



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**MODELO PARA LA PREDICCIÓN DEL
COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA
A LA TRACCIÓN DE UN CORDÓN DE
SOLDADURA (SMAW) AFECTADO POR UN
DEFECTO PARA UN ACERO AISI 1010**

Autores:

Bencomo B. Kevin D.

C.I.: 24.330.379

Molina M. Robert F.

C.I.: 24.553.131

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**MODELO PARA LA PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE UN CORDÓN DE SOLDADURA
(SMAW) AFECTADO POR UN DEFECTO PARA UN ACERO AISI 1010**

**Trabajo especial de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Autores:

Bencomo B. Kevin D.

C.I.: 24.330.379

Molina M. Robert F.

C.I.: 24.553.131

Tutor: Ing. Camejo T. Franklin J.

San Diego, noviembre de 2017



Universidad José Antonio Páez
Facultad de Ingeniería

FI-TG-060-2017-2

Valencia, 07 de Julio de 2017.

Ciudadanos.

Bencomo Kevin

C.I. 24.330.379

Molina Robert

C.I. 24.553.131

Presente.-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 2-2017 de fecha 07/07/2017 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **“MODELO PARA LA PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE UN CORDÓN DE SOLDADURA (SMAW) AFECTADO POR UN DEFECTO PARA UN ACERO AISI 1010”** presentado por usted(es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Franklin Camejo, C.I. 13.045.723 y la Ing. Alicia Pizzella, C.I. 4.598.880 como Tutotes Académicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Ing. José Gregorio Díaz

Decano de la Facultad de Ingeniería

c. c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (2).

JGD/ fr



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Franklin Camejo portador de la cédula de identidad N° 13.045.753, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por los ciudadanos Kevin Bencomo, portador de la cedula de identidad N° 24.330.379 y Robert Molina, portador de la cedula de identidad N° 24.553.131 titulado **MODELO PARA LA PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE UN CORDÓN DE SOLDADURA (SMAW) AFECTADO POR UN DEFECTO PARA UN ACERO AISI 1010**, presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 17 días del mes de octubre del año dos mil diecisiete.

Ing. Franklin Camejo

C.I.: 13.045.723

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, gracias a Dios por permitirnos vivir la experiencia de realizar estudios universitarios, por darnos la salud, la fuerza y la sabiduría para concretar todas nuestras metas y nuestro sueño de ser ingenieros mecánicos.

Gracias a nuestros mentores, nuestro tutor Profesor Franklin Camejo y al Profesor Tomás González que se convirtieron en nuestros guías a lo largo de esta travesía agradeciéndole todos los conocimientos aportados, que nos ayudaron no solo en la realización del trabajo de grado si no que serán de utilidad a lo largo de nuestro desempeño como profesionales.

A nuestros padres por habernos apoyados desde que tenemos memoria y habernos proporcionado la mejor educación y lecciones de vida, por ser constantes motivadoras a seguir en el camino del logro de nuestras metas personales y académicas.

A nuestros hermanos, familiares y seres queridos, por habernos proporcionado su apoyo incondicional, en cada una de las decisiones tomadas en nuestro camino.

A nuestros compañeros de clases y amigos que se han convertido en hermanos de vida, por compartir con nosotros cada uno de los momentos vividos a lo largo de esta travesía y ser partícipes en todo momento de las experiencias vividas.

A cada una de las personas que nos encontramos a lo largo de este viaje, que por alguna otra razón se convirtieron en motor de motivación a continuar cada día más y que nos hicieron ver la vida de una forma diferente.

Gracias a todos.

ÍNDICE

| CONTENIDO | pp. |
|---------------------------------|-------------|
| AGRADECIMIENTOS..... | v |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | ix |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | xii |
| ÍNDICE DE GRÁFICAS..... | xiii |
| ÍNDICE DE CUADROS..... | xiv |
| RESUMEN INFORMATIVO..... | xv |
| INTRODUCCIÓN | 1 |

CAPÍTULO

I EL PROBLEMA

| | |
|--|---|
| 1.1 Planteamiento del problema. | 3 |
| 1.2 Formulación del problema..... | 4 |
| 1.3 Objetivos. | 4 |
| 1.3.1 Objetivo General..... | 4 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos. | 4 |
| 1.4 Justificación de la investigación..... | 5 |
| 1.5 Alcance..... | 6 |

II MARCO TEÓRICO

| | |
|--|----|
| 2.1 Antecedentes..... | 4 |
| 2.2 Bases Teóricas..... | 10 |
| 2.2.1 Generalidades del acero..... | 10 |
| 2.2.2 Clasificación del acero..... | 12 |
| 2.2.3 Designación AISI/SAE de las aleaciones de los aceros. | 14 |

| | |
|--|----|
| 2.2.4 Características del acero al carbono 1010..... | 15 |
| 2.2.5 Tratamientos térmicos del acero..... | 17 |
| 2.2.6 Normalizado..... | 18 |
| 2.2.7 Soldaduras..... | 19 |
| 2.2.8 Soldabilidad en los aceros al carbono..... | 21 |
| 2.2.9 Soldadura con arco eléctrico..... | 23 |
| 2.2.10 Defecto de soldadura..... | 24 |
| 2.2.11 Ensayo de tracción..... | 30 |
| 2.2.12 Fracturas..... | 31 |
| 2.2.13 Curvas esfuerzo – deformación..... | 32 |
| 2.2.14 Ensayo de doblado..... | 33 |
| 2.2.15 Ensayo de dureza..... | 35 |
| 2.2.16 Macroscopía y microscopía..... | 36 |
| 2.2.17 Tipos de juntas soldadas..... | 37 |
| 2.2.18 Nomenclatura del electrodo E6013..... | 38 |
| 2.2.19 Regresión lineal..... | 39 |
| 2.2.20 Software matemático..... | 41 |
| 2.3. Definición de términos básicos..... | 41 |

III MARCO METODOLÓGICO

| | |
|--|----|
| 3.1 Tipo de investigación..... | 43 |
| 3.2 Diseño de la investigación..... | 44 |
| 3.3 Nivel de investigación..... | 44 |
| 3.4 Población y muestra..... | 44 |
| 3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos..... | 45 |
| 3.6 Fases de la investigación..... | 46 |

IV RESULTADOS

| | |
|---|----|
| 4.1 Variables que afectan la resistencia del cordón de soldadura..... | 59 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| 4.1.1 Selección del número de probetas soldadas para ensayo de tracción... 59 | 59 |
| 4.1.2 Parámetros utilizados en el proceso de soldadura SMAW..... 59 | 59 |
| 4.1.2 Lista de defectos utilizados en la inspección..... 60 | 60 |
| 4.2 Efecto de cada variable sobre el comportamiento de la resistencia a la tracción del cordón de soldadura..... 60 | 60 |
| 4.2.1 Resultados del corte del material..... 60 | 60 |
| 4.2.2 Resultados de soldadura de las muestras..... 61 | 61 |
| 4.2.3 Resultados de corte para probetas de tracción y doblado..... 61 | 61 |
| 4.2.4 Resultados de mecanizado de las probetas de tracción..... 62 | 62 |
| 4.2.1 Resultados del ensayo de tracción..... 62 | 62 |
| 4.2.2 Resultados del ensayo de doblado..... 70 | 70 |
| 4.2.3 Resultados del ensayo de micro-dureza vickers..... 71 | 71 |
| 4.3 Evaluación de resultados para obtener el comportamiento de la resistencia a la tracción del cordón de soldadura..... 76 | 76 |
| 4.3.1 Resultados de macroscopía..... 76 | 76 |
| 4.3.2 Resultados de microscopía..... 90 | 90 |
| 4.4 Obtención del modelo del comportamiento de la resistencia a la tracción del cordón de soldadura..... 99 | 99 |

V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | |
|------------------------------|-----|
| 5.1 Conclusiones..... 106 | 106 |
| 5.2 Recomendaciones..... 108 | 108 |

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....109

ANEXOS 113

ANEXO A 114

ÍNDICE DE FIGURAS

| CONTENIDO | pp. |
|--|------------|
| FIGURA | |
| 1 Microestructura de un acero AISI 1010 normalizado..... | 19 |
| 2 Porosidad dispersada..... | 25 |
| 3 Porosidad tubular..... | 25 |
| 4 Porosidad alineada..... | 26 |
| 5 Porosidad alargada..... | 26 |
| 6 Fusión Incompleta..... | 27 |
| 7 Fusión Incompleta en la superficie de la Ranura..... | 27 |
| 8 Fusión Incompleta entre soldadura y metal base..... | 27 |
| 9 Penetración incompleta..... | 28 |
| 10 Inclusiones de escoria..... | 28 |
| 11 Grietas longitudinales..... | 29 |
| 12 Grietas transversales..... | 30 |
| 13 Tipos de fracturas a tracción..... | 32 |
| 14 Probeta para ensayo de tracción..... | 34 |
| 15 Curva típica esfuerzo-deformación..... | 35 |
| 16 Espécimen de probeta de soldadura..... | 49 |
| 17 Máquina de ensayo de tracción..... | 50 |
| 18 Ensayo de doblado con apoyo en tres puntos..... | 52 |
| 19 Muestras utilizadas en ensayo micro-dureza..... | 53 |
| 20 Máquina de ensayo micro-dureza BUEHLER..... | 53 |
| 21 Muestras utilizadas en macroscopía..... | 54 |
| 22 Microscopio óptico ACCU-SCOPE..... | 56 |
| 23 Herramienta del análisis de datos de Excel..... | 57 |
| 24 Cuadro de diálogo del análisis de datos..... | 57 |
| 25 Cuadro de diálogo de la regresión..... | 58 |
| 26 Muestras obtenidas del corte del material..... | 60 |
| 27 Muestra después del proceso de soldadura..... | 61 |
| 28 Probetas obtenidas para tracción y doblado..... | 61 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 29 | Probetas de tracción soldadas y mecanizadas..... | 62 |
| 30 | Probetas de tracción para caracterización mecanizadas..... | 62 |
| 31 | Probetas soldadas utilizadas en el ensayo de tracción..... | 63 |
| 32 | Probetas para caracterización utilizadas en el ensayo de tracción..... | 63 |
| 33 | Esfuerzo máximo a tracción de un acero AISI 1010 normalizado..... | 69 |
| 34 | Muestra 3 utilizada en macroscopía..... | 76 |
| 35 | Muestra 5 utilizada en macroscopía..... | 77 |
| 36 | Muestra 8 utilizada en macroscopía..... | 77 |
| 37 | Muestra 11 utilizada en macroscopía..... | 78 |
| 38 | Muestra 13 utilizada en macroscopía..... | 78 |
| 39 | Metal base de la muestra 1 a 400x..... | 90 |
| 40 | Límite entre la zona afectada por el calor y la zona del metal base de la muestra 1 a 100x..... | 91 |
| 41 | Límite entre la zona afectada por el calor y la zona del metal base de la muestra 1 a 400x..... | 91 |
| 42 | Solidificación en distintas zonas del cordón de la muestra 1 a 100x..... | 92 |
| 43 | Límite entre la zona afectada por el calor y la zona del metal base de la muestra 5 a 100x..... | 92 |
| 44 | Zona afectada por el calor de la muestra 5 a 400x..... | 93 |
| 45 | Zona del metal base de la muestra 5 a 400x..... | 93 |
| 46 | Zona afectada por el calor de la muestra 8 a 400x..... | 94 |
| 47 | Zona del metal base de la muestra 8 a 400x..... | 94 |
| 48 | Solidificación en distintas zonas del cordón de la muestra 10 a 100x..... | 95 |
| 49 | Zona del metal base de la muestra 10 a 400x..... | 95 |
| 50 | Zona afectada por el calor de la muestra 10 a 400x..... | 96 |
| 51 | Zona del metal base de la muestra 15 a 400x..... | 96 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 52 | Solidificación en distintas zonas del cordón de la muestra 15 a 100x..... | 97 |
| 53 | Franja negra en la muestra de caracterización a 400x..... | 97 |
| 54 | Muestra de caracterización a 400x..... | 98 |
| 55 | Comparación longitudinal de las microscopías de un acero AISI 1010 normalizado con el material estudiado..... | 98 |

ÍNDICE DE TABLAS

| CONTENIDO | | pp. |
|------------------|---|------------|
| TABLA | | |
| 1 | Propiedades del acero al carbono AISI 1010..... | 16 |
| 2 | Composición química del acero 1010 | 17 |
| 3 | Parámetros utilizados en el proceso de soldadura SMAW..... | 59 |
| 4 | Datos obtenidos del ensayo de tracción del grupo 1..... | 63 |
| 5 | Datos obtenidos del ensayo de tracción del grupo 2..... | 64 |
| 6 | Datos obtenidos del ensayo de tracción del grupo 3..... | 64 |
| 7 | Datos obtenidos del ensayo de tracción del grupo 4..... | 65 |
| 8 | Datos obtenidos del ensayo de tracción del grupo 5..... | 65 |
| 9 | Resistencia, fractura y parámetros de grupos ensayados..... | 66 |
| 10 | Datos obtenidos del ensayo de tracción para caracterización... | 69 |
| 11 | Aceptación de muestras de doblado y parámetros utilizados... | 70 |
| 12 | Resultados de micro-dureza vickers de las muestras..... | 71 |
| 13 | Muestras analizadas en macroscopía..... | 77 |
| 14 | Defectos encontrados por muestra parte 1..... | 79 |
| 15 | Defectos encontrados por muestra parte 2..... | 80 |
| 16 | Análisis total de las muestras..... | 88 |
| 17 | Estadísticas de la regresión obtenidas mediante la herramienta de análisis de datos..... | 99 |
| 18 | Promedio de los cuadrados..... | 100 |
| 19 | Variables independientes..... | 102 |
| 20 | Errores típicos..... | 102 |
| 21 | Valores de resistencia a la tracción predicha, resistencia a la tracción real, y residuales de cada probeta..... | 103 |
| 22 | Valores de resistencia a la tracción predicha, resistencia a la tracción real, y residuales de cada muestra..... | 103 |

ÍNDICE DE GRÁFICAS

| CONTENIDO | pp. |
|---|------------|
| GRÁFICA | |
| 1 Resistencia a la tracción por probetas..... | 67 |
| 2 Resistencia a la tracción por grupo..... | 68 |
| 3 Micro-dureza a lo largo de la muestra 1, grupo 1..... | 72 |
| 4 Micro-dureza a lo largo de la muestra 5, grupo 2..... | 73 |
| 5 Micro-dureza a lo largo de la muestra 8, grupo 3..... | 73 |
| 6 Micro-dureza a lo largo de la muestra 10, grupo 4..... | 74 |
| 7 Micro-dureza a lo largo de la muestra 15, grupo 5..... | 74 |
| 8 Micro-dureza a lo largo de la muestra de caracterización..... | 75 |
| 9 Micro-dureza de un acero AISI 1010 normalizado..... | 76 |
| 10 Defectos totales presentes en cada muestra..... | 81 |
| 11 Defectos totales presentes por grupo de muestras..... | 81 |
| 12 Defectos presentes en el grupo 1..... | 82 |
| 13 Defectos presentes en el grupo 2..... | 82 |
| 14 Defectos presentes en el grupo 3..... | 83 |
| 15 Defectos presentes en el grupo 4..... | 83 |
| 16 Defectos presentes en el grupo 5..... | 84 |
| 17 Defectos predominantes en total de las muestras..... | 84 |
| 18 Defectos vs resistencia a la tracción por grupo de muestras.... | 85 |
| 19 Defectos vs resistencia a la tracción por probeta..... | 86 |
| 20 Comportamiento de la resistencia por grupo de muestras en base a la fusión incompleta..... | 86 |
| 21 Comportamiento de la resistencia por muestra en base a la fusión incompleta..... | 87 |
| 22 Análisis total del grupo de muestras..... | 89 |
| 23 Análisis total de las muestras..... | 89 |
| 24 Resistencia a la tracción predicha de cada probeta..... | 104 |
| 25 Resistencia a la tracción real de cada probeta..... | 104 |
| 26 Resistencia predicha vs. la resistencia real..... | 105 |

ÍNDICE DE CUADROS

| CONTENIDO | | pp. |
|------------------|---|------------|
| CUADRO | | |
| 1 | Designación de las aleaciones de aceros..... | 14 |
| 2 | Soldabilidad por proceso..... | 22 |
| 3 | Sistema número de la AWS para los electrodos..... | 39 |
| 4 | Listado de defectos considerados..... | 60 |



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

MODELO PARA LA PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE UN CORDÓN DE SOLDADURA (SMAW) AFECTADO POR UN DEFECTO PARA UN ACERO AISI 1010

Autores: Bencomo B. Kevin D.
Molina M, Robert F.

