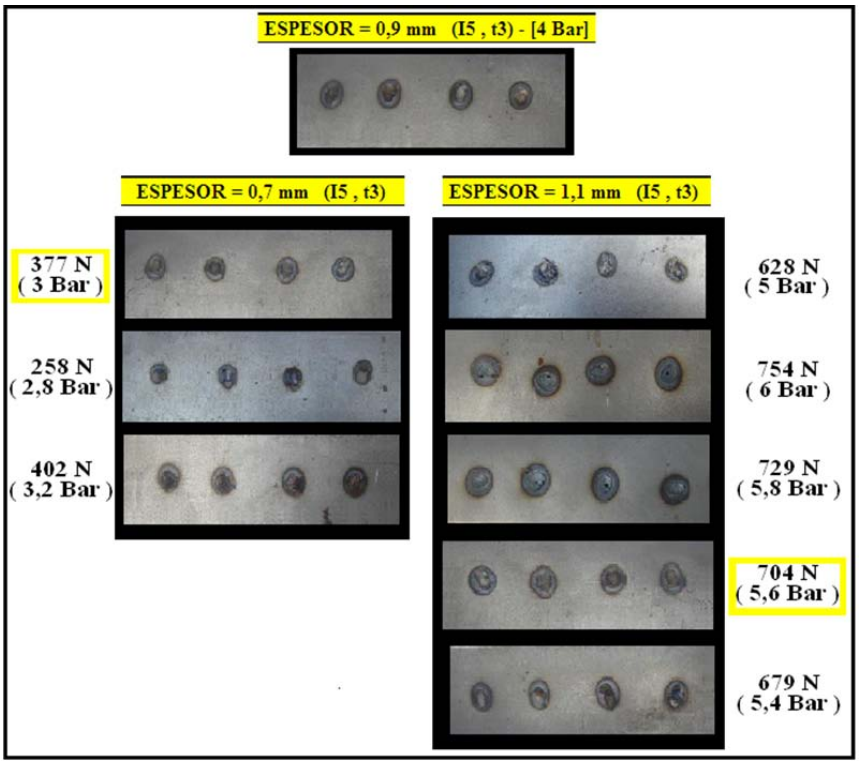


Figura 4.30 *Probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de e = 0,9 mm (I_5: 6530A, t_3: 14 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

Tabla 4.16 *Diámetros de las huellas de las probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de e = 0,9 mm (I_5: 6530A, t_3: 14 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

ESPESOR = 0,9 mm (I5 , t3)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[4] 1	4,01	4,17	3,98	4,13	4,07	3,88
[4] 2	3,94	3,83	3,72	3,54	3,76	
[4] 3	3,77	4,06	3,90	4,11	3,96	
[4] 4	3,67	3,87	3,61	3,80	3,74	

ESPESOR = 0,7 mm (I5 , t3)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[3] 1	3,48	3,62	3,45	3,59	3,54	3,37
[3] 2	3,42	3,33	3,23	3,07	3,26	
[3] 3	3,27	3,53	3,39	3,57	3,44	
[3] 4	3,19	3,36	3,14	3,29	3,24	
[2,8] 1	3,15	3,27	3,12	3,24	3,19	3,04
[2,8] 2	3,09	3,00	2,92	2,78	2,95	
[2,8] 3	2,96	3,19	3,06	3,22	3,11	
[2,8] 4	2,88	3,03	2,83	2,98	2,93	
[3,2] 1	3,59	3,73	3,56	3,70	3,65	3,48
[3,2] 2	3,53	3,43	3,33	3,17	3,36	
[3,2] 3	3,38	3,64	3,50	3,68	3,55	
[3,2] 4	3,29	3,46	3,23	3,40	3,35	

ESPESOR = 1,1 mm (I5 , t3)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[5] 1	3,32	3,45	3,29	3,42	3,37	3,21
[5] 2	3,26	3,17	3,08	2,93	3,11	
[5] 3	3,12	3,36	3,23	3,40	3,28	
[5] 4	3,04	3,20	2,99	3,14	3,09	
[6] 1	5,06	5,26	5,02	5,22	5,14	4,90
[6] 2	4,97	4,83	4,70	4,47	4,74	
[6] 3	4,76	5,13	4,93	5,19	5,00	
[6] 4	4,64	4,88	4,56	4,79	4,72	
[5,8] 1	4,68	4,86	4,64	4,82	4,75	4,53
[5,8] 2	4,60	4,47	4,34	4,13	4,38	
[5,8] 3	4,40	4,74	4,55	4,79	4,62	
[5,8] 4	4,28	4,51	4,21	4,43	4,36	
[5,6] 1	4,43	4,61	4,39	4,57	4,50	4,29
[5,6] 2	4,35	4,23	4,11	3,91	4,15	
[5,6] 3	4,17	4,49	4,31	4,54	4,38	
[5,6] 4	4,06	4,27	3,99	4,19	4,13	
[5,4] 1	4,13	4,30	4,10	4,26	4,20	4,00
[5,4] 2	4,06	3,95	3,84	3,65	3,87	
[5,4] 3	3,89	4,18	4,02	4,23	4,08	
[5,4] 4	3,79	3,99	3,72	3,91	3,85	

De la ***Tabla 4.16*** se puede observar que para el *e* = 0,9 mm el diámetro promedio total es de 3,88 mm esto a la presión de trabajo fijada 4 Bar (503 N), mientras que para el *e* = 0,7 mm la óptima soldadura se alcanzó a los 377 N (3 Bar) con un diámetro promedio total de 3,37 mm y para el *e* = 1,1 mm se alcanzó a los 704 N (5,6 Bar) con un diámetro promedio total de 4,29 mm.

En la ***Figura 4.30*** se puede apreciar que para un mismo espesor de lámina (0,7 mm y 1,1 mm) el tamaño de las huellas aumenta a medida que la fuerza también lo hace y la calidad superficial de éstas va mejorando hasta alcanzar el valor de la fuerza óptima

377 N y 704 N respectivamente, luego a partir de este valor presentan una calidad superficial regular.

Debido a que se conoce el valor de la fuerza óptima para alcanzar una buena soldadura en cada espesor de lámina, se elaboró la curva que refleja el comportamiento de ésta en función del espesor bajo los mismos parámetros (I_5: 6530A, t_3: 14 ciclos).

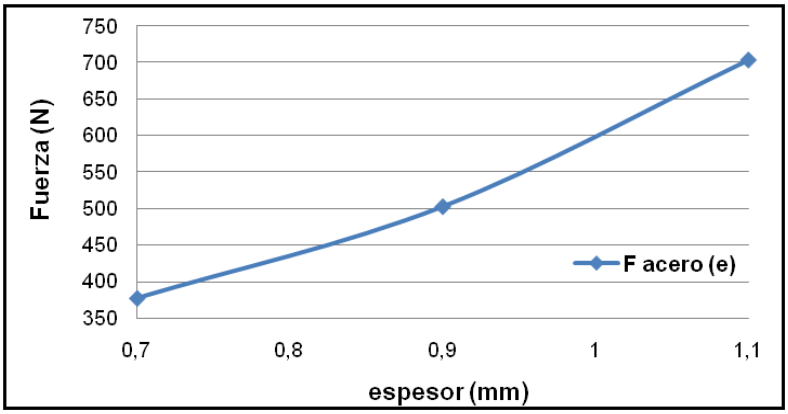


Figura 4.31 *Gráfica (F vs e) del acero bajo las condiciones (I_5: 6530A, t_3: 14 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

La curva de la ***Figura 4.31*** fue elaborada solo con tres puntos que corresponden a los espesores ensayados, y con la finalidad de obtener una mejor precisión de los valores de fuerza para distintos espesores se determinó la ecuación que representa dicha curva, para ello haciendo uso del programa Microsoft Excel se modelaron líneas de tendencias con su respectiva ecuación las cuales se muestran a continuación:

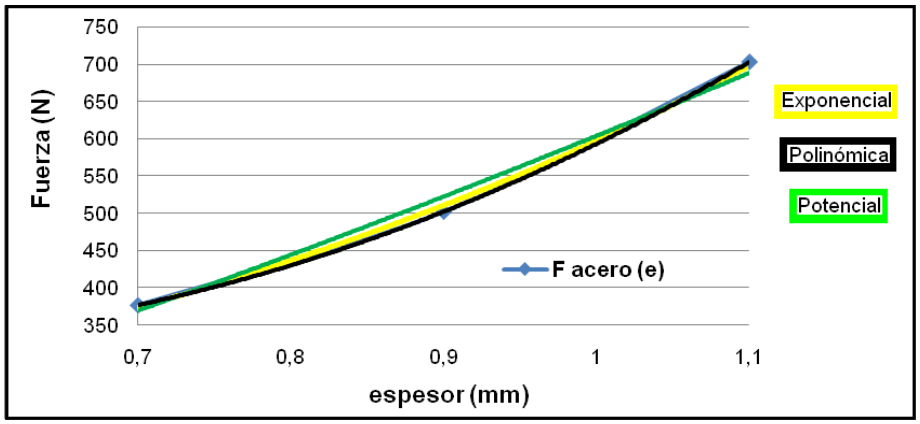


Figura 4.32 *Líneas de tendencias de la gráfica (F vs e) del acero bajo las condiciones (I_5: 6530A, t_3: 14 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

Tabla 4.17 *Ecuaciones de las líneas de tendencias de la gráfica (F vs e) del acero bajo las condiciones (I_5: 6530A, t_3: 14 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

Tendencia	Ecuación	Grado de correlación (R^2)
Exponencial	$F = (125,44).2,7182^{(1,5604.e)}$	0,998
Polinómica	$F = 942,48.e^2 - 879,65.e + 530,93$	1
Potencial	$F = 604,12.e^{1,3711}$	0,988

En las ecuaciones de la ***Tabla 4.17*** se consiguió el valor de la fuerza en función de los espesores ensayados, para así determinar cuál de éstas arroja los valores más cercanos a los experimentales. Donde:

***F*:** Fuerza aplicada a los electrodos (Newton).

***e*:** Espesor de la lámina (mm).

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 4.18 *Valores de fuerza para cada ecuación de las líneas de tendencias de la gráfica (F vs e) del acero bajo las condiciones (I_5: 6530A, t_3: 14 ciclos) evaluados en los espesores ensayados, S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

	espesor (mm)			
	0,7	0,9	1,1	
Fuerza real (Newton)	**377**	**503**	**704**	
				Tendencia
FUERZA (Newton)	373,95	510,9	698,03	Exponencial
	376,98	**502,65**	**703,72**	**Polinómica**
	370,46	522,86	688,46	Potencial

En función a los resultados de la ***Tabla 4.18*** se puede apreciar que la ecuación de la tendencia polinómica arroja los valores de fuerza más cercanos a los reales, por lo que ésta es la ecuación que rige el comportamiento de la curva de la fuerza en función del espesor bajo las condiciones ***(I_5: 6530A, t_3: 14 ciclos)***, ver ***Figura 4.31***.

$$F = 942,48.e^2 - 879,65.e + 530,93 \qquad \text{(Ec. 4.3)}$$

- ***e* = 1,1 mm.**

Ahora con los valores de intensidad de corriente y tiempo de unión para este espesor (Ver ***Tabla 4.14***) se realizaron puntos de soldadura al resto de los espesores de lámina (0,7 mm y 0,9 mm).

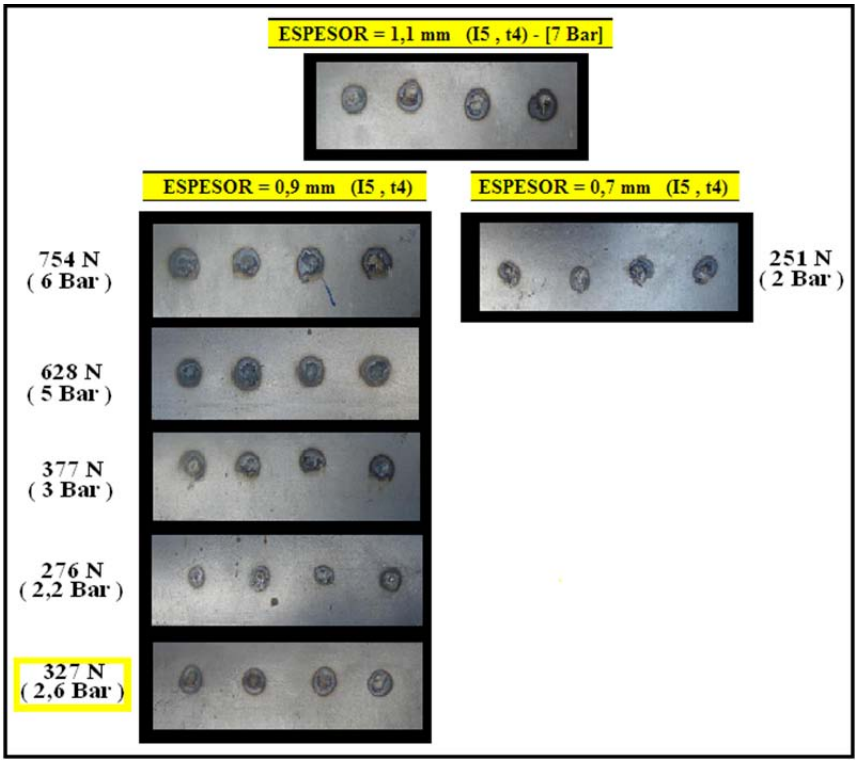


Figura 4.33 *Probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de e = 1,1 mm (I_5: 6660 A, t_5: 24 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

Tabla 4.19 *Diámetros de las huellas de las probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de e = 1,1 mm (I_5: 6660 A, t_5: 24 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

ESPESOR = 1,1 mm (I5 , t4)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[7] 1	4,17	4,33	4,06	4,44	4,25	4,28
[7] 2	4,46	4,24	4,28	4,58	4,39	
[7] 3	4,32	4,12	4,00	4,40	4,21	
[7] 4	4,52	3,92	4,17	4,54	4,29	

ESPESOR = 0,9 mm (I5 , t4)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[6] 1	6,24	6,48	6,08	6,64	6,36	6,41
[6] 2	6,68	6,34	6,40	6,86	6,57	
[6] 3	6,46	6,16	5,98	6,58	6,30	
[6] 4	6,76	5,86	6,24	6,80	6,42	
[5] 1	5,53	5,74	5,39	5,88	5,64	5,68
[5] 2	5,92	5,62	5,67	6,08	5,82	
[5] 3	5,72	5,46	5,30	5,83	5,58	
[5] 4	5,99	5,19	5,53	6,03	5,68	
[3] 1	4,23	4,40	4,13	4,51	4,32	4,35
[3] 2	4,53	4,30	4,34	4,65	4,46	
[3] 3	4,38	4,18	4,06	4,46	4,27	
[3] 4	4,59	3,98	4,23	4,61	4,35	
[2,2] 1	3,18	3,30	3,10	3,38	3,24	3,26
[2,2] 2	3,40	3,23	3,26	3,49	3,35	
[2,2] 3	3,29	3,14	3,05	3,35	3,21	
[2,2] 4	3,44	2,98	3,18	3,46	3,27	
[2,6] 1	3,86	4,01	3,76	4,10	3,93	3,96
[2,6] 2	4,13	3,92	3,96	4,24	4,06	
[2,6] 3	3,99	3,81	3,70	4,07	3,89	
[2,6] 4	4,18	3,62	3,86	4,20	3,97	