Tutor: Ing. Camejo T. Franklin J.

Fecha: Noviembre 2017.

RESUMEN INFORMATIVO

El siguiente estudio tuvo como propósito el modelado para la predicción del comportamiento de la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura (SMAW) afectado por un defecto para un acero AISI 1010, siendo este un acero clasificado como acero de bajo carbono, el cual es una de las aleaciones metálicas más usadas en la industria, gracias a la tecnología moderna y automatización de la mano de obra. En la actualidad es uno de los materiales de fabricación y construcción más versátil y adaptable a un precio económico, combinando la resistencia y trabajabilidad. El tipo de investigación fue descriptivo, con un diseño experimental, donde la población y muestra fue un acero AISI 1010. Se aplicaron los siguientes procedimientos: Se realizó de una revisión de literatura y de medios electrónicos, para seleccionar la cantidad de probetas a utilizar, obtener parámetros a utilizar en el proceso de soldadura, defectos a encontrar en el cordón de soldadura, etc. Luego se seleccionó, cortó, mecanizó y soldó las muestras y probetas respectivas a cada ensayo a realizar, de acuerdo a normas establecidas por la ASTM y la AWS, se realizaron los ensayos mecánicos y se determinó la ductilidad, dureza, y la resistencia a la tracción de las probetas soldadas. Se evaluaron los resultados mediante análisis microscópicos y macroscópicos para obtener el comportamiento de la resistencia del cordón y el defecto predominante, finalmente los resultados obtenidos fueron analizados y modelados mediante un software matemático con la finalidad de obtener un modelo, mediante una regresión lineal, para la predicción del comportamiento de la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura en función de los parámetros establecidos y el defecto más predominante.

Descriptor: Modelado, ensayo de tracción, soldaduras, acero, resistencia, defectos.

INTRODUCCIÓN

En la industria moderna de soldaduras, se requieren los niveles más altos de calidad y seguridad operacional. Por esta razón, nuevas tecnologías de inspección están siendo desarrolladas, pero en muchos casos, no tienen información sobre la confiabilidad de las técnicas convencionales. Debido a la falta de confiabilidad, estas técnicas convencionales suelen no detectar ciertos defectos internos en las juntas soldadas, que podrían afectar la resistencia a la tracción del cordón de soldadura.

Esta investigación tiene como objetivo principal la modelación del comportamiento de la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura (SMAW) afectado por un defecto para un acero AISI 1010. La soldadura es una tarea peligrosa y se requieren precauciones para evitar quemaduras, descargas eléctricas, daño visual, inhalación de gases y vapores venenosos y exposición a radiación ultravioleta intensa.

Debido a riesgos que potencialmente pueden afectar vidas humanas, en esta investigación el cordón de soldadura del acero AISI 1010 fue sometido a diferentes ensayos, donde se analizaron los resultados obtenidos en función de las variables establecidas durante la soldadura y el defecto más predominante en el cordón; en donde así se determinó el comportamiento de la resistencia de la junta. Estos resultados sirven de base y pueden ser considerados en futuros proyectos de ingeniería con el fin de aumentar la confiabilidad y seguridad del diseño, generando y mejorando el diseño de productos en el área industrial.

El capítulo I, comprende todo el planteamiento de la problemática del tema; generalidades de los aceros, como su importancia en la actualidad a nivel industrial moderno. Está formado por la formulación de problema, el establecimiento del objetivo general y sus objetivos específicos. La importancia de esta investigación se refleja en la justificación, la cual estuvo sujeta a los resultados obtenidos, al igual que el alcance que tendrá esta investigación.

El capítulo II, este compuesto por los antecedentes referidos a trabajos realizados a nivel nacional e internacional, las bases teóricas que sustentaron la

documentación científica del trabajo y la definición de términos básicos asociados al trabajo de investigación.

El capítulo III, está referido al marco metodológico, el cual representó el plan a seguir como un conjunto ordenado de procedimientos que permitieron obtener, clasificar, comprender y organizar los datos relevantes para así plantear las soluciones al problema investigado. El marco metodológico abarcó todo lo que es tipo de investigación, diseño, población y muestra, y fases.

El capítulo IV, contiene los procedimientos, actividades y cálculos realizado en las diferentes fases del desarrollo cuya ejecución permitió la obtención del modelo propuesto.

Por último, la investigación finaliza con la presentación de las conclusiones y recomendaciones respectivas; luego la bibliografía y anexos considerados necesarios.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema.

El acero es una aleación de hierro con una cantidad de carbono que puede variar entre 0,03% y 1,075% en peso de su composición, dependiendo del grado, el acero conserva las características metálicas del hierro en estado puro, pero la adición de carbono y de otros elementos tanto metálicos como no metálicos mejora sus propiedades físico-químicas, sobre todo su resistencia. Sus dos componentes principales se encuentran en abundancia en la naturaleza, además se puede reciclar indefinidamente sin perder sus atributos, lo que favorece su producción a gran escala. Esta variedad y disponibilidad lo hace apto para numerosos usos como la construcción de maquinaria, herramientas, edificios y obras públicas, aeronáutica, industria automotriz, instrumental médico, etc. contribuyendo al desarrollo tecnológico de las sociedades industrializadas, pues ningún material logra igualarlo cuando se trata de resistencia al impacto o la fatiga.

En la actualidad es uno de los materiales de fabricación y construcción más versátil y adaptable a un precio relativamente bajo, combina la resistencia y la trabajabilidad. Asimismo, sus propiedades pueden ser manejadas de acuerdo a las necesidades específicas mediante tratamientos con calor, trabajo mecánico, o mediante aleaciones y posee la cualidad de ser maleable. Existen muchos tipos de acero según el/los elemento/s aleante/s que estén presentes, elementos que determinan características importantes del material como su soldabilidad, cada tipo de acero permitirá diferentes aplicaciones y usos, lo que lo hace un material muy difundido en la vida moderna. Uno de los métodos más eficaces para la unión de estructuras de acero es mediante el proceso de soldadura. Aunque la soldadura tiene muchas ventajas, también posee algunas desventajas como son los defectos propios del método de soldadura. Los defectos en las soldaduras son esas

imperfecciones o discontinuidades producidas fundamentalmente por la existencia de fallas metalúrgicas o discontinuidades geométricas tales como inclusiones de escoria, porosidades, grietas de solidificación, socavaciones, falta de penetración, fusión incompleta, contracciones y grietas inducidas en frío o en caliente por esfuerzos residuales. Por muchos años, los ensayos no destructivos han sido aplicados en la inspección de soldaduras como una manera eficiente de evaluar la integridad de las juntas soldadas. En la industria moderna, se requieren los niveles más altos de calidad y seguridad operacional. Por esta razón, nuevas tecnologías de inspección están siendo desarrolladas, pero en muchos casos, no tienen información sobre la confiabilidad de las técnicas convencionales.

Debido a la falta de confiabilidad, estas técnicas convencionales suelen no detectar ciertos defectos internos en las juntas soldadas, que podrían afectar la resistencia a la tracción del cordón de soldadura. Uno de los principales problemas asociados con las soldaduras en los aceros es la formación de porosidades por gases. Estos problemas son frecuentemente causados por distintos factores que ocurren durante la realización del cordón, como, por ejemplo, una mala limpieza del metal base.

1.2 Formulación del problema.

¿Cómo se comporta la resistencia de una junta soldada de un acero AISI 1010 al ser afectada por un defecto en el cordón de soldadura?

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo General.

Modelar el comportamiento de la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura (SMAW) afectado por un defecto para un acero AISI 1010.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Establecer las variables que afectan la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura (SMAW) afectado por un defecto.
- Determinar el efecto de cada variable establecida sobre el comportamiento de la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura (SMAW).
- Evaluar los resultados para obtener el comportamiento de la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura (SMAW).

- Obtener un modelo del comportamiento de la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura (SMAW), en función de las variables establecidas y el defecto más predominante.

1.4 Justificación de la investigación.

El acero es un material muy versátil y adaptable lo cual se demuestra sobre todo en su relativa facilidad de conformación tanto en caliente como en frío, su idoneidad para ser usados en aplicaciones donde se requiera soldadura, la posibilidad de ser maquinados mediante diferentes métodos, su buena resistencia a la corrosión, la posibilidad de crear piezas directamente desde la fundición, su resistencia térmica e incluso sus buenas propiedades mecánicas a altas temperaturas. Estas características convierten al acero en uno de los materiales más importantes, Por estas razones el acero se mantiene en el centro del interés tanto científico como tecnológico y seguramente seguirá jugando un papel muy importante en el futuro.

Las soldaduras es una de las técnicas más utilizadas para la unión de elementos estructurales y presenta múltiples beneficios en su aplicación, sin embargo, al producirse un defecto durante la soldadura, provocan la aparición de concentradores de esfuerzos, debido a que las técnicas convencionales suelen no detectar ciertos defectos internos en las juntas soldadas que aceleran el crecimiento de grietas, reduciendo la resistencia de la junta soldada, provocando la falla o ruptura de ésta antes del tiempo de servicio establecido en el diseño.

En esta investigación el cordón de soldadura del acero AISI 1010 fue sometido a diferentes ensayos, donde se analizaron los resultados obtenidos en función de las variables establecidas durante la soldadura y el defecto más predominante en el cordón; en donde así se determinó el comportamiento de la resistencia de la junta. Destacando que la ingeniería sigue invirtiendo tiempo y recursos en el estudio de la confiabilidad de soldaduras en el acero en busca de innovar y crear, apoyado siempre en la ciencia y tecnología, estos resultados sirven de base y pueden ser considerados en futuros proyectos de ingeniería con el fin de aumentar la confiabilidad del diseño, generando y mejorando el diseño de productos en el área industrial.

1.5 Alcance.

En esta investigación se realizó la unión de muestras del material metálico formando juntas a tope por un proceso de soldadura de arco con electrodo metálico revestido (SMAW por sus siglas en inglés), a dichas muestras se les realizó ensayos de tracción para determinar la resistencia de los cordones de soldadura afectados por un defecto, para así obtener un modelo que prediga el comportamiento de la resistencia del cordón de soldadura de una junta a tope en el acero AISI 1010 en función de variables establecidas y del defecto más predominante en dicho cordón, con el objetivo de garantizar una mayor confiabilidad en el diseño.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El marco teórico o referencial comprende la sustentación teórica de la investigación a partir de los conceptos teorías, trabajos previos relacionados con el tema de estudio, esta etapa proporcionará un conocimiento profundo de la teoría que le da significado a la investigación. Es a partir de las teorías existentes sobre el objeto de estudio, como pueden generarse nuevos conocimientos.

2.1 Antecedentes.

Miguel V. et. al (2012) en su trabajo de grado titulado “**Optimización del proceso de soldadura GMAW de uniones a tope de la aleación AA 6063-T5 basada en la metodología de superficie de respuesta y en la geometría del cordón de soldadura**”, realizado en la Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España. Indica que la geometría de los cordones de soldadura es caracterizada por el sobre-espesor, la anchura y la penetración. Estos valores son indicadores del comportamiento de la unión soldada por lo que pueden considerarse como factores de control del proceso. En ese trabajo se efectuó la optimización del proceso de soldadura por arco GMAW de la aleación AA 6063-T5 mediante la metodología de la superficie de respuesta (MSR). Las variables consideradas son la tensión del arco, la velocidad de soldeo, la velocidad de alimentación del electrodo y la separación de las superficies a unir. Las funciones de respuesta consideradas son el sobre-espesor, anchura, penetración y el ángulo del cordón. Los resultados obtenidos mediante MSR se ajustan muy bien a los valores experimentales. El procedimiento es validado experimentalmente mediante el soldeo, para las condiciones tecnológicas optimizadas obtenidas de forma teórica, existiendo una gran concordancia entre los valores teóricos y los experimentales. Este proyecto deja como aporte a la investigación un diseño experimental en el cual se obtienen ecuaciones de la modelización matemática de la penetración, sobre-espesor, ancho de cordón y ángulo de cordón, mediante el

uso de parámetros de soldeo como la separación entre piezas, velocidad de soldadura, tensión y velocidad del electrodo.

Así mismo, Vidal J. et. al (2011) en su trabajo de grado titulado **“Modelos empíricos para la predicción de la geometría del cordón en soldaduras a tope de un acero inoxidable dúplex 2205”**, realizado en la Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Muestra dos modelos empíricos que permiten predecir la geometría del cordón de soldadura a tope de un acero inoxidable dúplex tipo 2205. Para obtener dichos modelos se empleó una metodología que permite utilizar los parámetros operacionales más importantes de la soldadura, como son: la intensidad de corriente (I), el voltaje (E), la velocidad de pasada (v) y calor aportado (HI, por sus siglas en inglés). Se realizaron diferentes combinaciones de dichos parámetros para realizar la soldadura por arco sumergido (SAW). A cada muestra se le realizó la medición de la geometría del cordón a través de un barrido de 360° con 38 mediciones para obtener los modelos, los cuales luego fueron validados a través de gráficas de control. Se pudo observar que, al aumentar la intensidad de corriente y el calor aportado, aumenta la geometría del cordón, es decir, la penetración, el ancho y la altura, mientras que lo inverso ocurre cuando se incrementa la velocidad de pasada.

Al analizar este planteamiento se deduce que hay relación con el tema de estudio, ya que en este trabajo se logró encontrar dos modelos los cuales pueden realizar una predicción de una necesidad mediante la implementación de varios parámetros o variables como la corriente, el voltaje, la velocidad y el calor aportado.

Seguidamente, Espinosa L. (2011) en su trabajo de grado titulado **“Predicción de la geometría del cordón y curva de tracción en soldadura robótica de aceros dúplex por redes neuronales”**, realizado en la Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Caracas, Venezuela, para optar por el título de Magíster en Ingeniería Mecánica. Demuestra que la geometría del cordón y los valores de fluencia, esfuerzo y deformación resultantes de la curva de tracción son propiedades, tanto físicas como mecánicas, importantes en una soldadura. Existen muchos de los parámetros utilizados durante la soldadura que afectan su

geometría y su calidad. Se ha observado que la velocidad de soldadura, el voltaje y la corriente eléctrica en el proceso de soldadura robótica GMAW de aceros inoxidables dúplex SAF 2205 tienen influencia directa sobre el cordón de soldadura, así como la cantidad de calor aportado. El presente trabajo explora el uso de redes neuronales artificiales para predecir la influencia sobre la geometría del cordón y sobre las propiedades mecánicas a tracción del conjunto soldado, que tienen los parámetros de soldadura en probetas soldadas a través del proceso de arco robótico, con acero SAF 2205 como material base. Se utilizan redes neuronales del tipo *back-propagation (retro-propagación)* para asociar las variables del proceso de soldadura con las características de las geometrías del cordón y propiedades mecánicas obtenidas a través del ensayo de tracción. Este tipo de redes neuronales logra una buena concordancia con los datos de entrenamiento y ha proporcionado un modelo satisfactorio para la generalización. Las redes neuronales pueden ser implementadas efectivamente para estimar parámetros de geometría y calidad en las soldaduras, prueba de ello son los resultados de este ensayo, los cuales muestran una similitud con porcentaje de error aceptable, 23% en promedio, entre los valores experimentales y los valores teóricos estimados por la red.