ESPESOR = 0,7 mm (I5 , t4)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[2] 1	3,71	3,81	3,58	3,90	3,75	3,77
[2] 2	3,93	3,73	3,76	4,03	3,86	
[2] 3	3,80	3,62	3,52	3,87	3,70	
[2] 4	3,98	3,45	3,67	4,00	3,77	

De la ***Tabla 4.19*** se puede observar que para el *e* = 1,1 mm el diámetro promedio total es de 4,28 mm esto a la presión de trabajo fijada 7 Bar (880 N), mientras que para el *e* = 0,9 mm la óptima soldadura se alcanzó a los 327 N (2,6 Bar) con un diámetro promedio total de 3,96 mm y para el *e* = 0,7 mm no se halló una óptima soldadura debido a que es necesario aplicar una fuerza menor a la mínima del rango de trabajo 251 N (2 Bar). Esto se debe porque al disminuir el espesor de la lámina y manteniendo las mismas condiciones de trabajo (intensidad de corriente y tiempo de unión) se requiere aplicar menos fuerza para alcanzar una buena soldadura.

En la ***Figura 4.33*** se puede apreciar que para un mismo espesor de lámina (0,9 mm) el tamaño de las huellas disminuye a medida que la fuerza también lo hace y la calidad superficial de éstas va mejorando hasta alcanzar el valor de la fuerza óptima 327 N (2,6 Bar).

Debido a que no se alcanzó el valor de la fuerza necesaria para obtener una óptima soldadura para el e = 0,7 mm, no se elaboró la curva que refleja el comportamiento de ésta en función del espesor de la lámina.

4.3.2 Ensayos con probetas de aluminio 3003*h*14.

Para determinar la buena soldadura se midió el diámetro de la huella externa dejada por los electrodos de igual forma que se midieron las huellas en las probetas de acero, pero en este caso se tomó como referencia los valores de los diámetros promedio totales de la ***Tabla 4.14***.

- ***e* = 0,8 mm.**

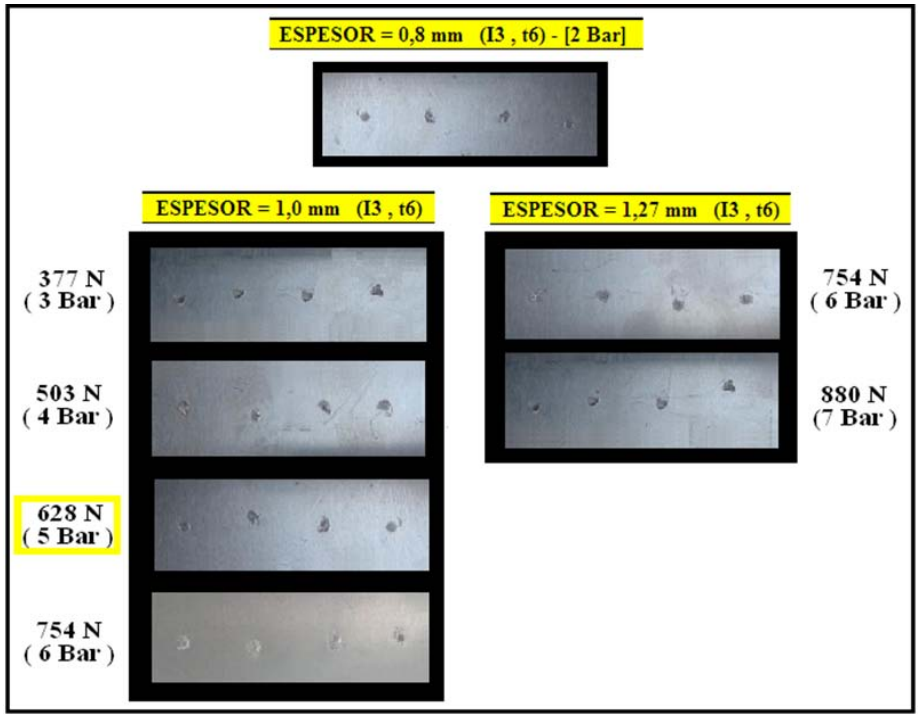


Figura 4.34 *Probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de e = 0,8 mm (I_3: 5350 A, t_6: 32 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

Tabla 4.20 *Diámetros de las huellas de las probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de e = 0,8 mm (I_3: 5350 A, t_6: 32 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

ESPESOR = 0,8 mm (I3 , t6)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[2] 1	1,80	1,76	1,69	1,65	1,72	1,74
[2] 2	1,86	1,72	1,81	1,73	1,78	
[2] 3	1,78	1,67	1,75	1,62	1,71	
[2] 4	1,84	1,59	1,83	1,69	1,74	

ESPESOR = 1,0 mm (I3 , t6)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[3] 1	1,38	1,35	1,30	1,27	1,33	1,34
[3] 2	1,43	1,32	1,39	1,33	1,37	
[3] 3	1,37	1,28	1,35	1,25	1,31	
[3] 4	1,42	1,22	1,41	1,30	1,34	
[4] 1	1,61	1,57	1,51	1,48	1,54	1,56
[4] 2	1,67	1,54	1,62	1,55	1,59	
[4] 3	1,60	1,50	1,57	1,45	1,53	
[4] 4	1,65	1,42	1,64	1,51	1,56	
[5] 1	1,87	1,83	1,76	1,71	1,79	1,81
[5] 2	1,93	1,79	1,88	1,80	1,85	
[5] 3	1,85	1,74	1,82	1,69	1,77	
[5] 4	1,92	1,65	1,91	1,76	1,81	
[6] 1	2,10	2,05	1,97	1,92	2,01	2,03
[6] 2	2,17	2,00	2,11	2,02	2,08	
[6] 3	2,08	1,95	2,04	1,89	1,99	
[6] 4	2,15	1,85	2,14	1,97	2,03	

ESPESOR = 1,27 mm (I3 , t6)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[6] 1	1,70	1,66	1,60	1,56	1,63	1,64
[6] 2	1,75	1,62	1,71	1,64	1,68	
[6] 3	1,68	1,58	1,65	1,53	1,61	
[6] 4	1,74	1,50	1,73	1,60	1,64	
[7] 1	1,96	1,91	1,84	1,79	1,88	1,89
[7] 2	2,02	1,87	1,97	1,89	1,94	
[7] 3	1,94	1,82	1,91	1,76	1,86	
[7] 4	2,01	1,73	1,99	1,84	1,89	

De la ***Tabla 4.20*** se puede observar que para el *e* = 0,8 mm el diámetro promedio total es de 1,74 mm esto a la presión de trabajo fijada 2 Bar (251 N), mientras que para el *e* = 1,0 mm la óptima soldadura se alcanzó a los 628 N (5 Bar) con un diámetro promedio total de 1,81 mm y para el *e* = 1,27 mm no se halló una óptima soldadura debido a que es necesario aplicar una fuerza mayor a la máxima que es capaz de trasmitir el actuador neumático 880 N (7 Bar). Esto se debe porque al aumentar el espesor de la lámina y manteniendo las mismas condiciones de trabajo (intensidad de corriente y tiempo de unión) se requiere aplicar más fuerza para alcanzar una buena soldadura.

En la ***Figura 4.34*** se puede apreciar que la calidad superficial en la mayoría de las huellas es buena y para un mismo espesor de lámina (1,0 mm y 1,27 mm) los tamaños de las mismas son muy parecidos entre sí.

Debido a que no se alcanzó el valor de la fuerza necesaria para obtener una óptima soldadura para el e = 1,27 mm, no se elaboró la curva que refleja el comportamiento de ésta en función del espesor de la lámina.

- ***e* = 1,0 mm.**

Ahora con los valores de intensidad de corriente y tiempo de unión para este espesor (Ver ***Tabla 4.14***) se realizaron puntos de soldadura al resto de los espesores de lámina (0,8 mm y 1,27 mm).

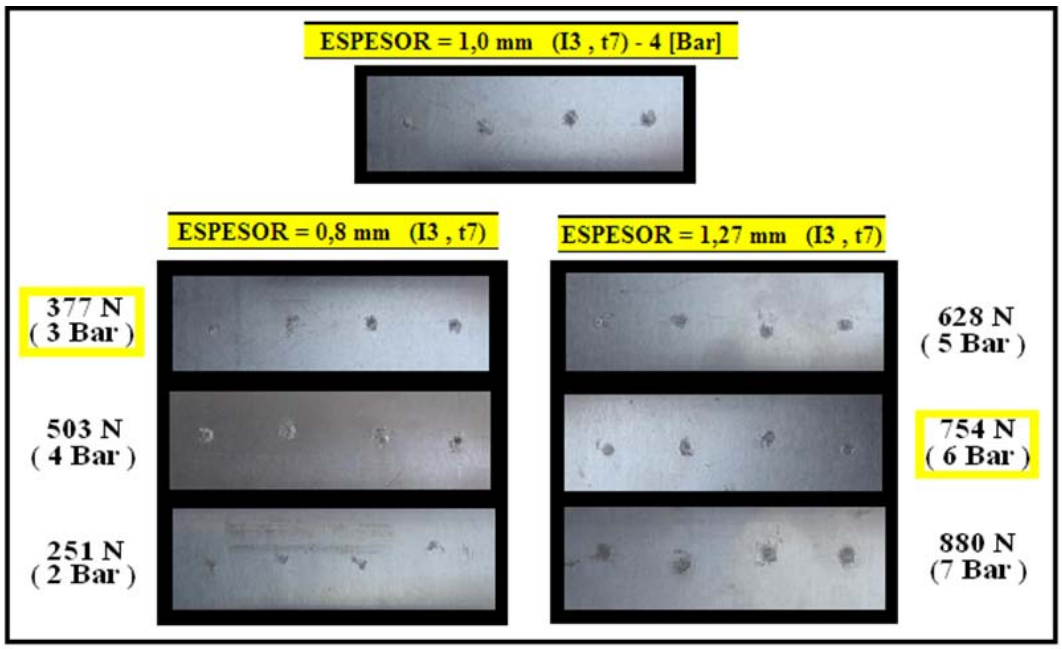


Figura 4.35 *Probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de e = 1,0 mm (I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

Tabla 4.21 *Diámetros de las huellas de las probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de e = 1,0 mm (I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

ESPESOR = 1,0 mm (I3 , t7)						
Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[4] 1	1,99	2,06	1,97	2,05	2,02	1,92
[4] 2	1,95	1,90	1,84	1,75	1,86	
[4] 3	1,87	2,01	1,93	2,03	1,96	
[4] 4	1,82	1,91	1,79	1,88	1,85	

ESPESOR = 0,8 mm (I3 , t7)						
Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[3] 1	1,71	1,77	1,69	1,76	1,73	1,65
[3] 2	1,68	1,63	1,58	1,51	1,60	
[3] 3	1,60	1,73	1,66	1,75	1,68	
[3] 4	1,56	1,64	1,54	1,61	1,59	
[4] 1	2,07	2,15	2,05	2,13	2,10	2,00
[4] 2	2,03	1,97	1,92	1,82	1,94	
[4] 3	1,94	2,09	2,01	2,12	2,04	
[4] 4	1,89	1,99	1,86	1,96	1,93	
[2] 1	1,44	1,49	1,42	1,48	1,46	1,39
[2] 2	1,41	1,37	1,33	1,27	1,34	
[2] 3	1,35	1,45	1,40	1,47	1,42	
[2] 4	1,31	1,38	1,29	1,36	1,34	

ESPESOR = 1,27 mm (I3 , t7)						
Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[5] 1	2,11	2,20	2,10	2,18	2,15	2,05
[5] 2	2,08	2,02	1,96	1,87	1,98	
[5] 3	1,99	2,14	2,06	2,17	2,09	
[5] 4	1,94	2,04	1,90	2,00	1,97	
[6] 1	2,42	2,52	2,40	2,49	2,46	2,34
[6] 2	2,38	2,31	2,24	2,13	2,27	
[6] 3	2,27	2,45	2,35	2,48	2,39	
[6] 4	2,22	2,33	2,18	2,29	2,25	
[7] 1	2,85	2,96	2,83	2,94	2,90	2,76
[7] 2	2,80	2,72	2,65	2,52	2,67	
[7] 3	2,68	2,89	2,77	2,92	2,82	
[7] 4	2,61	2,75	2,57	2,70	2,66	

De la ***Tabla 4.21*** se puede observar que para el *e* = 1,0 mm el diámetro promedio total es de 1,92 mm esto a la presión de trabajo fijada 4 Bar (503 N), mientras que para el *e* = 0,8 mm la óptima soldadura se alcanzó a los 377 N (3 Bar) con un diámetro promedio total de 1,65 mm y para el *e* = 1,27 mm se alcanzó a los 754 N (6 Bar) con un diámetro promedio total de 2,34 mm.

En la ***Figura 4.35*** se puede apreciar que la calidad superficial de las huellas para un mismo espesor de lámina (0,8 mm y 1,27 mm) es buena hasta alcanzar el valor de la fuerza óptima 377 N y 754 N respectivamente, luego a partir de estos valores presentan una calidad superficial regular, y los tamaños de las mismas son muy parecidos entre sí.

Debido a que se conoce el valor de la fuerza óptima para alcanzar una buena soldadura en cada espesor de lámina, se elaboró la curva que refleja el comportamiento de ésta en función del espesor bajo los mismos parámetros (I_3: 5360A, t_7: 42 ciclos).

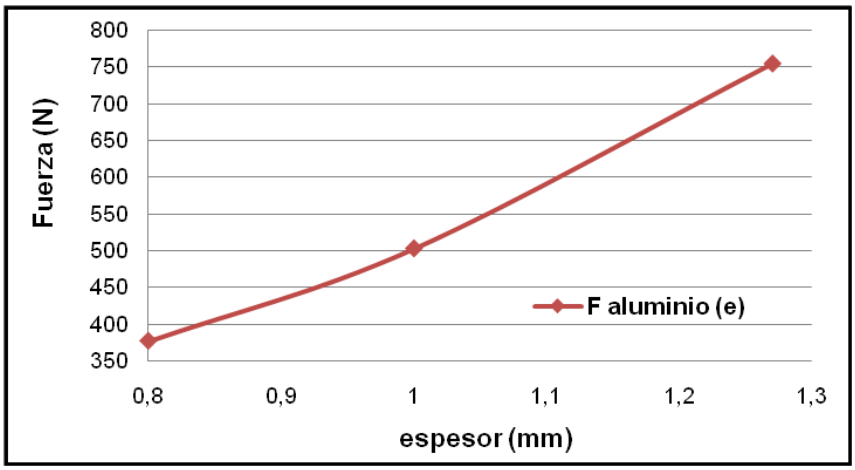


Figura 4.36 *Gráfica (F vs e) del aluminio bajo las condiciones (I_3: 5360A, t_7: 42 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

La curva de la ***Figura 4.36*** fue elaborada solo con tres puntos que corresponden a los espesores ensayados, y con la finalidad de obtener una mejor precisión de los valores de fuerza para distintos espesores se determinó la ecuación que representa dicha curva, para ello haciendo uso del programa Microsoft Excel se modelaron líneas de tendencias con su respectiva ecuación las cuales se muestran a continuación:

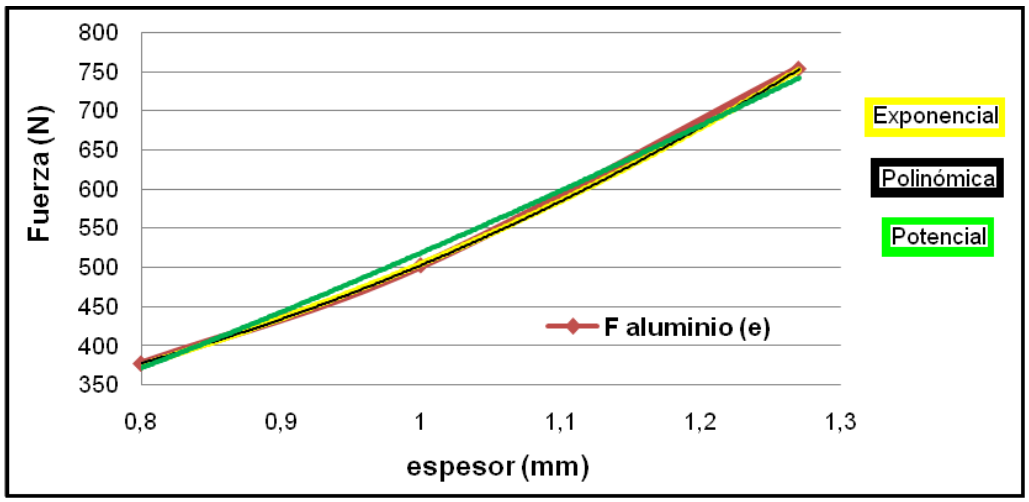


Figura 4.37 *Líneas de tendencias de la gráfica (F vs e) del aluminio bajo las condiciones (I_3: 5360A, t_7: 42 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

Tabla 4.22 *Ecuaciones de las líneas de tendencias de la gráfica (F vs e) del aluminio bajo las condiciones (I_3: 5360A, t_7: 42 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

Tendencia	Ecuación	Grado de correlación (R^2)
Exponencial	$F = (115,40).2,7182^{(1,4763.e)}$	0,9999
Polinómica	$F = 643,67.e^2 - 530,28.e + 389,27$	1
Potencial	$F = 518,64.e^{1,5021}$	0,9939

En las ecuaciones de la ***Tabla 4.22*** se consiguió el valor de la fuerza en función de los espesores ensayados, para así determinar cuál de éstas arroja los valores más cercanos a los experimentales. Donde:

***F*:** Fuerza aplicada a los electrodos (Newton).

***e*:** Espesor de la lámina (mm).

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 4.23 *Valores de fuerza para cada ecuación de las líneas de tendencias de la gráfica (F vs e) del aluminio bajo las condiciones (I_3: 5360A, t_7: 42 ciclos) evaluados en los espesores ensayados, S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

	espesor (mm)			
	0,8	1,0	1,27	
Fuerza real (Newton)	**377**	**503**	**754**	
				Tendencia
FUERZA (Newton)	375,95	505,07	752,43	Exponencial
	376,98	**502,66**	**753,99**	**Polinómica**
	370,48	518	741,75	Potencial

En función a los resultados de la ***Tabla 4.23*** se puede apreciar que la ecuación de la tendencia polinómica arroja los valores de fuerza más cercanos a los reales, por lo que ésta es la ecuación que rige el comportamiento de la curva de la fuerza en función del espesor bajo las condiciones ***(I_3: 5360A, t_7: 42 ciclos)***, ver ***Figura 4.36***.

$$F = 643,67.e^2 - 530,28.e + 389,27 \qquad \text{(Ec. 4.4)}$$

- ***e* = 1,27 mm.**

Ahora con los valores de intensidad de corriente y tiempo de unión para este espesor (Ver ***Tabla 4.14***) se realizaron puntos de soldadura al resto de los espesores de lámina (0,8 mm y 1,0 mm).

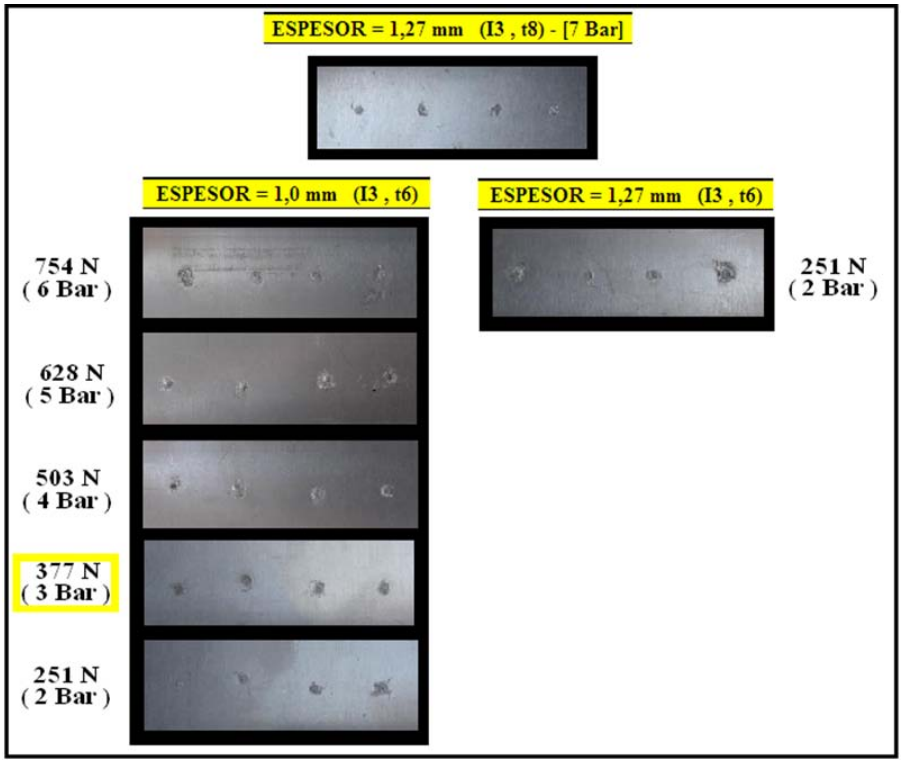


Figura 4.38 *Probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de e = 1,27 mm (I_3: 5380 A, t_8: 59 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

Tabla 4.24 *Diámetros de las huellas de las probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de e = 1,27 mm (I_3: 5380 A, t_8: 59 ciclos), S/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

ESPESOR = 1,27 mm (I3 , t8) - [7 Bar]

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[7] 1	2,22	2,30	2,16	2,36	2,26	2,28
[7] 2	2,37	2,25	2,27	2,44	2,33	
[7] 3	2,29	2,19	2,12	2,34	2,24	
[7] 4	2,40	2,08	2,22	2,42	2,28	

ESPESOR = 1,0 mm (I3 , t8)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[6] 1	2,49	2,58	2,42	2,65	2,53	2,55
[6] 2	2,66	2,53	2,55	2,73	2,62	
[6] 3	2,57	2,45	2,38	2,62	2,51	
[6] 4	2,69	2,34	2,49	2,71	2,56	
[5] 1	2,34	2,43	2,28	2,49	2,38	2,40
[5] 2	2,50	2,37	2,40	2,57	2,46	
[5] 3	2,42	2,31	2,24	2,46	2,36	
[5] 4	2,53	2,19	2,34	2,55	2,40	
[4] 1	2,15	2,23	2,10	2,29	2,19	2,21
[4] 2	2,30	2,18	2,21	2,36	2,26	
[4] 3	2,23	2,12	2,06	2,27	2,17	
[4] 4	2,33	2,02	2,15	2,34	2,21	
[3] 1	1,93	2,01	1,88	2,06	1,97	1,99
[3] 2	2,07	1,96	1,98	2,13	2,04	
[3] 3	2,00	1,91	1,85	2,04	1,95	
[3] 4	2,10	1,82	1,93	2,11	1,99	
[2] 1	1,66	1,73	1,62	1,77	1,69	1,71
[2] 2	1,78	1,69	1,70	1,83	1,75	
[2] 3	1,72	1,64	1,59	1,75	1,68	
[2] 4	1,80	1,56	1,66	1,81	1,71	