El aporte más significativo de este estudio, radica en que expone la importancia de las propiedades física y mecánicas como los valores de fluencia, esfuerzo y deformación resultantes de la curva de tracción en un cordón de soldadura, además de la influencia que tienen distintos parámetros como, corriente voltaje, y calor aportado en dicho cordón. En este trabajo de grado se utilizan recursos llamados “redes neuronales artificiales” para predecir la influencia sobre la geometría del cordón y sobre las propiedades mecánicas a tracción del conjunto soldado.

Por último, Payares M. & De Barros C. (1997) en su trabajo de grado “**Modelo para la determinación del área del cordón en soldadura a tope de aluminio 6063 - T5**”, realizado en la Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Caracas, Venezuela. Dice que, para predecir la capacidad de transmisión de cargas de una junta soldada, es necesario estudiar la geometría del cordón de soldadura, a

través de las relaciones entre los parámetros de soldadura y la geometría del cordón. En los últimos años', los estudios que se han realizado para determinar los efectos de los parámetros de soldadura, sobre las características del cordón bajo el proceso GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) han establecido empíricamente la influencia entre la velocidad de soldadura y el cordón de soldadura. En esta investigación, se analizó el efecto de la intensidad de corriente, el voltaje y la velocidad de soldadura sobre el cordón de soldadura, en soldaduras a tope de aluminio 6063-T5, utilizando el proceso GMAW. Además, se estableció una expresión matemática obtenida a través de un análisis de regresión lineal múltiple que permite determinar el área del cordón de soldadura como una función de estos parámetros de soldadura concluyendo que la variable que podría tener una mayor influencia en el área del cordón de una soldadura a tope de aluminio 6063-T5 es la intensidad de corriente.

El trabajo antes señalado se vincula al estudio ya que muestra el efecto de la intensidad de corriente, el voltaje y la velocidad de sobre un cordón de soldadura, además se establece una expresión matemática para determinar el área del cordón en función de estos parámetros.

2.2 Bases Teóricas.

2.2.1 Generalidades del acero.

El hierro y el acero se utilizan ampliamente en la construcción de carreteras, ferrocarriles, infraestructuras, electrodomésticos y edificios. La mayoría de las grandes estructuras modernas, como estadios y rascacielos, puentes y aeropuertos, están apoyadas por un esqueleto de acero. Incluso aquellos con una estructura de hormigón emplean acero para reforzar. Además, se ve un uso generalizado en los electrodomésticos y los automóviles principales. Ochshorn, Jonathan (2002) comenta que, a pesar del crecimiento en el uso del aluminio, el acero sigue siendo el principal material para carrocerías de automóviles. Otras aplicaciones comunes son la construcción naval, tuberías, minería, construcción en alta mar, aeroespacial, equipo pesado como bulldozers, muebles de oficina, lana de acero, herramientas y armaduras en forma de chalecos personales o armaduras para vehículos.

Antes de la introducción del proceso de Bessemer y de otras técnicas de producción modernas, el acero era costoso y sólo se usaba cuando no existía alternativa más barata, particularmente para la vanguardia de cuchillos, maquinillas de afeitar, espadas y otros artículos donde se necesitaba un borde duro y afilado. También fue utilizado para los resortes y relojes. Con el advenimiento de métodos de producción más rápidos y más económicos, el acero se ha vuelto más fácil de obtener y mucho más económico. Ha reemplazado el hierro forjado por una multitud de propósitos.

Elert, Glenn (2009), plantea que la densidad del acero varía en función de los constituyentes de la aleación, pero normalmente oscila entre 7750 y 8050 kg /m³, ó 7,75 y 8,05 g/cm³. A menudo se añaden materiales a la mezcla de hierro-carbono para producir aceros con las propiedades deseadas. El níquel y el manganeso en acero aumentan su resistencia a la tracción y hacen que la forma de austenita de la solución de hierro-carbono sea más estable, el cromo aumenta la dureza y la temperatura de fusión y el vanadio también aumenta la dureza al hacerlo menos propenso a la fatiga del metal.

Para inhibir la corrosión, al menos 11% de cromo se añade al acero de manera que se forma un óxido duro sobre la superficie metálica; Esto se conoce como acero inoxidable. El tungsteno ralentiza la formación de cementita, manteniendo el carbono en la matriz de hierro y permitiendo que la martensita se forme preferentemente a velocidades de enfriamiento más lentas, resultando en acero de alta velocidad. Por otra parte, el azufre, el nitrógeno y el fósforo se consideran contaminantes que hacen que el acero sea más frágil y se eliminan de la masa fundida de acero durante el procesamiento.

Smith, William F. & Hashemi, Javad (2006), comentan que cuando se enfrían los aceros con exactamente un 0,8% de carbono (conocidos como acero eutectoide), la fase austenítica (FCC) de la mezcla intenta volver a la fase de ferrita (BCC). El carbono ya no encaja dentro de la estructura de austenita FCC, resultando en un exceso de carbono. Una manera de que el carbono abandone la austenita es que precipite fuera de la solución como cementita, dejando atrás una fase circundante de hierro BCC llamada ferrita con un pequeño porcentaje de

carbono en solución. Los dos, ferrita y cementita, precipitan simultáneamente la producción de una estructura en capas llamada perlita, llamada así por su parecido con la madreperla. En una composición hipereutectoide (mayor que 0,8% de carbono), el carbono precipitará primero como inclusiones grandes de cementita en los límites de grano de austenita hasta que el porcentaje de carbono en los granos haya disminuido a la composición eutectoide (0,8% de carbono), punto en el que la estructura de perlita se forma.

Para los aceros que tienen menos de 0,8% de carbono (hipoeutectoide), primero se formará ferrita dentro de los granos hasta que la composición restante se eleve a 0,8% de carbono, momento en el que se formará la estructura perlita. No se formarán grandes inclusiones de cementita en los límites del acero hipoeutectoide. Lo anterior supone que el proceso de enfriamiento es muy lento, permitiendo suficiente tiempo para que el carbono migre.

2.2.2 Clasificación del acero.

Los autores del libro *Engineering Materials*, Ashby, Michael F. & Jones, David R. H. (1992), establecen que el acero se clasifica en tres grandes grupos: acero al carbón, aleaciones de acero y aceros estándar.

Los aceros al carbono modernos se hacen con diversas combinaciones de metales de aleación para cumplir muchos propósitos. El acero al carbono, compuesto simplemente de hierro y carbono, representa el 90% de la producción de acero. El acero de baja aleación está aleado con otros elementos, usualmente molibdeno, manganeso, cromo o níquel, en cantidades de hasta 10% en peso para mejorar la templabilidad de las secciones gruesas. El acero de baja aleación de alta resistencia tiene pequeñas adiciones (usualmente <2% en peso) de otros elementos, típicamente 1,5% de manganeso, para proporcionar resistencia adicional a un modesto incremento de precios. Los aceros al carbono a menudo se galvanizan, mediante inmersión en caliente o galvanoplastia en zinc para proteger contra el óxido.

Las regulaciones recientes de la Economía de Combustible (CAFE) han dado lugar a una nueva variedad de aceros conocida como AHSS (Aceros de Alta Resistencia Avanzados). Este material es a la vez fuerte y dúctil para que las

estructuras de los vehículos puedan mantener sus niveles de seguridad actuales mientras utilizan menos material. Existen varios grados de AHSS comercialmente disponibles, como el acero de doble fase, que se trata térmicamente para contener una microestructura ferrítica y martensítica para producir un acero de alta resistencia y formable. El acero TRIP (Transformation Induced Plasticity) implica tratamientos especiales de aleación y calor para estabilizar las cantidades de austenita a temperatura ambiente en aceros ferríticos de baja aleación normalmente libres de austenita. Al aplicar tensión, la austenita sufre una transición de fase a la martensita sin la adición de calor. El acero de la plasticidad inducida del hermanamiento (TWIP) utiliza un tipo específico de tensión para aumentar la eficacia del trabajo que endurece en la aleación.

Los aceros inoxidable contienen un mínimo de 11% de cromo, a menudo combinado con níquel, para resistir la corrosión. Algunos aceros inoxidable, como los aceros inoxidable ferríticos, son magnéticos, mientras que otros, como el austenítico, son no magnéticos. Los aceros resistentes a la corrosión son abreviados como CRES. Algunos aceros más modernos incluyen aceros herramienta, que se alean con grandes cantidades de tungsteno y cobalto u otros elementos para maximizar el endurecimiento de la solución. Esto también permite el uso del endurecimiento por precipitación y mejora la resistencia a la temperatura de la aleación. Ashby, Michael F. & Jones, David R. H. (1992) comentan que el acero para herramientas se utiliza generalmente en ejes, taladros y otros dispositivos que necesitan un filo cortante de larga duración.

Bringas, John E. (2004), establece que la mayoría de las aleaciones de acero más comúnmente utilizadas se clasifican en varios grados por las organizaciones de estándares. Por ejemplo, la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) tiene una serie de grados que definen muchos tipos de acero. La Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM) tiene un conjunto separado de normas, que definen aleaciones como el acero A36, el acero estructural más utilizado en los Estados Unidos. El JIS también define series de grados de acero que se están utilizando extensamente en Japón, así como también en países del tercer mundo.

2.2.3 Designación AISI/SAE de las aleaciones de los aceros.

En las décadas de 1930 y 1940, el Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI) y la SAE participaron en los esfuerzos por normalizar este sistema de numeración para los aceros. Durante varios decenios los sistemas se unieron en un sistema conjunto designado a las calidades del acero AISI / SAE. Bringas, John E. (2004) indica que en 1995 la AISI entregó el mantenimiento futuro del sistema a SAE porque la AISI nunca escribió ninguna de las especificaciones.

Hoy en día las cotizaciones de acero y las certificaciones comúnmente hacen referencia tanto a SAE y AISI, no siempre con una diferenciación precisa. Por ejemplo, en el campo de aleación/grado, un certificado puede decir "4140", "AISI 4140" o "SAE 4140", y en la mayoría de las aplicaciones industriales ligeras se acepta cualquiera de las anteriores como adecuada y considerada equivalente para el trabajo en cuestión, siempre y cuando la especificación dada por el diseñador (por ejemplo, "4140 bar por ASTM-A108" o "4140 bar por AMS 6349") está certificada.

El sistema AISI usó un prefijo de letras para indicar el proceso de fabricación de acero. El prefijo "C" denota horno de hogar abierto, horno de arco eléctrico o horno de oxígeno básico, mientras que "E" denota acero de horno de arco eléctrico. Una letra "L" dentro del nombre del grado indica el plomo como un ingrediente añadido; Por ejemplo, 12L14 es un grado común que es 1214 con el plomo agregado para la maquinabilidad. Los tipos de acero respectivos a su designación AISI/SAE se encuentran en el cuadro 1, mostrado a continuación.

Cuadro 1. Designación de las aleaciones de aceros.

| DESIGNACIÓN AISI/SAE | TIPO |
|-----------------------------|---------------------|
| 1xxx | Aceros al carbono |
| 2xxx | Aceros de níquel |
| 3xxx | Aceros níquel-cromo |

Continuación del Cuadro 1. Designación de las aleaciones de aceros.

| DESIGNACIÓN AISI/SAE | TIPO |
|-----------------------------|----------------------------------|
| 4xxx | Aceros de molibdeno |
| 5xxx | Aceros de cromo |
| 6xxx | Aceros de cromo-vanadio |
| 7xxx | Aceros de tungsteno |
| 8xxx | Aceros de níquel-cromo-molibdeno |
| 9xxx | Aceros de silicio-manganeso |

Fuente: *SAE Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA, (1999). SAE Ferrous Materials Standards Manual.*

2.2.4 Características del acero al carbono 1010.

Si el primer dígito es uno (1) en esta designación, indica un acero al carbono. Todos los aceros al carbono pertenecen a este grupo 1xxx tanto en el sistema SAE como en el AISI. También se subdividen en cuatro categorías debido a propiedades subyacentes particulares entre ellas:

- Los aceros al carbono se incluyen dentro de la serie 10xx (conteniendo máximo de manganeso de 1,00%).
- Los aceros al carbono resulturados se incluyen dentro de la serie 11xx.
- Los aceros al carbono resulturados y refosforados se incluyen dentro de la serie 12xx.
- El acero al carbono de alto contenido de manganeso (hasta un 1,65%) no re-sulfurado se incluye dentro de la serie 15xx.

Philip D. Harvey (1982), explica que el acero al carbono es una aleación metálica. Es una combinación de dos elementos, hierro y carbono. Otros elementos están presentes en cantidades demasiado pequeñas para afectar sus propiedades. Los únicos otros elementos permitidos en acero al carbono son: manganeso (1,65% máx.), silicio (0,60% máx.) y cobre (0,60% máx.), una mejor apreciación de la composición química del acero AISI 1010 se puede apreciar en la tabla 2. El acero con un bajo contenido de carbono tiene las mismas propiedades que el hierro, suave, pero de fácil formación. A medida que aumenta el contenido de carbono, el metal se vuelve más duro y fuerte, pero menos dúctil y más difícil de soldar. Un mayor contenido de carbono reduce el punto de fusión del acero y su resistencia a la temperatura en general.

Dentro de esta categoría, está el acero AISI 1010, con una composición química de carbono igual a 0,10%. Según el autor del libro *ASM Specialty Handbook - Carbon and Alloy Steels*, J.R. Davis (1996), señala que este acero es comercialmente común, utilizado ampliamente en aplicaciones de baja resistencia. Tiene buena formabilidad, maquinabilidad adecuada, y se puede endurecer por cianuración, sus propiedades mecánicas establecidas por la ASM son mostradas en la tabla 1. Es adecuado para aplicaciones de núcleo magnético, es ideal para la industria del automóvil, donde frecuentemente se utiliza para carrocerías de automóviles, guardafangos y piezas más pequeñas, incluyendo cacerolas y cubiertas de transmisión.

Tabla 1. Propiedades del acero al carbono AISI 1010.

| PROPIEDADES MECÁNICAS | SISTEMA MÉTRICO | SISTEMA AMERICANO |
|----------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Densidad | 7,87 g/cm ³ | 0,284 lb/in ³ |
| Dureza Brinell | 105 | 105 |
| Resistencia a la tracción | 365 MPa | 52900 psi |
| Esfuerzo de fluencia | 305 MPa | 44200 psi |
| Elongación a la rotura | 20% | 20% |

Continuación de la Tabla 1. Propiedades del acero al carbono AISI 1010.

| PROPIEDADES MECÁNICAS | SISTEMA MÉTRICO | SISTEMA AMERICANO |
|----------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Reducción del área | 40% | 40% |
| Módulo de elasticidad | 205 GPa | 29700 ksi |
| Módulo de compresibilidad | 160 GPa | 23200 ksi |
| Coefficiente de Poisson | 0,29 | 0,29 |
| Maquinabilidad | 55% | 55% |
| Módulo de corte | 8,0 GPa | 11600 ksi |
| Resistividad eléctrica | 0,0000143 ohm-cm | 0,0000143 ohm-cm |

Fuente: *ASM Specialty Handbook - Carbon and Alloy Steels*, J.R. Davis (1996)

Tabla 2. Composición química del acero AISI 1010.

| ELEMENTOS DEL COMPONENTE | SISTEMA MÉTRICO | SISTEMA AMERICANO |
|---------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Carbono, C | 0,080 – 0,13 % | 0,080 – 0,13 % |
| Hierro, Fe | 99,18 – 99,62 % | 99,18 – 99,62 % |
| Manganeso, Mn | 0,30 – 0,60 % | 0,30 – 0,60 % |
| Fósforo, P | <= 0,040 % | <= 0,040 % |
| Azufre, S | <= 0,050 % | <= 0,050 % |

Fuente: *ASM Specialty Handbook - Carbon and Alloy Steels*, J.R. Davis (1996)

2.2.5 Tratamientos térmicos del acero.

Lawrence H. Van Vlack (1980), explica que el tratamiento térmico es un grupo de procesos industriales y de trabajo de metales que se utilizan para alterar las propiedades físicas y, en ocasiones, químicas de un material. La aplicación más común es en la metalúrgica. Los tratamientos térmicos también se usan en la fabricación de muchos otros materiales, como el vidrio. El tratamiento térmico

implica el uso de calentamiento o enfriamiento, normalmente a temperaturas extremas, para lograr un resultado deseado tal como el endurecimiento o ablandamiento de un material.

Las técnicas de tratamiento térmico incluyen recocido, endurecimiento de la caja, refuerzo de la precipitación, templado, normalización y enfriamiento. Cabe mencionar que si bien el término tratamiento térmico se aplica solo a procesos donde el calentamiento y enfriamiento se realizan con el propósito específico de alterar propiedades intencionalmente, la calefacción y la refrigeración a menudo ocurren incidentalmente durante otros procesos de fabricación como la conformación en caliente o la soldadura.

2.2.6 Normalizado.

Los aceros que han sufrido deformación plástica consisten en perlitas de forma irregular y relativamente grandes, pero que varían en tamaño. William D. Callister, Jr. (1994), define a la normalización como un tratamiento térmico que es utilizado en el acero para refinar su estructura cristalina y producir una distribución del tamaño de grano más uniforme y deseada. Perlitas de grano fino son más duras que las de grano grueso. La normalización elimina las tensiones internas, y mejora las propiedades mecánicas del acero, como la mejora de su dureza y maquinabilidad. También se puede obtener una mejor ductilidad sin comprometer la dureza y la resistencia.

La normalización se logra calentando el acero a una temperatura superior al rango de transformación y dentro del rango de austenita completa. Esto depende de la composición del acero según lo indicado por el diagrama de hierro-carbono. La temperatura de normalización habitualmente oscila entre 815°C y 980°C dependiendo del acero involucrado. Después de que se proporciona suficiente tiempo para la transformación completa a austenita, es decir, austenización del acero, la aleación se enfría con aire a una temperatura sustancialmente inferior al intervalo de transformación. El enfriamiento por aire evita una segregación proeutectoide excesiva. La velocidad de enfriamiento generalmente está en el rango de 500 a 1000°C/h. La microestructura final consiste en perlita fina y una ausencia de ferrita proeutectoide masiva.



Figura 1. Microestructura de un acero AISI 1010 normalizado.

Fuente: González, Luis. (1997). Efecto de los Tratamientos Térmicos de Enfriamiento continuo sobre la Estructura y las Propiedades Mecánicas en Aceros al Carbono Hipoeutectoides.

2.2.7 Soldaduras.

La Fundación de Soldadura de Arco James F. Lincoln (*The James F. Lincoln Arc Welding Foundation* por su nombre en inglés), autores del tomo, *The Procedure Handbook of Arc Welding, 14th Edition with Welding Safety and Welding Resources* (2015), definen la soldadura como un proceso de fabricación o escultura que une materiales, generalmente metales o termoplásticos, causando la fusión fundiendo el metal base. Además de la fusión del metal base, típicamente se añade un material de relleno a la junta para formar una piscina de material fundido (la piscina de soldadura) que se enfría para formar una junta que es usualmente más fuerte que el material base. La presión también se puede usar junto con el calor, o por sí misma, para producir una soldadura. Aunque son menos comunes, también existen procesos de soldadura en estado sólido tales como soldadura por fricción o soldadura de gas activo protegida en la que el metal no se funde.

Algunos de los métodos de soldadura más conocidos incluyen:

- La soldadura con oxígeno - también conocida como soldadura oxiacetilénica u oxi-soldadura, utiliza gases combustibles y oxígeno para soldar y cortar metales.
- Soldadura con arco blindado (SMAW) - también conocida como "soldadura por puntos o soldadura eléctrica", utiliza un electrodo que tiene un gas protector alrededor de él para proteger el charco de soldadura. El

portaelectrodos sostiene el electrodo a medida que se disuelve lentamente. La escoria protege el charco de soldadura de la contaminación atmosférica.

- Soldadura de arco de tungsteno de gas (GTAW) - también conocido como TIG (tungsteno, gas inerte), utiliza un electrodo de tungsteno no consumible para producir la soldadura. El área de soldadura está protegida contra la contaminación atmosférica por un gas de protección inerte como argón o helio.
- La soldadura por arco de gas (GMAW), comúnmente denominada MIG (metal, gas inerte) y MAG (metal, gas activo) utiliza una pistola de alimentación de alambre que alimenta el alambre a una velocidad ajustable y fluye un gas de protección basado en argón o una mezcla de argón y dióxido de carbono sobre el charco de soldadura para protegerlo de la contaminación atmosférica.
- Soldadura por arco de flujo (FCAW) - casi idéntica a la soldadura GMAW excepto que utiliza un hilo tubular especial lleno de flujo; se puede utilizar con o sin gas de protección, dependiendo del relleno.
- Soldadura de arco sumergido (SAW) - utiliza un electrodo consumible alimentado automáticamente y una manta de flujo fusible granular. La soldadura fundida y la zona de arco están protegidas de la contaminación atmosférica por estar "sumergidas" bajo la manta de flujo.
- Soldadura por resistencia eléctrica (ERW) - un proceso de soldadura que produce la coalescencia de superficies de colocación donde el calor para formar la soldadura es generado por la resistencia eléctrica del material. En general, un método eficiente, pero limitado a material relativamente delgado.

Hasta finales del siglo XIX, el único proceso de soldadura era la soldadura por forja, que los herreros habían usado durante siglos para unir hierro y acero mediante calefacción y martilleo. La soldadura por arco y la soldadura con oxiacero fueron uno de los primeros procesos que se desarrollaron a finales del siglo, y la soldadura por resistencia eléctrica siguió poco después. La tecnología de soldadura avanzó rápidamente durante el siglo 20 a medida que las guerras

mundiales impulsaron la demanda de métodos de unión confiables y económicos. Después de las guerras, se desarrollaron varias técnicas modernas de soldadura, incluyendo métodos manuales como SMAW, ahora uno de los métodos de soldadura más populares, así como procesos semi-automáticos y automáticos como GMAW, SAW, FCAW y ESW. Los desarrollos continuaron con la invención de soldadura por haz láser, soldadura por haz de electrones, soldadura por impulsos magnéticos (MPW) y soldadura por fricción en la segunda mitad del siglo. Hoy en día, la ciencia sigue avanzando. La soldadura de robots es común en entornos industriales y los investigadores continúan desarrollando nuevos métodos de soldadura y obteniendo una mayor comprensión de la calidad de la soldadura.

Se pueden usar muchas fuentes de energía diferentes para la soldadura, incluyendo una llama de gas, un arco eléctrico, un láser, un haz de electrones, fricción y ultrasonido. Aunque a menudo es un proceso industrial, la soldadura puede realizarse en muchos ambientes diferentes, incluyendo al aire libre, bajo el agua y en el espacio exterior. La soldadura es una tarea peligrosa y se requieren precauciones para evitar quemaduras, descargas eléctricas, daño visual, inhalación de gases y vapores venenosos y exposición a radiación ultravioleta intensa.

2.2.8 Soldabilidad en los aceros al carbono.

La Lincoln Electric (1994), describe la soldabilidad como un término general para describir la capacidad de obtener una soldadura apropiada del proceso de soldadura. Depende de muchos factores, sin embargo, cuando el equivalente de carbono es el factor determinante para la soldabilidad, nos referimos a la resistencia de la junta soldada, particularmente la dureza. Un mayor contenido de carbono en la junta soldada conduce a una mayor dureza y, por tanto, la hace frágil. (La mayor dureza se debe a mayores tasas de enfriamiento en acero que tiene un equivalente de carbono alto). Una mayor dureza aumenta significativamente el riesgo de agrietamiento después de la soldadura, especialmente en la zona afectada por el calor.

Hay que considerar, que el equivalente de carbono por sí solo no es suficiente para evaluar la soldabilidad. El tamaño de la junta soldada, la selección

del material de relleno, el tratamiento térmico pre/post, etc., pueden tener un efecto sobre la soldabilidad. La soldabilidad suele ser difícil de definir cuantitativamente, ya que la mayoría de los estándares la definen cualitativamente. El cuadro 2 muestra la soldabilidad por proceso para distintos materiales metálicos de manera cualitativa.

Por ejemplo, la Organización Internacional de Normalización (ISO) define la soldabilidad en la norma ISO 581-1980 como: "El material metálico se considera susceptible a la soldadura en un grado determinado con procesos y propósitos dados cuando la soldadura proporciona una integridad metálica por una tecnología correspondiente. Proceso para que las piezas soldadas cumplan requisitos técnicos en cuanto a sus propias cualidades, así como a su influencia en una estructura que forman". Otras organizaciones de soldadura lo definen de forma similar.

Cuadro 2. Soldabilidad por proceso.

| MATERIAL | SOLDADURA POR ARCO | SOLDADURA OXIACETILÉ- NICA | SOLDADURA POR HAZ DE ELECTRONES | SOLDADURA POR RESISTENCIA |
|--|-------------------------------|---|--|--|
| HIERRO FUNDIDO | C | R | N | S |
| ACERO AL CARBONO Y ACERO BAJO EN ALEACIÓN | R | R | C | R |
| ACERO INOXIDA- BLE | R | C | C | R |
| ALUMINIO Y MAGNESIO | C | C | C | C |
| COBRE Y ALEA- CIONES DE COBRE | C | C | C | C |
| NÍQUEL Y ALEA- CIONES DE NÍQUEL | R | C | C | R |

Continuación del Cuadro 2. Soldabilidad por proceso.

| MATERIAL | SOLDADURA POR ARCO | SOLDADURA OXIACETILÉ- NICA | SOLDADURA POR HAZ DE ELECTRONES | SOLDADURA POR RESISTENCIA |
|--|-------------------------------|---|--|--|
| TITANIO | C | N | C | C |
| PLOMO Y ZINC | C | C | N | D |
| CERÁMICA | N | S | C | N |
| Leyenda: C = Comúnmente realizado; R = Recomendado; D = Difícil; S = Rara vez; N = No utilizado | | | | |

Fuente: Degarmo, E. Paul; Black, J T.; Kohser, Ronald A. (2003), *Materials and Processes in Manufacturing* (9th ed.).

El alto contenido de carbono reduce la ductilidad y la movilidad del acero en su estado fundido. Dado que la soldadura tiene lugar por el flujo de metal fundido dentro a las grietas abiertas y poros, el alto contenido de carbono demuestra un disuasivo en este caso. Por último, soldadura de acero de alto contenido de carbono también plantea un mayor riesgo de formar martensita, la que es quebradiza y puede hacer que la soldadura se rompa bajo esfuerzo.

2.2.9 Soldadura con arco eléctrico.

Jeffus, Larry (1999), define a la soldadura por arco metálico blindado (SMAW), como un proceso manual de soldadura por arco que utiliza un electrodo consumible cubierto con un flujo (agente de limpieza químico, agente de flujo, o agente de purificación) para hacer la soldadura. Una corriente eléctrica, en forma de corriente alterna o corriente continua de una fuente de alimentación de soldadura, se utiliza para formar un arco eléctrico entre el electrodo y los metales a unir. La pieza de trabajo y el electrodo se funde formando una piscina de metal fundido (piscina de soldadura) que se enfría para formar una junta. A medida que se coloca la soldadura, el recubrimiento de flujo del electrodo se desintegra, liberando vapores que sirven como un gas de protección y proporcionan una capa

de escoria, que protegen ambas la zona de soldadura de la contaminación atmosférica.

Debido a la versatilidad del proceso y a la simplicidad de su equipo y operación, la soldadura con arco blindado es uno de los primeros y más populares procesos de soldadura del mundo. Domina otros procesos de soldadura en la industria de mantenimiento y reparación, y aunque la soldadura por arco de núcleo fundido está creciendo en popularidad, SMAW sigue siendo utilizado ampliamente en la construcción de estructuras pesadas de acero y en la fabricación industrial. El proceso se utiliza principalmente para soldar hierro y aceros (incluyendo acero inoxidable), pero el aluminio, el níquel y las aleaciones de cobre también se pueden soldar con este método.

2.2.10 Defecto de soldadura.

Un defecto de soldadura es cualquier defecto que comprometa la utilidad de una soldadura. Hay una gran variedad de defectos de soldadura. Las imperfecciones de soldadura se clasifican según la norma ISO 6520 “Soldadura y procesos conexos - Clasificación de imperfecciones geométricas en materiales metálicos - Parte 1: Soldadura por fusión” (2007), mientras que sus límites aceptables se especifican en la norma ISO 5817 “Soldadura - Juntas soldadas por fusión en acero, níquel, titanio y sus aleaciones (excluyendo soldadura por haz) - Nivel de calidad para imperfecciones” (2007)” y por último, en la norma ISO 10042 “Soldadura de juntas soldadas por arco en aluminio y sus aleaciones, niveles de calidad para imperfecciones” (2005).

De acuerdo a Matthews, Clifford (2001), autor del libro de datos de los ingenieros de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME), las causas de los defectos de soldadura pueden desglosarse de la siguiente manera: 45 por ciento de malas condiciones de proceso, 32 por ciento de error del operador, 12 por ciento de técnica incorrecta, 10 por ciento de consumibles incorrectos y 5 por ciento de malas ranuras de soldadura.

Principales defectos en las soldaduras.

1. Porosidad dispersada: La porosidad es una discontinuidad formada por atrapamiento de gas durante la solidificación o en un depósito de

pulverización térmica. La discontinuidad formada es generalmente esférica y puede alargarse. Una causa común de porosidad es la contaminación durante la soldadura. La Figura 2 ilustra la porosidad dispersa que se distribuye uniformemente por todo el metal de soldadura.



Figura 2. Porosidad dispersada.

Fuente: AWS B1.11. (2000). Guía para la Inspección Visual de Soldaduras.

- 2. Porosidad tubular:** La Figura 3 ilustra la porosidad tubular que es una forma de porosidad que tiene una longitud mayor que su anchura que se encuentra aproximadamente perpendicular a la cara de la soldadura. La porosidad tubular también puede denominarse porosidad de agujero de gusano.

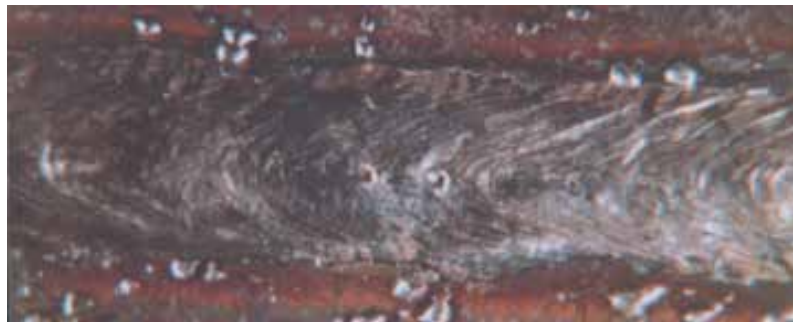


Figura 3. Porosidad tubular.

Fuente: AWS B1.11. (2000). Guía para la Inspección Visual de Soldaduras.

- 3. Porosidad alineada:** La Figura 4 ilustra la porosidad alineada que es una matriz localizada de porosidad orientada en una línea. Los poros pueden ser esféricos o alargados.



Figura 4. Porosidad alineada.

Fuente: AWS B1.11. (2000). Guía para la Inspección Visual de Soldaduras.