ESPESOR = 0,8 mm (I3 , t8)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[2] 1	2,17	2,25	2,11	2,30	2,21	2,22
[2] 2	2,32	2,20	2,22	2,38	2,28	
[2] 3	2,24	2,14	2,08	2,28	2,18	
[2] 4	2,35	2,03	2,17	2,36	2,23	

De la ***Tabla 4.24*** se puede observar que para el *e* = 1,27 mm el diámetro promedio total es de 2,28 mm esto a la presión de trabajo fijada 7 Bar (880 N), mientras que para el *e* = 1,0 mm la óptima soldadura se alcanzó a los 377 N (3 Bar) con un diámetro promedio total de 1,99 mm y para el *e* = 0,8 mm no se halló una óptima soldadura debido a que es necesario aplicar una fuerza menor a la mínima del rango de trabajo 251 N (2 Bar). Esto se debe porque al disminuir el espesor de la lámina y manteniendo las mismas condiciones de trabajo (intensidad de corriente y tiempo de unión) se requiere aplicar menos fuerza para alcanzar una buena soldadura.

En la ***Figura 4.38*** se puede apreciar que la calidad superficial en la mayoría de las huellas es regular y para un mismo espesor de lámina (1,0 mm) los tamaños de las mismas son muy parecidos entre sí.

Debido a que no se alcanzó el valor de la fuerza necesaria para obtener una óptima soldadura para el e = 0,8 mm, no se elaboró la curva que refleja el comportamiento de ésta en función del espesor de la lámina.

4.4 Ensayos de soldadura por resistencia eléctrica en función del espesor de lámina y la fuerza aplicada a los electrodos (con enfriamiento interno en los electrodos).

Este ensayo se realizó únicamente bajo las condiciones de intensidad de corriente y tiempo de unión donde se logró elaborar la curva que refleja el comportamiento de la fuerza en función del espesor en el ensayo anterior (0,9 mm para el acero y 1,0 mm para el aluminio), esto con la finalidad de determinar la influencia del sistema de enfriamiento en los electrodos y ver como repercute sobre la calidad de la soldadura.

4.4.1 Ensayos con probetas de acero bajo las condiciones de *(I_5: 65430 A, t_3: 14 ciclos)*.

- ***e* = 0,9 mm.**

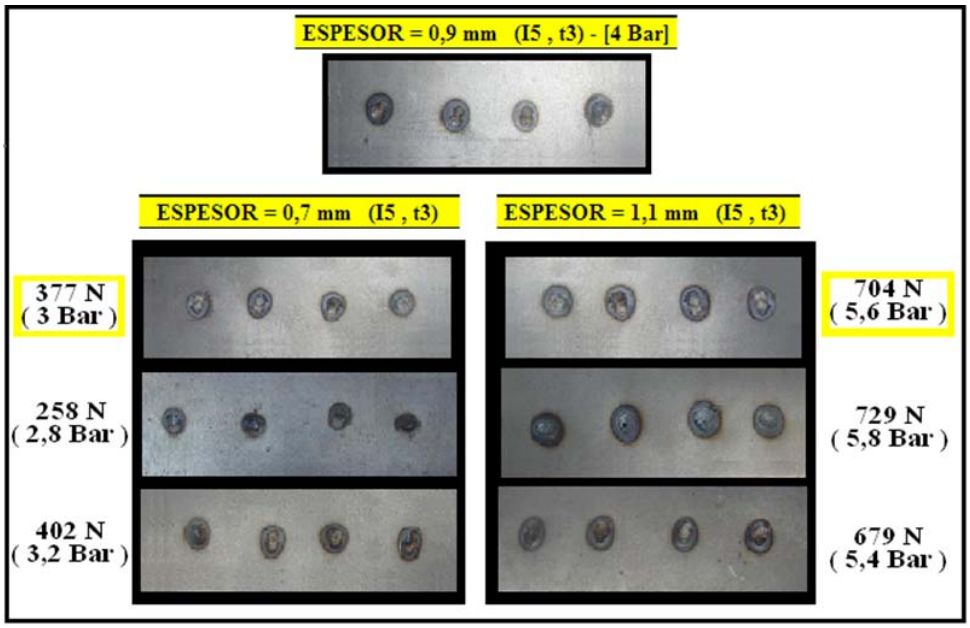


Figura 4.39 *Probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de e = 0,9 mm (I_5: 65430A, t_3: 14 ciclos), C/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

Tabla 4.25 *Diámetros de las huellas de las probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de e = 0,9 mm (I_5: 65430A, t_3: 14 ciclos), C/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

ESPESOR = 0,9 mm (I5 , t3)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[4] 1	4,05	3,86	4,01	3,89	3,95	3,77
[4] 2	3,72	3,61	3,43	3,82	3,65	
[4] 3	3,94	3,79	3,99	3,66	3,84	
[4] 4	3,75	3,50	3,68	3,56	3,63	

ESPESOR = 0,7 mm (I5 , t3)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[3] 1	3,56	3,39	3,53	3,42	3,48	3,31
[3] 2	3,27	3,18	3,02	3,36	3,21	
[3] 3	3,47	3,33	3,51	3,22	3,38	
[3] 4	3,30	3,08	3,24	3,13	3,19	
[2,8] 1	3,21	3,06	3,18	3,08	3,13	2,98
[2,8] 2	2,95	2,86	2,72	3,03	2,89	
[2,8] 3	3,12	3,00	3,16	2,90	3,05	
[2,8] 4	2,97	2,78	2,92	2,82	2,87	
[3,2] 1	3,61	3,45	3,58	3,48	3,53	3,36
[3,2] 2	3,32	3,22	3,07	3,41	3,26	
[3,2] 3	3,52	3,38	3,56	3,27	3,43	
[3,2] 4	3,35	3,13	3,29	3,18	3,24	

ESPESOR = 1,1 mm (I5 , t3)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[5,6] 1	4,48	4,27	4,44	4,31	4,38	4,17
[5,6] 2	4,12	4,00	3,81	4,24	4,04	
[5,6] 3	4,37	4,20	4,42	4,05	4,26	
[5,6] 4	4,16	3,88	4,08	3,95	4,02	
[5,8] 1	4,73	4,51	4,69	4,55	4,62	4,40
[5,8] 2	4,35	4,22	4,02	4,47	4,26	
[5,8] 3	4,61	4,43	4,66	4,28	4,49	
[5,8] 4	4,39	4,10	4,30	4,17	4,24	
[5,4] 1	4,23	4,03	4,19	4,07	4,13	3,94
[5,4] 2	3,88	3,77	3,59	3,99	3,81	
[5,4] 3	4,12	3,96	4,17	3,82	4,02	
[5,4] 4	3,92	3,66	3,85	3,72	3,79	

De la ***Tabla 4.25*** se puede observar que para el *e* = 0,9 mm el diámetro promedio total es de 3,77 mm esto a la presión de trabajo fijada 4 Bar (503 N), mientras que para el *e* = 0,7 mm la óptima soldadura se alcanzó a los 377 N (3 Bar) con un diámetro promedio total de 3,31 mm y para el *e* = 1,1 mm se alcanzó a los 704 N (5,6 Bar) con un diámetro promedio total de 4,17 mm. Al comparar estos valores con los del ensayo bajo las mismas condiciones pero S/E se aprecia que la variación es muy pequeña. A continuación se muestra dicha comparación:

Tabla 4.26 *Comparación de los valores de los diámetros de las huellas de las probetas de acero ensayadas bajo las condiciones de e = 0,9 mm (I_5: 65430A, t_3: 14 ciclos), S/E y C/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

Espesor de lamina (mm)	Presión (Bar)	Fuerza (Newton)	D prom total (mm)	
			S/E	C/E
0,7	2,8	352	3,04	2,98
	3	377	3,37	3,31
	3,2	402	3,48	3,36
0,9	4	503	3,88	3,77
1,1	5,4	679	4,00	3,94
	5,6	704	4,29	4,17
	5,8	729	4,53	4,40

Al comparar las huellas de la ***Figura 4.39*** con las del ensayo bajo las mismas condiciones pero S/E (Ver ***Figura 4.30***) se aprecia que todas las huellas presentan una mejor calidad superficial.