- 4. Porosidad alargada:** La Figura 5 ilustra la porosidad alargada que es una forma de porosidad que tiene una longitud mayor que su anchura que se encuentra aproximadamente paralela al eje de soldadura. Muestra la porosidad alargada formada entre la escoria y la superficie de metal de soldadura. Dicha porosidad también podría formarse debajo de la superficie del metal de soldadura.



Figura 5. Porosidad alargada.

Fuente: AWS B1.11. (2000). Guía para la Inspección Visual de Soldaduras.

- 5. Fusión incompleta:** es una discontinuidad de soldadura en la que no se produjo fusión entre el metal de soldadura y las caras de fusión o las perlas de soldadura contiguas. Los ejemplos de fusión incompleta se muestran en las Figuras 6-8. Es el resultado de técnicas de soldadura inadecuadas, la preparación inadecuada del metal base o el diseño inadecuado de la junta. Las deficiencias que causan fusión incompleta incluyen calor de soldadura insuficiente o falta de acceso a todas las caras de fusión, o ambas. A menos

que la junta de soldadura se limpie adecuadamente, los óxidos bien adheridos pueden interferir con la fusión completa, incluso cuando existe un acceso adecuado para soldar y se usan los calentadores de soldadura adecuados.



Figura 6. Fusión Incompleta.

Fuente: AWS B1.11. (2000). Guía para la Inspección Visual de Soldaduras.



Figura 7. Fusión Incompleta en la superficie de la Ranura.

Fuente: AWS B1.11. (2000). Guía para la Inspección Visual de Soldaduras.



Figura 8. Fusión Incompleta entre soldadura y metal base.

Fuente: AWS B1.11. (2000). Guía para la Inspección Visual de Soldaduras.

- 6. Penetración incompleta.** La penetración incompleta de la junta es una condición de raíz de la junta en la que el metal de soldadura no se extiende a través del espesor de la junta. El área no penetrada y sin fusionar es una

discontinuidad que se describe como una penetración articular incompleta. En la Figura 9 se ilustra un ejemplo de penetración incompleta de la junta. La penetración incompleta de la junta puede ser el resultado de un calor de soldadura insuficiente, un diseño inadecuado de la junta (por ejemplo, el arco de soldadura no puede penetrar) o un control lateral inadecuado del arco de soldadura.



Figura 9. Penetración incompleta.

Fuente: AWS B1.11. (2000). Guía para la Inspección Visual de Soldaduras.

- 7. Inclusiones de escoria:** Las inclusiones de escoria son productos no metálicos que resultan de la disolución mutua de fundente y de impurezas no metálicas en algunos procesos de soldadura y soldadura fuerte. En la Figura 10 se muestra una inclusión de escoria. En general, las inclusiones de escoria pueden encontrarse en soldaduras realizadas con cualquier proceso de soldadura por arco que emplee fundente como medio de protección. En general, las inclusiones de escoria resultan de técnicas de soldadura inadecuadas, la falta de acceso adecuado para soldar la junta, o la limpieza inadecuada de la soldadura entre pases.



Figura 10. Inclusiones de escoria.

Fuente: AWS B1.11. (2000). Guía para la Inspección Visual de Soldaduras.

8. Grietas: Las grietas se definen como discontinuidades del tipo de fractura caracterizadas por una punta afilada y una alta relación de longitud y anchura al desplazamiento de apertura. Pueden ocurrir en metal de soldadura, zona afectada por el calor y metal base cuando las tensiones localizadas exceden la resistencia máxima del material. El agrietamiento a menudo se inicia en concentraciones de tensión causadas por otras discontinuidades cercanas asociadas con el diseño de la soldadura. Cuando una grieta es paralela al eje de soldadura se denomina grieta longitudinal. Las grietas longitudinales se ilustran en la Figura 11. Las grietas longitudinales en soldaduras pequeñas entre secciones pesadas son a menudo el resultado de altas tasas de enfriamiento y alta restricción.



Figura 11. Grietas longitudinales.

Fuente: AWS B1.11. (2000). Guía para la Inspección Visual de Soldaduras.

Las grietas transversales son perpendiculares al eje de la soldadura. Estos pueden tener un tamaño limitado y estar completamente contenidos dentro del metal de soldadura o pueden propagarse desde el metal de soldadura a la zona afectada por el calor adyacente y más allá en el metal base. En algunas soldaduras, se formarán grietas transversales en la zona afectada por el calor y no en la soldadura. Las grietas transversales son generalmente el resultado de tensiones de contracción longitudinales que actúan sobre el metal de soldadura de baja ductilidad. Las grietas transversales se muestran en la Figura 12.



Figura 12. Grietas transversales.

Fuente: AWS B1.11. (2000). Guía para la Inspección Visual de Soldaduras.

2.2.11 Ensayo de tracción.

Los ensayos de tracción, también se conocidos como pruebas de tensión, es una prueba de ciencias fundamentales de materiales en el que una muestra se somete a una tensión controlada hasta generar una falla. Los resultados de la prueba se utilizan comúnmente para seleccionar un material para una aplicación, para el control de calidad y para predecir cómo reaccionará un material bajo otros tipos de fuerzas. Según el autor del libro *Tensile Testing*, Davis, Joseph R. (2004), las propiedades que se miden directamente a través de un ensayo de tracción son la resistencia a la tracción final, el alargamiento máximo y la reducción de área. A partir de estas mediciones también se pueden determinar las siguientes propiedades: módulo de Young, relación de Poisson, resistencia a la deformación y características de endurecimiento por deformación. El ensayo de tracción uniaxial es el más utilizado para obtener las características mecánicas de los materiales isotrópicos.

Generalmente, la probeta tiene una longitud original calibrada (l_0) en general de 50 mm (2 pulgadas), y una sección transversal (A_0) por lo común con un diámetro de 12,5 mm (0,5 pulgadas). La probeta se monta entre las mordazas de una máquina de ensayo de tracción. Estas máquinas están equipadas con diversos accesorios y controles para probar la probeta a diferentes temperaturas y velocidades de deformación. Algunas de las normas internacionales que rigen los ensayos de tracción son las siguientes:

- ASTM E8/E8M-13: "Métodos de prueba estándar para ensayos de tensión de materiales metálicos" (2013).

- ISO 6892-1: "Materiales metálicos Ensayos de tracción Método de ensayo a temperatura ambiente" (2009).
- ISO 6892-2: "Materiales metálicos Ensayos de tracción Método de ensayo a temperatura elevada" (2011).

2.2.12 Fracturas.

Una fractura es la separación de un objeto o material en dos o más piezas bajo la acción del estrés. Dieter, G. E. (1988) indica que la fractura de un sólido generalmente ocurre debido al desarrollo de ciertas superficies de discontinuidad de desplazamiento dentro del sólido. Si un desplazamiento se desarrolla perpendicular a la superficie de desplazamiento, se llama una grieta de tracción normal o simplemente una grieta; si un desplazamiento se desarrolla tangencialmente a la superficie del desplazamiento, se denomina grieta de corte, banda de deslizamiento o dislocación. La resistencia a la fractura o la resistencia a la rotura es la tensión cuando una muestra falla o se fractura. Las fracturas en los materiales generalmente se pueden clasificar en dos tipos:

1. **Fractura frágil:** En la fractura frágil, no se produce deformación plástica aparente antes de la fractura. En los materiales cristalinos frágiles, la fractura puede ocurrir como resultado del esfuerzo de tracción que actúa de forma normal a los planos cristalográficos con baja unión (planos de escisión). En sólidos amorfos, por el contrario, la falta de una estructura cristalina da como resultado una fractura conoidal, con grietas que proceden de forma normal a la tensión aplicada. Se informa que el hundimiento del *RMS Titanic* en 1912 debido a una colisión de iceberg se debió a una fractura frágil de las placas de acero del casco.
2. **Fractura dúctil:** En la fractura dúctil, se produce una deformación plástica extensa (estrechamiento) antes de la fractura. Los términos ruptura o ruptura dúctil describen la falla final de materiales dúctiles cargados en tensión. En lugar de agrietarse, el material "se separa", generalmente dejando una superficie rugosa. En este caso, hay una propagación lenta y una absorción de una gran cantidad de energía antes de la fractura. Los pasos básicos en la fractura dúctil son: formación de espacios vacíos,

coalescencia de espacios vacíos (también conocida como formación de grietas), propagación de fisuras y fallas, que a menudo da como resultado una superficie de falla en forma de taza y cono.

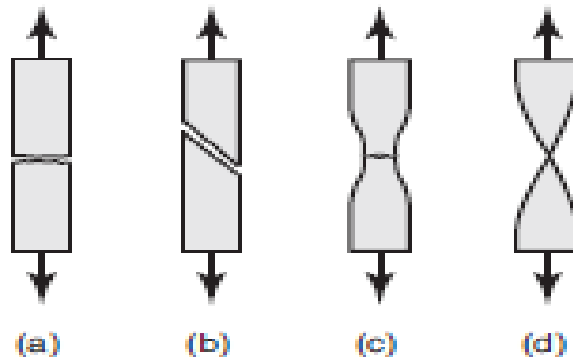


Figura 13. Tipos de fracturas a tracción: (a) fractura frágil en metales policristalinos; (b) fractura por cortante en monocristales dúctiles; (c) fractura dúctil de copa y cono en metales policristalinos; (d) fractura dúctil completa en metales policristalinos, con 100% de reducción del área.

Fuente: S. Kalpalkjian & S.R. Schmid (2008).

2.2.13 Curvas esfuerzo – deformación.

La relación entre el esfuerzo y la deformación que muestra un material particular se conoce como la curva esfuerzo-deformación de ese material particular, así lo definen Luebkehan, C., & Peting, D. (2012). Es única para cada material y se encuentra registrando la cantidad de deformación (deformación) a distintos intervalos de carga de tracción o compresión (esfuerzos). Estas curvas revelan muchas de las propiedades de un material (incluyendo datos para establecer el Módulo de Elasticidad, E).

En las figuras 1 y 2, se muestra una secuencia típica de deformación del espécimen de ensayo de tracción, elaboradas por los autores S. Kalpalkjian & S.R. Schmid (2008), en su libro *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. En el momento que se aplica la carga por primera vez, el espécimen, o probeta, se deforma en proporción a esta carga; a este comportamiento se le llama alargamiento elástico lineal. Si se retira la carga, la probeta recupera su longitud y forma originales de

manera elástica como una banda de hule cuando se estira y se suelta, siempre y cuando la probeta no supere su límite elástico.

El esfuerzo de ingeniería (esfuerzo nominal) se define como la relación de la carga aplicada al área transversal original de la probeta:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad \text{Ec. 1.}$$

Dónde:

.

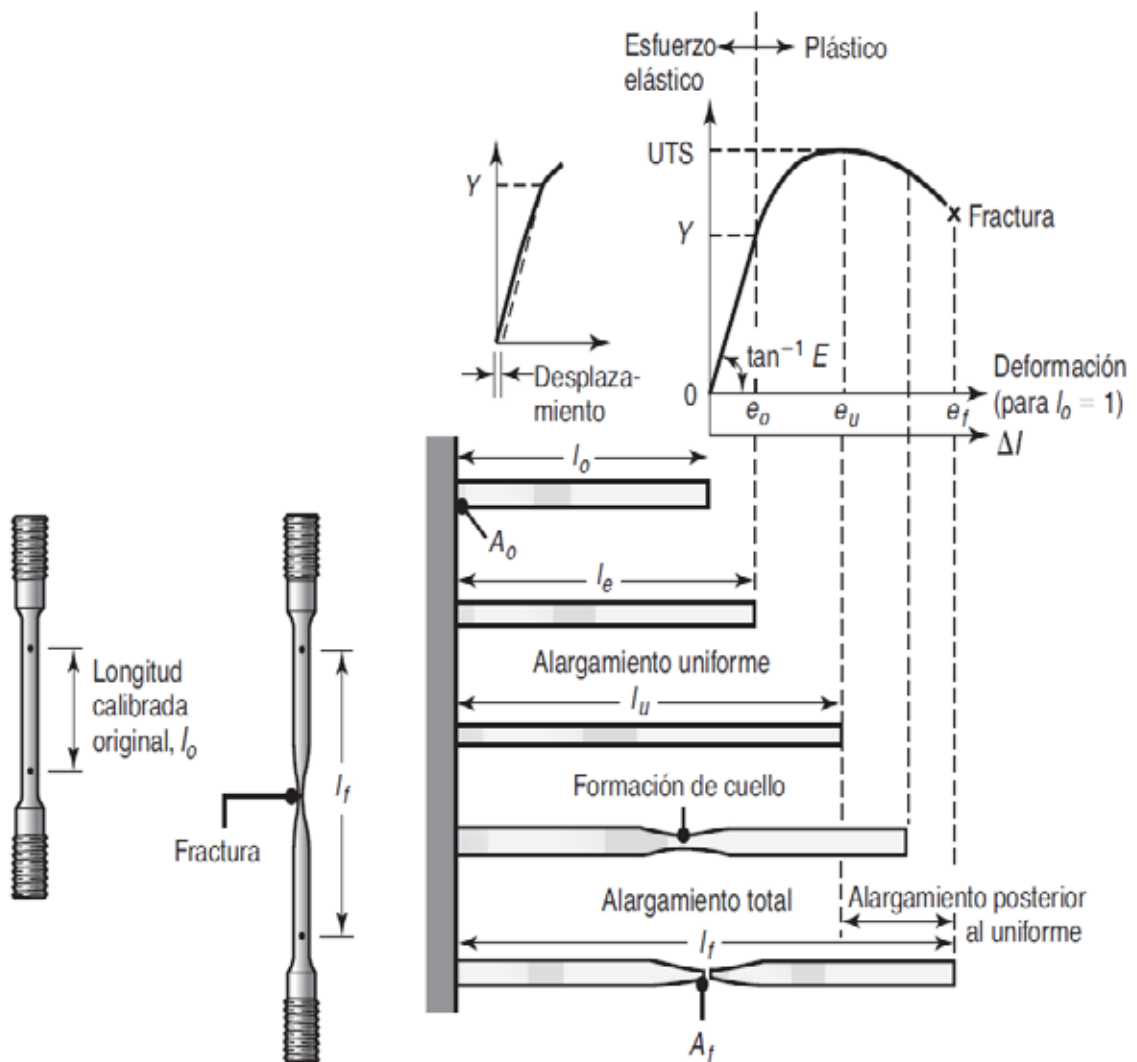


Figura 14. Probeta para ensayo de tracción, (a) Probeta estándar antes y después de la tracción, mostrando las longitudes calibradas original y final. (b) Secuencia de ensayo de tracción que muestra diferentes etapas en el alargamiento de la probeta.

Fuente: S. Kalpalkjian & S.R. Schmid (2008). Manufactura, Ingeniería y Tecnología.

de no ser así, esto quiere decir que la soldadura no fue exitosa y puede generar fallas en el material, como, por ejemplo: grietas y fracturas.

La prueba de dureza Vickers fue desarrollada en 1921 por Robert L. Smith y George E. Sandland en Vickers Ltd como una alternativa al método Brinell para medir la dureza de los materiales. La prueba de Vickers es a menudo más fácil de usar que otras pruebas de dureza, ya que los cálculos requeridos son independientes del tamaño del penetrador, y la indentación se puede utilizar para todos los materiales, independientemente de la dureza. El principio básico, como con todas las medidas comunes de dureza, es observar la capacidad del material cuestionado para resistir la deformación plástica de una fuente estándar. La prueba de Vickers se puede utilizar para todos los metales y tiene una de las escalas más amplias entre las pruebas de dureza. La unidad de dureza dada por la prueba se conoce como Vickers Pyramid Number (HV) o Diamond Pyramid Hardness (DPH). El número de dureza se puede convertir en unidades de pascuales, pero no se debe confundir con la presión, que usa las mismas unidades. El número de dureza está determinado por la carga sobre el área de superficie de la indentación y no el área normal a la fuerza, y por lo tanto no es presión.

2.2.16 Macroscopía y microscopía.

F. R. Morral, E. & Jimeno, P. Molera, autores del libro Metalurgia general (1982), definen la macroscopía como un examen visual directo o con un lente de aumento. Este método de examen es rápido y ofrece muchas posibilidades, particularmente en los trabajos de carácter industrial. El estudio de la estructura de un metal, en realidad, debe comenzar con el examen macroscópico de la pieza, ya que el análisis químico y el microscópico no son, generalmente, representaciones de la totalidad de la pieza entera, sino que reflejan la situación en un lugar particular, donde se hace el examen. La macroscopía comprende:

- a) Examen visual de las probetas atacadas.
- b) Examen de las fracturas producidas en los metales a aleación con respecto a su resistencia mecánica, ductilidad, tamaño de grano, etc., así como las condiciones causantes del accidente, y, en ocasiones,

permiten apreciar los defectos responsables del debilitamiento del material.

La macroscopía permite identificar la distribución de defectos o heterogeneidades presentes en toda una sección o partes de una pieza. Es una técnica utilizada en el control de calidad de procesos de fabricación de aceros, esto último es muy importante en la industria debido a que los mayores fabricantes de metales proveen muestras de piezas metálicas sometidas a varios procesos de manufacturación para demostrar la eficiencia que tienen y asegurar un buen producto a la hora de distribuirlo en el mercado.

Al igual que la macroscopía, F. R. Morral, E. & Jimeno, P. Molera comentan que la microscopía es el campo técnico del uso de microscopios para ver objetos y áreas de objetos que no se pueden ver a simple vista (objetos que no están dentro del rango de resolución del ojo normal). Existen tres ramas bien conocidas de microscopía: óptica, electrón y microscopía de barrido.

La microscopía óptica y electrónica implica la difracción, reflexión o refracción de la radiación electromagnética de electrones que interactúan con la muestra, y la recopilación de la radiación dispersa u otra señal para crear una imagen. Este proceso se puede llevar a cabo mediante irradiación de campo amplio de la muestra (por ejemplo, microscopía óptica estándar y microscopía electrónica de transmisión) o mediante barrido de un haz fino sobre la muestra (por ejemplo, microscopía electrónica de barrido). La microscopía de sonda de exploración implica la interacción de una sonda de exploración con la superficie del objeto de interés. El desarrollo de la microscopía revolucionó la biología, dio lugar al campo de la histología y sigue siendo una técnica esencial en la vida y las ciencias de materiales.

2.2.17 Tipos de juntas soldadas.

La Fundación de Soldadura de Arco James F. Lincoln, autores del tomo, *The Procedure Handbook of Arc Welding, 14th Edition with Welding Safety and Welding Resources* (2015), establece que una junta de soldadura es un punto o borde donde dos o más piezas de metal o plástico se unen entre sí. Aquí hay

muchos tipos de soldaduras, pero todas caen dentro de una de estas categorías: juntas de tope soldadas, juntas abiertas y juntas cerradas.

La ranura cuadrada es una junta de soldadura a tope con las dos piezas que son planas y paralelas entre sí. Esta unión es simple de preparar, económica de usar, y proporciona una resistencia satisfactoria, pero está limitada por el espesor de la junta. La soldadura a tope cuadrada cerrada es un tipo de junta de ranura cuadrada sin separación entre las piezas. Este tipo de junta es común con soldadura de gas y arco.

Las soldaduras a tope son similares a una junta biselada, pero en lugar de sólo un lado que tiene el borde biselado, ambos lados de la junta de soldadura están biselados. En metales gruesos, y cuando se puede realizar la soldadura desde ambos lados de la pieza de trabajo, se usa una junta de doble V. Cuando se sueldan metales más gruesos, una junta de doble V requiere menos material de relleno debido a que hay dos juntas en V más estrechas en comparación con una junta de un solo V, la cual es más ancha.

Existen muchos otros tipos de posiciones de soldadura, la selección de la posición depende del grosor y del proceso utilizado. Por ejemplo, la Fundación de Soldadura de Arco James F. Lincoln comenta que las soldaduras de doble ranura son las más económicas para piezas más gruesas porque requieren menos material de soldadura y tiempo.

2.2.18 Nomenclatura del electrodo E6013.

El sistema de numeración de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS, por sus siglas en inglés) puede decirle a un soldador un poco sobre un electrodo específico, incluyendo qué aplicación funciona mejor y cómo debe usarse para maximizar el rendimiento. Con esto en mente, se procede a describir el sistema y cómo funciona, empleando el electrodo E6013 como ejemplo.

El prefijo "E" designa un electrodo de soldadura por arco. Los dos primeros dígitos de un número de 4 dígitos y los tres primeros dígitos del número de 5 dígitos indican la resistencia mínima a la tracción. Por ejemplo, E6013 es un electrodo de resistencia a la tracción de 60.000 psi mientras que E10018 designa un electrodo de resistencia a tracción de 100.000 psi.

El siguiente al último dígito indica la posición. El "1" designa un electrodo de toda la posición, "2" es para las posiciones plana y horizontal solamente; Mientras que "4" indica un electrodo que se puede utilizar para plano, horizontal, vertical hacia abajo y sobrecarga, el electrodo E6013 es un electrodo que se puede usar en cualquier posición. El último dígito tomado indica el tipo de revestimiento y la polaridad o corriente correcta para usar. En el cuadro 3 se puede apreciar el significado de cada dígito que forman este sistema numérico.

Cuadro 3. Sistema número de la AWS para los electrodos.

| Dígito | Tipo de revestimiento | Corriente de soldadura |
|---------------|--|-------------------------------|
| 0 | Alta celulosa sódica | DC+ |
| 1 | Alto contenido de potasio | AC, DC+ o DC- |
| 2 | Alta sodio | AC, DC- |
| 3 | Alto potasio | AC, DC+ |
| 4 | Polvo de hierro | AC, DC+ o DC- |
| 5 | Baja en hidrógeno sódico | DC+ |
| 6 | Bajo en hidrógeno potásico | AC, DC+ |
| 7 | Óxido de hierro alto, polvo de hierro | AC, DC+ o DC- |
| 8 | Potasio de hidrógeno bajo, polvo de hierro | AC, DC+ o DC- |

Fuente: Sociedad Americana de Soldadura (AWS, por sus siglas en inglés).

El electrodo E6013, es un electrodo AC o DC+, de toda la posición que se utiliza para soldar piezas nuevas y limpias. Su arco suave tiene salpicaduras mínimas, penetración moderada y una escoria fácil de limpiar.

2.2.19 Regresión lineal.

David A. Freeman (2009), establece que, en la estadística, la regresión lineal es un enfoque para modelar la relación entre una variable dependiente o explicativa escalar y una o más variables independientes denominadas X. El caso de una variable explicativa se denomina regresión lineal simple. Para más de una variable explicativa, el proceso se denomina regresión lineal múltiple.

En la regresión lineal, las relaciones se modelan utilizando funciones predictoras lineales cuyos parámetros de modelo desconocidos se calculan a partir de los datos, estos modelos se llaman modelos lineales.

La regresión lineal fue el primer tipo de análisis de regresión que se estudió rigurosamente para ser utilizado ampliamente en aplicaciones prácticas. Esto se debe a que los modelos que dependen linealmente de sus parámetros desconocidos son más fáciles de ajustar que los modelos que están relacionados no linealmente con sus parámetros y porque las propiedades estadísticas de los estimadores resultantes son más fáciles de determinar.

Según Cohen, J. et al (2003), la regresión lineal tiene muchos usos prácticos. La mayoría de las aplicaciones pertenecen a una de las dos categorías siguientes:

- Si el objetivo es predicción, o pronóstico, o reducción de errores, la regresión lineal se puede utilizar para ajustar un modelo predictivo a un conjunto de datos observados de valores Y y X . Después de desarrollar un modelo de este tipo, si se da un valor adicional de X sin su valor acompañante de Y , el modelo ajustado puede usarse para hacer una predicción del valor de Y .
- Dada una variable Y , y un número de variables X_1, \dots, X_n que pueden estar relacionadas con Y , se puede aplicar un análisis de regresión lineal para cuantificar la fuerza de la relación entre Y y el X_j , para evaluar cual X_j puede no tener ninguna relación con Y en absoluto, e identificar qué subconjuntos de los X_j contienen información redundante sobre Y .

Los modelos de regresión lineal a menudo se ajustan utilizando el método de los mínimos cuadrados, pero también pueden ser ajustados de otras maneras, como minimizar la "falta de ajuste" en alguna otra norma (como con la regresión de menos desviaciones absolutas) o minimizando una versión penalizada de la función de pérdida de mínimos cuadrados como en la regresión de cresta (penalización de la norma L_2) y lazo (penalización de la norma L_1). Por el contrario, el enfoque de mínimos cuadrados se puede utilizar para adaptar

modelos que no son modelos lineales. Así, aunque los términos "mínimos cuadrados" y "modelo lineal" están estrechamente vinculados, no son sinónimos.

2.2.20 Software matemático.

Según Gilat, Amos (2004), un software matemático es un software utilizado para modelar, analizar o calcular datos numéricos, simbólicos o geométricos. Es un tipo de software de aplicación que se utiliza para resolver problemas matemáticos o estudios matemáticos. Hay varias visiones de lo que es la matemática, por lo que hay varios tipos de la categoría de softwares matemáticos que se utilizan para ellos. Los más primarios (por ejemplo, para calcular la función elemental por aritmética de punto flotante) pueden estar en la categoría de software matemático. Por así decirlo, el software matemático no es sólo un software de aplicación sino también la base de otro software científico, y esa es su una de las características del software matemático como ese medio. Entre los softwares matemáticos más populares está:

Software de cálculo matemático y estadístico: es una hoja de cálculo desarrollada, cuenta con herramientas de cálculo, gráficos, tablas dinámicas y un lenguaje de programación de macros llamado para Aplicaciones. La capacidad de analizar datos es una habilidad poderosa que ayuda a tomar mejores decisiones, es una de las mejores herramientas para el análisis de datos y las tablas dinámicas integradas son posiblemente la herramienta analítica más popular.

2.3. Definición de términos básicos.

Cordón de soldadura: Depósito de metal fundido resultado de la progresión longitudinal de un proceso de soldadura en una junta.

Ductilidad: La ductilidad es la propiedad que tiene un material de deformarse visiblemente (plásticamente) antes de llegar a la ruptura.

Dureza: La dureza es la oposición que presenta un material a ser rayado o penetrado por otro cuerpo sólido. La definición de dureza es diferente a la de resistencia mecánica, la cual es la resistencia del material a ser deformado.

Electrodo: los electrodos son dispositivos que conducen electricidad y que también pueden actuar como metal de soporte.

Metalografía: La metalografía es la disciplina que estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o de una aleación, con el fin de determinar si el material cumple con los requisitos para los cuales ha sido diseñado.

Probeta: En ciencia de materiales, una probeta es una pieza (generalmente de dimensiones normalizadas), constituida por un determinado material cuyas características se desean estudiar.

Resistencia a la tracción: Máximo esfuerzo de tracción que un cuerpo puede soportar antes de romperse.

Soldabilidad: La Soldabilidad es la capacidad que tienen los materiales, de la misma o diferente naturaleza para ser unidos de manera permanente mediante procesos de soldadura, sin presentar transformaciones estructurales perjudiciales, tensiones o deformaciones que puedan ocasionar alabeos.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

El marco metodológico representa el plan o metodología a seguir como un conjunto ordenado de procedimientos que van a permitir obtener, clasificar, comprender y organizar los datos relevantes y poder así plantear las soluciones al problema investigado.

Bavaresco (2006) señala que el marco metodológico es una fase mecánica, que conduce al ser humano a penetrar en el manejo de una serie de métodos y técnicas no comunes, por cuanto la investigación científica, así como las otras investigaciones que se llevan a cabo; pura, aplicada, descriptiva, exploratoria, predictiva de campo y también bibliográfica o documental (propia de una monografía), llevan al investigador a utilizar o emplear los aspectos metodológicos, debiendo explicar cómo tendría que hacer en esa investigación en particular.

3.1 Tipo de investigación.

El tipo de investigación empleado fue de tipo descriptiva ya que se estableció el comportamiento de la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura (SMAW) afectado por un defecto para un acero AISI 1010, además se especificó características y rasgos importantes que se pueden presentaron en el cordón de soldadura efectuado en el acero.

De acuerdo a Sabino (1992) la preocupación primordial de la investigación tipo descriptiva radica en describir algunas características fundamentales de conjuntos homogéneos de fenómenos. Las investigaciones descriptivas utilizan criterios sistemáticos que permiten poner de manifiesto la estructura o el comportamiento de los fenómenos en estudio, proporcionando de ese modo información sistemática y comparable con la de otras fuentes.

3.2 Diseño de la investigación.

Hernández *et al* (2003), señalan que el término “diseño” se refiere al plan o estrategia concebida para obtener la información que desea. Por lo tanto, el diseño de investigación se concibe como estrategias en las cuales se pretende obtener respuestas a las interrogantes y comprobar las hipótesis de investigación, con el fin de alcanzar los objetivos del estudio.

Arias (2012), señala que la investigación de campo es aquella que consiste en la recolección de datos directamente de los sujetos investigados, o de la realidad donde ocurren los hechos (datos primarios) sin manipular o controlar variable alguna/ es decir, el investigador obtiene la información, pero no altera las condiciones existentes.

Debido a esto, es importante lograr entender la naturaleza y factores influyentes de los problemas, explicar las causas que los generan y sus efectos, y, predecir su ocurrencia utilizando métodos característicos de cualquiera de los enfoques de investigación en el desarrollo. De acuerdo a lo expuesto, el diseño de esta investigación fue experimental y de campo ya que se realizaron cordones de soldadura a varias muestras de acero las cuales estuvieron expuestas a distintos ensayos, luego se analizaron y evaluaron los resultados, y con esto se estableció el modelo predictivo del comportamiento de la resistencia del cordón.

3.3 Nivel de investigación.

Arias (2012) indica que el nivel descriptivo consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Los resultados de este tipo de investigación se ubican en un nivel intermedio en cuanto a la profundidad de los conocimientos se refiere. El nivel empleado en esta investigación es de tipo descriptivo, de acuerdo a esto se determinará el efecto de cada variable sobre el comportamiento de la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura (SMAW).

3.4 Población y muestra.

La población está constituida por un conjunto de elementos o datos que presentan características comunes o muy parecidas; o como la cita de Arias (1999) “La población o universo se refiere al conjunto para el cual serán válidas las

conclusiones que se obtengan: a los elementos o unidades (personas, instituciones o cosas) involucradas en la investigación”.

Por otra parte, la muestra es definida como un subgrupo de la población y para seleccionar la muestra deben delimitarse las características de la población según Arias (1999) “La muestra es un "subconjunto representativo de un universo o población."

La población de esta investigación estuvo constituida por todos los materiales metálicos llamados “aceros” y las muestras fueron laminas soldadas de acero AISI 1010, clasificado como acero de bajo carbono.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Según Arias (2012) las técnicas de recolección de datos son las distintas formas o maneras de obtener la información. Son ejemplos de técnicas; la observación directa, la encuesta en sus dos modalidades (entrevista o cuestionario), el análisis documental, análisis de contenido, también define que los instrumentos son los medios materiales que se emplean para recoger y almacenar la información. Las técnicas usadas fueron:

La observación, según Arias (2012) es una técnica que consiste en visualizar o captar mediante la vista, en forma sistemática, cualquier hecho, fenómeno o situación que se produzca en la naturaleza o en la sociedad, en función de unos objetivos de investigación preestablecidos. Esta técnica fue empleada tanto antes como después de la soldadura para ver los defectos generados y los efectos del proceso en la microestructura del material.