Debido a que en este ensayo los valores de la fuerza óptima donde se alcanzó una buena soldadura coincidieron con los del ensayo bajo las mismas condiciones pero S/E, la curva que refleja el comportamiento de la fuerza en función del espesor es la misma y por ende la ecuación también.

$$F = 942{,}48.T^2 - 879{,}65.T + 530{,}93 \qquad \text{(Ec. 4.5)}$$

4.4.2 Ensayos con probetas de aluminio bajo las condiciones de *(I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos).*

- ***e* = 1,0 mm.**

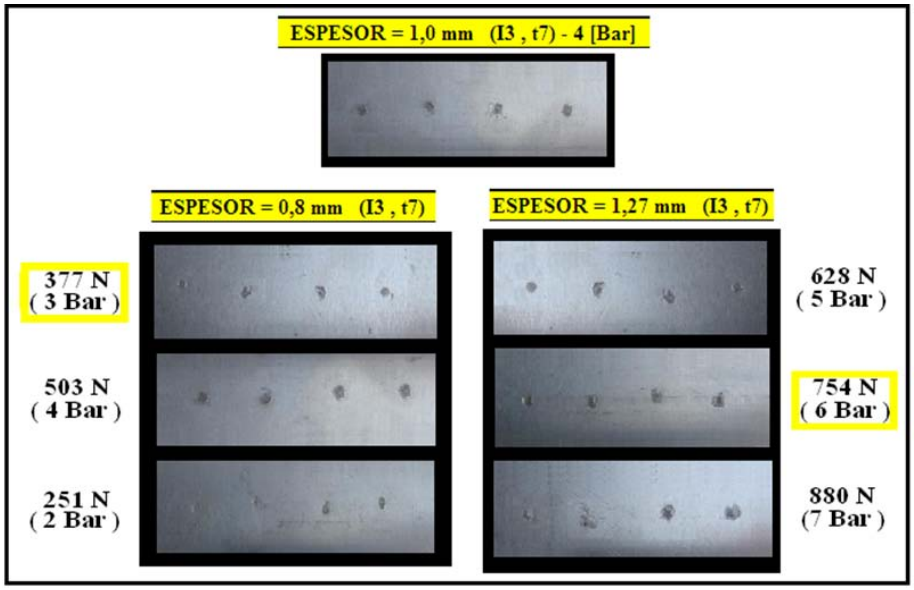


Figura 4.40 *Probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de e = 1,0 mm (I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos), C/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

Tabla 4.27 *Diámetros de las huellas de las probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de e = 1,0 mm (I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos), C/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

ESPESOR = 1,0 mm (I3 , t7)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[4] 1	1,98	1,89	1,96	1,90	1,93	1,84
[4] 2	1,82	1,77	1,68	1,87	1,78	
[4] 3	1,93	1,85	1,95	1,79	1,88	
[4] 4	1,83	1,71	1,80	1,74	1,77	

ESPESOR = 0,8 mm (I3 , t7)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[3] 1	1,68	1,61	1,67	1,62	1,65	1,57
[3] 2	1,55	1,50	1,43	1,59	1,52	
[3] 3	1,64	1,58	1,66	1,52	1,60	
[3] 4	1,56	1,46	1,53	1,48	1,51	
[4] 1	2,08	1,99	2,07	2,00	2,03	1,94
[4] 2	1,91	1,86	1,77	1,97	1,88	
[4] 3	2,03	1,95	2,05	1,88	1,98	
[4] 4	1,93	1,80	1,90	1,84	1,87	
[2] 1	1,41	1,35	1,40	1,36	1,38	1,31
[2] 2	1,30	1,26	1,20	1,33	1,27	
[2] 3	1,37	1,32	1,39	1,28	1,34	
[2] 4	1,31	1,22	1,28	1,24	1,26	

ESPESOR = 1,27 mm (I3 , t7)

Muestra	D_1	D_2	D_3	D_4	D prom	D prom total
[5] 1	2,14	2,04	2,12	2,06	2,09	1,99
[5] 2	1,97	1,91	1,82	2,02	1,93	
[5] 3	2,08	2,00	2,11	1,93	2,03	
[5] 4	1,98	1,85	1,95	1,89	1,92	
[6] 1	2,47	2,35	2,44	2,37	2,41	2,29
[6] 2	2,26	2,20	2,09	2,33	2,22	
[6] 3	2,40	2,31	2,43	2,23	2,34	
[6] 4	2,29	2,14	2,24	2,17	2,21	
[7] 1	2,89	2,75	2,86	2,78	2,82	2,69
[7] 2	2,65	2,58	2,45	2,73	2,60	
[7] 3	2,81	2,70	2,84	2,61	2,74	
[7] 4	2,68	2,50	2,63	2,54	2,59	

De la ***Tabla 4.27*** se puede observar que para el *e* = 1,0 mm el diámetro promedio total es de 1,84 mm esto a la presión de trabajo fijada 4 Bar (503 N), mientras que para el *e* = 0,8 mm la óptima soldadura se alcanzó a los 377 N (3 Bar) con un diámetro promedio total de 1,57 mm y para el *e* = 1,27 mm se alcanzó a los 754 N (6 Bar) con un diámetro promedio total de 2,29 mm. Al comparar estos valores con los del ensayo bajo las mismas condiciones pero S/E se aprecia que la variación es muy pequeña. A continuación se muestra dicha comparación:

Tabla 4.28 *Comparación de los valores de los diámetros de las huellas de las probetas de aluminio ensayadas bajo las condiciones de e = 1,0 mm (I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos), S/E y C/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

Espesor de lamina (mm)	Presión (Bar)	Fuerza (Newton)	D prom total (mm)	
			S/E	C/E
0,8	2	251	1,39	1,31
	3	377	1,65	1,57
	4	503	2,00	1,94
1,0	4	503	1,92	1,84
1,27	5	628	2,05	1,99
	6	754	2,34	2,29
	7	880	2,76	2,69

Al comparar las huellas de la ***Figura 4.40*** con las del ensayo bajo las mismas condiciones pero S/E (Ver ***Figura 4.35***) se aprecia que todas las huellas presentan una mejor calidad superficial.

Debido a que en este ensayo los valores de la fuerza óptima donde se alcanzó una buena soldadura coincidieron con los del ensayo bajo las mismas condiciones pero S/E, la curva que refleja el comportamiento de la fuerza en función del espesor es la misma y por ende la ecuación también.

$$F = 643{,}67.T^2 - 530{,}28.T + 389{,}27 \qquad \text{(Ec. 4.6)}$$

A continuación se ilustra mediante un gráfico la comparación del comportamiento *(F vs e)* para cada material bajo sus respectivas condiciones.