Arias (2012) indica que la revisión documental es un proceso en la búsqueda, recuperación, análisis, crítico e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresos, audiovisuales o electrónicos. Como en toda investigación, el propósito es el aporte de nuevos conocimientos

De esta manera siendo la revisión documental la que ha permitido la construcción del marco teórico, como también el desarrollo de los objetivos específicos, así mismo, permitió encontrar un modelo para la predicción del

comportamiento de la resistencia a la tracción de un cordón de soldadura (SMAW) afectado por un defecto para un acero AISI 1010.

El tercer instrumento utilizado fue los ensayos destructivos y no destructivos, entre los no destructivos se encontraron:

- Macroscopía.
- Microscopía.

Tanto la macroscopía como la microscopía fueron instrumentos de vital importancia para el desarrollo de la investigación ya que permitieron encontrar el defecto predominante en los cordones de soldadura.

Entre los destructivos se encontraron:

- Ensayo a tracción.
- Ensayo de doblado.
- Ensayo de dureza.

Por último, estos ensayos fueron los más determinantes de esta investigación ya que nos permitieron conocer los valores de resistencia a la tracción, ductilidad y dureza de los cordones de soldadura (SMAW) realizados a cada una de las muestras y probetas de estudio, valores que nos permitieron obtener el modelo predictivo.

3.6 Fases de la investigación.

Fase I: Establecer las variables que afectan la resistencia del cordón de soldadura.

En la primera fase se revisó y analizo toda aquella información procedente de medios audiovisuales, electrónicos y literarios que fueron de ayuda para el desarrollo de la investigación, fue fundamental este punto ya que nos permitió conocer los parámetros o variables utilizar en el proceso de soldadura a través de la utilización de la información más relevante obtenida la revisión bibliográfica estableciendo así, cuales de estas variables investigadas tenían influencia en el estudio.

1. Selección del número de probetas soldadas para ensayo de tracción.

Con la finalidad de obtener resultados más exactos del ensayo de tracción, se aplicó un software estadístico, de la siguiente manera:

- Se calculó la cantidad de probetas necesarias para obtener resultados óptimos de este ensayo. El software utilizado solicita unos valores de entrada para poder realizar el cálculo del número de probetas y preestablece el valor de la tolerancia.
- El primer valor es el valor nominal, que para los fines de este estudio fue la fuerza máxima que puede entregar la máquina de ensayos de tracción el valor fue aproximadamente 100kN.
- El segundo valor fue la tolerancia, para este estudio se utilizó un valor estándar de $\pm 0,5$, que es el valor prefijado por el software para el menor margen de error posible.

2. Parámetros utilizados en el proceso de soldadura SMAW.

Se realizó una revisión catálogos y la norma AWS A5.1 Especificación para electrodos de acero al carbono para soldadura por arco de metal blindado, para dar con información correspondiente al rango favorable del uso de los parámetros indicados por cada fabricante o proveedor de electrodos E6013, se midió la velocidad de avance en el proceso gracias a la distancia del cordón y el tiempo que duro la pasada.

3. Lista de defectos utilizados en la inspección.

Se utilizó la norma AWS B1.11. (2000). Guía para la Inspección Visual de Soldaduras como fuente para relacionar los posibles defectos a presentarse en las juntas a topes con los que aparecieron en las muestras luego del proceso de soldadura comparando así estructura y aspecto.

Fase II: Determinar el efecto de cada variable sobre el comportamiento de la resistencia a la tracción del cordón de soldadura.

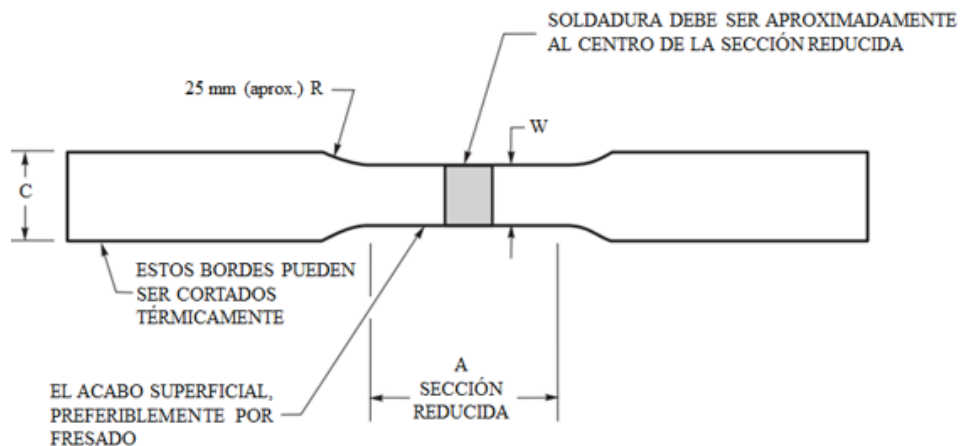
En la segunda fase para poder determinar el efecto de cada una de las variables fue necesario realizar las siguientes etapas:

- 1. Selección del material:** se seleccionó una lámina de acero de bajo carbono AISI 1010 de 450mm de ancho, 1200mm de longitud y 6mm de espesor, de toda la población de aceros existentes, que sirvió de base para la investigación, dada sus propiedades de excelente soldabilidad y alta ductilidad.

- 2. Corte del material:** se realizó un corte vertical a la lámina de acero AISI 1010 con una cizalla MACNA ED, de tal manera que el corte fuese perpendicular al sentido de laminación del material, quedando así dos secciones de material de 225 mm de ancho y 1200 mm de longitud. Luego se realizaron varios cortes horizontales o paralelos al sentido de laminación, para así obtener (15) muestras de 225mm de ancho y 131mm de longitud, para finalizar se realizó un corte vertical justo en medio a cada una de las 15 muestras, quedando así dos placas de 112,5mm de ancho por 131mm de longitud.
- 3. Soldadura de las muestras:** se realizó un proceso de soldadura SMAW basado en la norma ANSI/AWS D1.1 (2010) Código de soldadura de acero estructural, a cada una de las 15 muestras uniendo así cada una de las placas de las mismas. El proceso de soldadura se efectuó de manera perpendicular al sentido de laminación del material base, con la finalidad de que la fuerza ejercida sobre la probeta durante el ensayo de tracción fuera paralela al sentido de laminación, ya que el material trabaja mejor durante estas condiciones, se realizaron dos cordones de soldadura, uno por la cara superior y otro por la cara inferior con la finalidad de lograr una mayor penetración, la soldadura fue en posición plana o de nivel, el tipo de junta fue a “tope” y con una abertura de raíz de 3mm, ya que estos parámetros son aceptables para soldadura de ranuras cuadradas con espesores de material base hasta $\frac{1}{4}$ de pulgada o lo que es lo mismo 6,35 mm según lo indica la AWS D1.1 , y con un electrodo E6013 de 1/8” o 3,2 mm de diámetro, ya que es uno de los electrodos más usados para este tipo de procesos.
- 4. Corte para probetas de tracción y doblado:** de acuerdo a la norma AWS B4.0 (2007) Métodos estandarizados para pruebas mecánicas de soldaduras, a la 15 muestras soldadas se les realizaron cortes de descarte en sentido perpendicular al cordón de soldadura, a 15 mm del borde superior e inferior con la finalidad de eliminar posibles errores o imperfecciones provocados por el inicio y fin del proceso de soldadura en cada muestra, quedando así las mismas con dimensiones de 225 mm de ancho y 101 mm de longitud,

posteriormente se realizaron tres cortes paralelos al sentido de laminación o perpendiculares al cordón de soldadura en cada una de las muestras, obteniendo así, una probeta para doblado de cara, una para doblado de raíz, ambas con 225 mm de ancho y 38 mm altura y una para tracción de 225mm de ancho y 25mm de altura .Posterior a esto se realizaron cortes al material base, para obtener 3 probetas de tracción con las mismas dimensiones que las probetas de tracción soldadas con la finalidad de caracterizar el material.

- 5. Mecanizado de las probetas de tracción:** se realizó el mecanizado de 15 probetas de tracción soldadas y 3 probetas de tracción para caracterización con una fresadora TOS KURIM hecha en Checoslovaquia. Se midió el ancho de las probetas para la mecanización y se desbastaron con una fresa de 1” hasta dejar las caras totalmente planas y asegurarse que cumplieran con la medida de 25mm, luego se realizaron desbaste de 1mm de profundidad en la probeta desde el centro del cordón de soldadura hasta lograr un valor de 20mm para el ancho del cuello, y el resto de la geometría indicada por la norma AWS B4 (2007). Métodos Estandarizados para pruebas mecánicas de soldaduras como se muestra en la figura 16.



| Espécimen | W(mm) | C (mm) | A (mm) |
|-----------|--------------|-------------|--------|
| 1 | 13 ± 0.4 | 19 (aprox.) | 60 |
| 2 | 20 ± 2.4 | 25 (aprox.) | 60 |
| 3 | 25 ± 1.6 | 38 (aprox.) | 60 |
| 4 | 38 ± 3.2 | 50 (aprox.) | 60 |

Figura 16. Espécimen de probeta de soldadura.

Fuente: AWS B4 (2007). Métodos Estandarizados para pruebas mecánicas de soldaduras.

6. Ensayo de tracción: se realizó mediante una máquina de ensayos de tracción ubicada en TREXA C.A, de marca SISTEMAS DE ENSAYO, S.L., modelo MEM-101-10/SDC de fabricación española que cuenta con un esfuerzo máximo de 100 kN, se ingresaron datos al software del espesor (6mm) y el ancho de la sección reducida de la probeta (25mm), se sujetó la probeta en la maquina mediante las mordazas de la misma como se muestra en la figura 17, luego la maquina se encargó de aplicar e ir aumentando gradualmente una fuerza de tracción hasta que el alargamiento fue tal que se produjo la fractura de la probeta, el software se encargó de arrojar cada uno de los resultados de interés obtenidos del ensayo, este procedimiento se le realizo a cada una de las probetas dispuestas para este ensayo. Los valores arrojados por el ensayo de las probetas soldadas y de caracterización se tabularon, donde los datos se distribuyeron por grupos ensayados. Todo esto permitió realizar una comparación de las propiedades mecánicas de las probetas soldadas con la finalidad de entender y predecir el comportamiento de la resistencia a la tracción del cordón de soldadura.



Figura 17. Máquina de ensayo de tracción. SISTEMAS DE ENSAYO, S.L., modelo MEM-101-10/SDC.

7. Ensayo de doblado: Se realizó un ensayo de doblado de cara y de raíz con apoyo en tres puntos como se muestra en la figura 18 con una prensa hidráulica de 200 Ton, antes de comenzar fueron desbastadas con un esmeril las superficies los cordones de soldadura de cada probeta del lado correspondiente, las probetas de doblado de raíz fueron desbastadas en la cara, y las probetas de doblado de cara se desbastaron en la raíz con la finalidad de dejar una superficie plana donde sería apoyado el punzón según lo indica la norma ANSI/AWS D1.1 (2010) Código de soldadura de acero estructural, luego se apoyó la probeta sobre la matriz con la soldadura en la parte media de la garganta. Las probetas para doblado de cara se colocaron con la cara de la soldadura hacia la garganta de la matriz; las probetas para doblado de raíz se colocaron con la raíz de la soldadura hacia la garganta de la matriz. El punzón (o macho) fue forzado a ejercer una presión en el punto medio de la probeta, empujándola dentro de la garganta hasta que la curvatura de las probetas formó aproximadamente una U.

Los Criterios de aceptación tomados en cuenta en los ensayos de doblado se realizaron de acuerdo a la norma AWS D1.1M, Código de soldadura de acero estructural, criterios que se tomaron en cuenta cuando se examinaron visualmente la superficie convexa de la probeta de curvatura. Para su aceptación, fue tomado en cuenta que las superficies no contuvieran discontinuidades que excedieran las siguientes dimensiones:

- 3 mm - medido en cualquier dirección en la superficie.
- 10 mm - la suma de las máximas dimensiones de todas las discontinuidades que excedieron de 1 mm, pero inferior o igual a 3 mm.
- 6 mm - la grieta máxima en las esquinas, excepto cuando las grietas de las esquinas resultaron de una inclusión de escoria visible o de otra discontinuidad generada durante la fusión, se aplicó el máximo de 3 mm.

No se tomó en cuenta las probetas con grietas en las esquinas de más de 6 mm sin evidencia de inclusiones de escoria u otra discontinuidad de tipo de fusión.



Figura 18. Ensayo de doblado con apoyo en tres puntos.

- 8. Ensayo de micro-dureza vickers:** para el ensayo fueron extraídas 5 muestras al azar una por cada parámetro de soldadura, de 30 mm de ancho y 20 mm de longitud de las probetas de doblado 1, 5, 8, 10, y 15 antes de ser ensayadas, y una muestra de 20mm x 20mm del metal base para la caracterización del material (ver figura 19) estas fueron cortadas mediante una cizalla. Este ensayo se basó en la norma E384 de ASTM, Método de prueba para medir la dureza knoop y vickers de materiales, se realizó mediante un micro-durómetro vickers BUEHLER como se muestra en la figura 20, ubicado en el laboratorio de materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad José Antonio Paz. Se colocó la muestra en el equipo, mediante un indentador piramidal se realizaron tres indentaciones por zona a analizar con una carga de 300kgf durante 10 segundos, esto dejó una huella en el material que permitió con el equipo medir las diagonales de dicha indentación y obtener el valor de la dureza en unidades de HV. Fueron escogidos los dos valores más cercanos por zona indentada, dichos valores de

dureza fueron tabulados y graficados con la finalidad de entender el comportamiento de la dureza del material al ser soldado.



Figura 19. Muestras utilizadas en ensayo micro-dureza.



Figura 20. Máquina de ensayo micro-dureza BUEHLER.

Fase III: Evaluar los resultados para obtener el comportamiento de la resistencia a la tracción del cordón de soldadura.

En la tercera fase se analizaron los resultados de la soldadura de las muestras con la finalidad de encontrar aquel defecto que predominó en el cordón, para determinar dicho defecto se cumplió con las siguientes etapas:

1. Análisis metalográfico: se prepararon las muestras cuidadosamente de tal manera que quedaron aptas para el análisis macroscópico y microscópico, esto basado en la norma ASTM E-3 Preparación de muestras metalográficas. La preparación estuvo dispuesta de los siguientes pasos:

- **Corte de la muestra:** para el análisis macroscópico se utilizaron 5 muestras soldadas una por cada parámetro de soldadura utilizado como se muestra en la figura 21, en el caso del análisis microscópico fueron utilizadas las 6 muestras dispuestas para el ensayo de micro-dureza. El análisis microscópico se realizó antes del ensayo de micro-dureza con el fin de que las indentaciones no interfirieran en el estudio.



Figura 21. Muestras utilizadas en macroscopía.

- **Desbaste de la muestra:** se realizaron desbastes a la superficie en una superficie plana para que quedará de manera homogénea rotando el sentido del desbaste en 90 grados cada vez que se cambió el número de lija, la probeta quedó plana y el rayado en un solo sentido, para el desbaste grueso se utilizó una desbastadora

mecánica modelo Leco BG-30 que se encuentra en el laboratorio de materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UJAP, y se continuo con lijas número 80, luego se utilizaron lijas 240 y 320 para un desbaste intermedio y 400,600, 1200 para un desbaste fino.