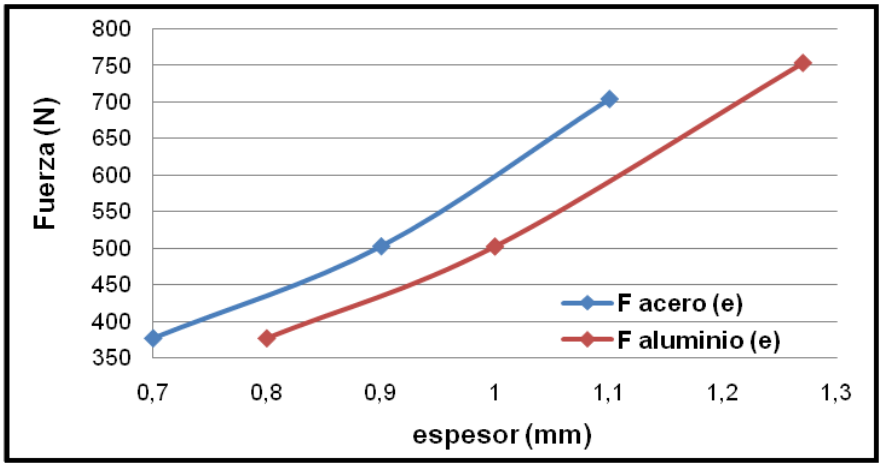


Figura 4.41 *Gráfica (F vs e) del acero y del aluminio bajo las condiciones (I_5: 6530 A, t_3: 14 ciclos) y (I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos) respectivamente, S/E y C/E.* ***(Fuente propia, 2009)***

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

FACULTAD DE INGENIERIA

5.1 Conclusiones.

- Durante las pruebas pilotos a mayores espesores de la lámina se requirieron de tiempos de unión más largos e intensidades de corriente más elevadas en función de cada material, para obtener una soldadura de calidad.

- La ecuación que rige el comportamiento de la curva *(F vs e)* para el acero es: $\boldsymbol{F = 942{,}48.e^2 - 879{,}65.e + 530{,}93}$ con un grado de correlación $\boldsymbol{R^2=1.}$ La misma es válida para espesores comprendidos entre 0,7 mm y 1,1 mm, los parámetros más adecuados para realizar la soldadura son *(I_5: 6530 A, t_3: 14 ciclos)*, esto cumple para ambas condiciones (con y sin enfriamiento interno en los electrodos).

- La ecuación que rige el comportamiento de la curva *(F vs e)* para el aluminio es: $\boldsymbol{F = 643{,}67.e^2 - 530{,}28.e + 389{,}27}$ con un grado de correlación $\boldsymbol{R^2=1.}$ La misma es válida para espesores comprendidos entre 0,8 mm y 1,27 mm, los parámetros más adecuados para realizar la soldadura son *(I_3: 5360 A, t_7: 42 ciclos)*, esto cumple para ambas condiciones (con y sin enfriamiento interno en los electrodos).

- Una vez obtenido el comportamiento de la curva *(F vs e)* para ambos materiales, se verificó que los resultados experimentales corresponden con el comportamiento teórico de las ecuaciones De Heredia, al aumentar el espesor de lámina a soldar, mayor es la fuerza que se requiere para obtener una soldadura de calidad.

- Las curvas que reflejan el comportamiento *(F vs e)* para cada material presentan una tendencia similar, sin embargo para un mismo espesor de lámina se requiere aplicar mayor fuerza y emplear tiempos de unión más largos e intensidades de corrientes más elevadas en el acero, debido a que éste posee un punto de fusión más elevado en comparación con el del aluminio.

- El sistema de enfriamiento interno en los electrodos durante el proceso de soldadura repercute en la mejoría de la calidad superficial de ésta, sin embargo es poco notable porque la reducción del diámetro de la huella dejada por los electrodos en comparación cuando no se utiliza este sistema es despreciable.

5.2 Recomendaciones.

- Realizar el proyecto de investigación pero empleando mas espesores a los utilizados en éste, con la finalidad de ampliar el rango de trabajo de la curva *(F vs e)*.

- Realizar el proyecto de investigación manteniendo los espesores de láminas utilizados pero cambiando el tipo de material a soldar, y así verificar como varia la fuerza aplicada a los electrodos en relación al acero y al aluminio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Aslanlar S., Ogur A., Ozsara U. y Ilhan E. (2007). Efecto del tiempo de soldadura en las propiedades mecánicas de las hojas de automoción en la soldadura por electro punto. Facultad de Ciencias Aplicadas, Universidad de Sakarya, Sakarya-Turquía. Materiales y Diseño: Volumen 29, Número 7, Páginas: 1427-1431.

[2] Castellano A. y Cardozo F. (2009). Determinación del desgaste de electrodos utilizados en la soldadura por resistencia eléctrica de acero estructural de bajo carbono a dos espesores diferentes. Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo, Valencia-Venezuela.

[3] Chang B. H. y Zhou Y. (2003). Estudio numérico sobre el efecto de la fuerza de los electrodos en la soldadura por electro punto a pequeña escala. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Waterloo, Canadá. Journal of Materials Processing Technology, Volumen 139, Números 1-3, Páginas: 635-641.

[4] De Heredia R. (1959). Soldadura y Construcción Soldada. Madrid: Editorial Dossat, S.A.

[5] Dorta D. y Ortega D. (2006). Determinación de la vida útil de los electrodos en la soldadura de aluminio por resistencia eléctrica. Tesis de grado no publicada, Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo, Valencia-Venezuela.

[6] Enriquez A. y Malavé R. (2004). Determinación de la relación entre la geometría y la vida útil de los electrodos en la soldadura por resistencia eléctrica. Tesis de grado no publicada, Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo, Valencia-Venezuela.

[7] Enriquez A. y Malavé R. (2004). Manual de soldadura por resistencia eléctrica. Electro-Punto. Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo, Valencia-Venezuela.

[8] Hasanbasoglu A. y Kacar R. (2006). Resistencia de la soldadura por electro punto en distintos materiales ((Aceros) AISI-316L, DIN EN 10130-99). Departamento de Educación de metal, Facultad de Educación Técnica, Karabuk – Turquía. Materiales y Diseño: Volumen 28, Número 6, Páginas: 1794-1800.

[9] Horwitz H. (1990). SOLDADURA, Aplicaciones y Práctica. México: Editorial Alfaomega.

[10] Karci F., Kacar R. y Gunduz S. (2008). Parámetros y propiedades en el proceso de soldadura por electro punto del acero inoxidable austenítico AISI304 deformado en frío. Departamento de Educación de metal, Facultad de Educación Técnica, Karabuk – Turquía. Journal of Materials Processing Technology. Volumen 153, Número 2, Páginas: 117-121.

[11] Marashi P., Abedi A. y Goodarzi M. (2007). Comportamientos disímiles entre la resistencia y microestructura de soldadura por electro punto en aceros galvanizado y acero inoxidable austenítico de baja emisión de carbono. Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Minería, Universidad de Tecnología de Amirkabir, Teherán – Irán. Ciencia de los Materiales e Ingeniería: Volumen 480, Números 1-2, Páginas: 175-180.

[12] O`Brien R. (1996). Manual de soldadura: Tomo II. (8va Edición). México: Pearson Educación.

[13] Pender J. (2001). Soldadura (3ra Edición). Madrid España. Editorial Mc Graw Hill.

[14] Tuffaloy Resistance Welding Products. (1998) Catálogo 980. Tuffaloy Products. USA.

[15] Xu J., Jiang X. y Zeng Q. (2007). Optimización de la resistencia a la soldadura por electro punto en el montaje de la aleación refractaria (50%Mo – 50%Re). Departamento de Química y de Ingeniería de Materiales, Universidad de Kentucky, Lexington - EE.UU. Journal of Nuclear Materials. Volumen 366, Número 3, Páginas: 417-425.