- **Pulido de la muestra:** el pulido se realizó con una pulidora metalográfica MetaServ 2000 la cual se encuentra en el laboratorio de materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad José Antonio Páez, la pulidora posee dos discos giratorios los cuales giran a las rpm de conveniencia, se sujetaron las muestras sobre los discos en sentido contrario al movimiento del mismo balanceando tiempo y presión, un pulido grueso con alúmina 0,1 % con el disco izquierdo, y un proceso de pulido fino con alúmina 0,05 % con el disco derecho, se agregó un poco de agua a los discos en el proceso hasta eliminar las líneas muy finas dejadas en la etapa de desbaste hasta que se produjo una superficie muy brillante, parecida a un espejo.
 - **Ataque químico para macroscopía:** la cara pulida de cada una de las muestras dispuestas para el análisis macroscópico, se sometió a un ataque químico por frotación con una solución de Ioduro de Potasio al 20% en Iodo y 10% Potasio. El reactivo disolvió primero los bordes de grano definiéndolos, luego se roció con Etanol y se finalizó con el secado de las muestras.
 - **Ataque químico para microscopia:** al finalizar el pulido de las muestras dispuestas para él análisis microscópico, se realizó un ataque químico por frotación con Nital al 2% de ácido nítrico.
- 2. Macroscopía:** Se realizó un examen visual directo y con lupa 10X en cada una de las muestras elegidas, con la finalidad de observar e identificar las zonas de fusión luego del ataque químico y los defectos o heterogeneidades generados en cada uno de los cordones de soldadura.
- 3. Microscopía:** se ejecutó un análisis microscópico en cada una de las muestras soldadas elegidas de cada grupo respectivo a sus parámetros de

soldadura y a la muestra de caracterización, con aumentos de 100X y 500X mediante un microscopio óptico marca ACCU-SCOPE ubicado en el laboratorio de materiales de la Escuela De Ingeniería Mecánica de la UJAP como se muestra en la figura 22, con el objetivo de determinar y diferenciar la microestructura de cada muestra, diferenciar las fases de las mismas, conocer de manera microestructural cuáles son los microconstituyentes presentes en el acero, y por último, caracterizar el acero utilizado en este estudio.



Figura 22. Microscopio óptico ACCU-SCOPE.

Fase IV: Obtener el modelo del comportamiento de la resistencia a la tracción del cordón de soldadura.

Los resultados obtenidos y analizados en la tercera fase fueron modelados mediante un software de cálculo matemático, estableciendo el comportamiento de la resistencia en función de cada una de las variables tomadas en cuenta en el proceso de soldadura, se obtuvo una correlación entre ellas mediante una regresión lineal, que nos permitió hallar el modelo del comportamiento de la

resistencia a la tracción del cordón de soldadura. Se obtuvo y ajusto un modelo predictivo a un conjunto de datos observados de valores de la resistencia de tracción, siendo esta la variable dependiente (Y), obtenidas como resultados de los ensayos de tracción, y las variables independientes (Xj) siendo estas los parámetros de soldadura tomados para cada probeta.

Una vez abierto el software se hizo clic en Datos y después en Análisis de datos, como se ilustra en la figura 23. Mostrándose así el cuadro de diálogo de la figura 24.

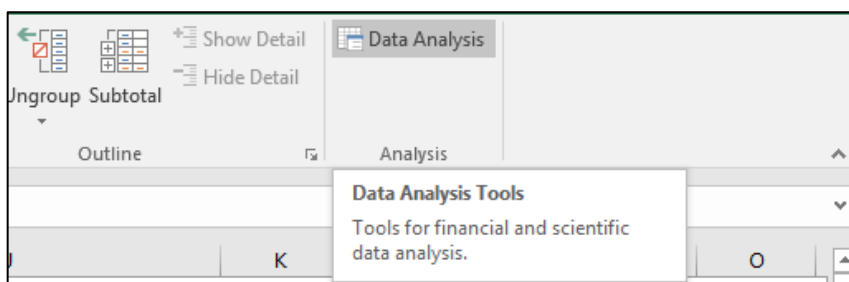


Figura 23. Herramienta del análisis de datos de Excel.

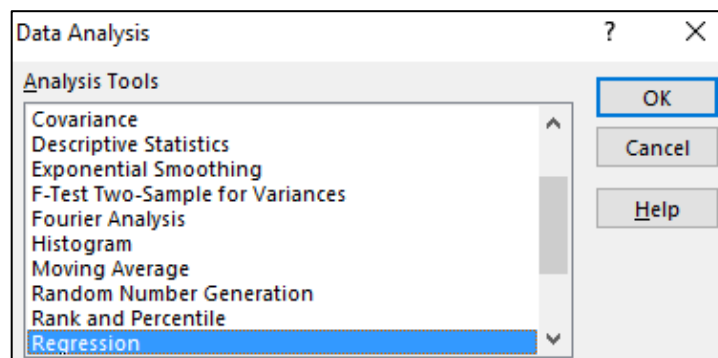


Figura 24. Cuadro de diálogo del análisis de datos.

Se seleccionó la opción Regresión, apareciendo entonces el cuadro de diálogo de la figura 25, en el cual se marcó lo siguiente: las entradas donde estaban los datos de las variables, tanto dependientes como independientes, el nivel de confianza. También se definió dónde se deseó que aparecieran los resultados ya que, de no hacerlo, la información aparecería en otra hoja de cálculo. Por último, se seleccionó las casillas de verificación Residuos y Residuos estándares.

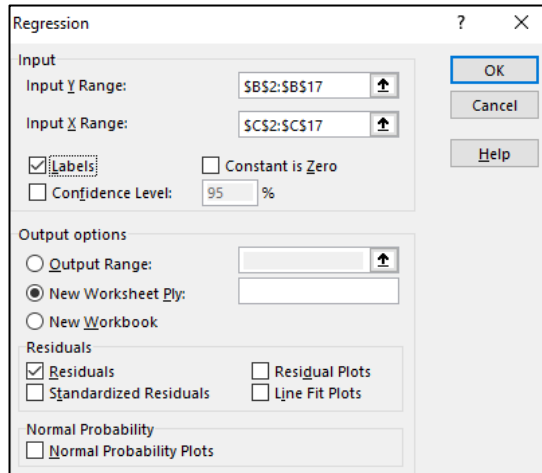


Figura 25. Cuadro de diálogo de la regresión.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Variables que afectan la resistencia del cordón de soldadura.

4.1.1 Selección del número de probetas soldadas para ensayo de tracción.

Como resultado de introducir los valores necesarios para la selección de probetas soldadas para el ensayo de tracción en el software, se obtuvo un resultado de 15 probetas para una confiabilidad de 94%.

4.1.2 Parámetros utilizados en el proceso de soldadura SMAW.

Se obtuvo el rango favorable para el voltaje va desde 18,5V hasta 22,5V y para la intensidad de corriente desde 70A hasta 130A, además de la velocidad con la que realizaron ambos cordones en el proceso de soldadura, en base a esto fueron utilizados los parámetros que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros utilizados en el proceso de soldadura SMAW.

| Grupo | Muestra | Voltaje (V) | Amperaje (A) | Velocidad de avance C1 (mm/min) | Velocidad de avance C2 (mm/min) |
|-------|---------|-------------|--------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 1 | 18 | 75 | 200,61 | 196,55 |
| 1 | 2 | 18 | 75 | 198,84 | 196,70 |
| 1 | 3 | 18 | 75 | 208,16 | 198,99 |
| 2 | 4 | 19 | 89 | 213,53 | 242,59 |
| 2 | 5 | 19 | 89 | 199,44 | 247,79 |
| 2 | 6 | 19 | 89 | 249,52 | 187,10 |
| 3 | 7 | 20 | 103 | 255,44 | 267,07 |
| 3 | 8 | 20 | 103 | 298,29 | 303,71 |
| 3 | 9 | 20 | 103 | 281,12 | 298,41 |
| 4 | 10 | 21 | 117 | 276,57 | 302,89 |
| 4 | 11 | 21 | 117 | 327,77 | 341,44 |
| 4 | 12 | 21 | 117 | 318,86 | 296,60 |
| 5 | 13 | 22 | 131 | 323,19 | 309,33 |
| 5 | 14 | 22 | 131 | 316,55 | 353,74 |
| 5 | 15 | 22 | 131 | 330,25 | 361,55 |

4.1.2 Lista de defectos utilizados en la inspección.

La lista obtenida de defectos considerados en la inspección y análisis de las muestras de soldadura se muestra en el cuadro 4.

Cuadro 4. Listado de defectos considerados.

| Defecto | Tipo |
|---------|--|
| 1 | Porosidad Dispersada |
| 2 | Porosidad Tubular |
| 3 | Porosidad Alineada |
| 4 | Porosidad Alargada |
| 5 | Fusión Incompleta |
| 6 | Fusión Incompleta entre soldadura y metal base |
| 7 | Penetración Incompleta |
| 8 | Inclusiones de Escoria |
| 9 | Grietas Transversales |
| 10 | Grieta Longitudinal |

4.2 Efecto de cada variable sobre el comportamiento de la resistencia a la tracción del cordón de soldadura.

A continuación, se presentan cada uno de los puntos de mayor relevancia que se llevaron a cabo para determinar el efecto de cada variable sobre el comportamiento de la resistencia a la tracción.

4.2.1 Resultados del corte del material.

Como resultados del corte del material se obtuvieron las muestras que se presentan en la figura 26.



Figura 26. Muestras obtenidas del corte del material.

4.2.2 Resultados de soldadura de las muestras.

Luego de efectuado el proceso de soldadura SMAW se obtuvieron las muestras soldadas, como ejemplo se muestra una de ellas en la figura 27.



Figura 27. Muestra después del proceso de soldadura.

4.2.3 Resultados de corte para probetas de tracción y doblado.

Una vez efectuado los cortes a las muestras soldadas se obtuvieron las probetas como se muestra en la figura 28. En la parte superior e inferior se observan las probetas dispuestas para ensayo de doblado y en el medio de estas la probeta para ensayo de tracción.



Figura 28. Probetas obtenidas para tracción y doblado.

4.2.4 Resultados de mecanizado de las probetas de tracción.

Como resultado de un buen proceso de mecanizado donde no se generaron concentradores de esfuerzo se obtuvieron como resultado las probetas soldadas que se muestran en la figura 29, y las probetas dispuestas para caracterización que se muestran en la figura 30.



Figura 29. Probetas de tracción soldadas y mecanizadas.



Figura 30. Probetas de tracción para caracterización mecanizadas.

4.2.1 Resultados del ensayo de tracción.

Como resultados de este ensayo se obtuvieron curvas del comportamiento del material de cada una de las probetas ensayadas mostradas en la figura 31 y 32, en valores de fuerza vs recorrido (ver Anexo A), en dichas curvas se presentaron 2 zonas a destacar, la zona de deformación elástica donde se pudo observar el esfuerzo de límite elástico y en la zona plástica el esfuerzo máximo y el esfuerzo de rotura.



Figura 31. Probetas soldadas utilizadas en el ensayo de tracción.



Figura 32. Probetas para caracterización utilizadas en el ensayo de tracción.

Producto del ensayo de tracción de las probetas pertenecientes al grupo 1 se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 4, donde se observó como dato resaltante una resistencia a la tracción de 393,8 MPa.

Tabla 4. Datos obtenidos del ensayo de tracción del grupo 1.

| | Unidades | Probeta 1 | Probeta 2 | Probeta 3 | Grupo 1 |
|----------------------------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 49800 | 42830 | 49130 | 47253,3 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 415,0 | 356,9 | 409,4 | 393,8 |
| Alarg. carga máxima (Agt) | %Lo | 7,34 | 5 | 8,99 | 7,1 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 37496 | 32248 | 36992 | 35578,7 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 312.5 | 268.7 | 308.3 | 296.5 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 7,86 | 5,7 | 9,39 | 7,7 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 35195 | 33836 | 31686 | 33572,3 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 293.3 | 282 | 264.1 | 279.8 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 2,85 | 2,76 | 2,71 | 2,8 |
| Módulo elástico € | MPa | 4381,5 | 4259,2 | 3855,4 | 4165,4 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | - | 1,41 | 1,27 | 1,55 | 1,4 |

Del ensayo de las probetas de tracción pertenecientes al grupo 2 se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 5, donde se observó como dato resaltante una resistencia a la tracción de 361,9 MPa.

Tabla 5. Datos obtenidos del ensayo de tracción del grupo 2.

| | Unidades | Probeta 4 | Probeta 5 | Probeta 6 | Grupo 2 |
|----------------------------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 38990 | 55860 | 35430 | 43426,7 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 324,9 | 465,5 | 295,3 | 361,9 |
| Alarg. carga máxima (Agt) | %Lo | 4,66 | 8,42 | 2,47 | 5,2 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 29357 | 42059 | 26677 | 32697,7 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 244,6 | 350,5 | 222,3 | 272,5 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 5,19 | 8,83 | 3,22 | 5,7 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 31222 | 36172 | 34118 | 33837,3 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 260,2 | 301,4 | 284,3 | 282,0 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 2,7 | 2,1 | 2,2 | 2,3 |
| Módulo elástico € | MPa | 4047,7 | 5840 | 5794,2 | 5227,3 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | - | 1,25 | 1,54 | 1,04 | 1,3 |

Como resultado del ensayo de tracción de las probetas pertenecientes al grupo 3 se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 6, donde se observó como dato resaltante una resistencia a la tracción de 475,9 MPa.

Tabla 6. Datos obtenidos del ensayo de tracción del grupo 3.

| | Unidades | Probeta 7 | Probeta 8 | Probeta 9 | Grupo 3 |
|----------------------------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 58190 | 55600 | 57540 | 57110,0 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 484,9 | 463,3 | 479,5 | 475,9 |
| Alarg. carga máxima (Agt) | %Lo | 11,39 | 9,98 | 12,44 | 11,3 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 43814 | 41863 | 43324 | 43000,3 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 365,1 | 348,9 | 361,0 | 358,3 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 11,94 | 10,39 | 13,28 | 11,9 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 36689 | 34898 | 36486 | 36024,3 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 305,7 | 290,8 | 307,1 | 301,2 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 2,14 | 1,99 | 2,14 | 2,1 |
| Módulo elástico € | MPa | 5205 | 5511,2 | 5730,5 | 5482,2 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | - | 1,59 | 1,59 | 1,58 | 1,6 |

Producto del ensayo de tracción de las probetas pertenecientes al grupo 4 se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 7, donde se observó como dato resaltante una resistencia a la tracción de 437,1 MPa.

Tabla 7. Datos obtenidos del ensayo de tracción del grupo 4.

| | Unidades | Probeta 10 | Probeta 11 | Probeta 12 | Grupo 4 |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 57540 | 49950 | 49860 | 52450,0 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 479,5 | 416,3 | 415,5 | 437,1 |
| Alarg. carga máxima (Agt) | %Lo | 13,26 | 14,5 | 13,86 | 13,9 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 43324 | 37609 | 37542 | 39491,7 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 361 | 313,4 | 312,9 | 329,1 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 17,95 | 19,56 | 17,8 | 18,4 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| F, Límite elástico (Flim) | N | 36374 | 30778 | 30996 | 32716,0 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 306,1 | 256,5 | 258,3 | 273,6 |
| Def, Lím, elástico (Alim) | %Lo | 2,45 | 1,68 | 1,79 | 2,0 |
| Módulo elástico € | MPa | 5262,5 | 5530,7 | 5545,1 | 5446,1 |
| Rel, Fza,máx./Fza,Lím, | - | 1,58 | 1,62 | 1,61 | 1,6 |

Del ensayo de las probetas de tracción pertenecientes al grupo 5 se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 8, donde se observó como dato resaltante una resistencia a la tracción de 464,1 MPa.

Tabla 8. Datos obtenidos del ensayo de tracción del grupo 5.

| | Unidades | Probeta 13 | Probeta 14 | Probeta 15 | Grupo 5 |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 56480 | 55100 | 55490 | 55690,0 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 470,7 | 459,2 | 462,4 | 464,1 |
| Alarg. carga máxima (Agt) | %Lo | 13,54 | 10,44 | 9,49 | 11,2 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 42526 | 41487 | 41781 | 41931,3 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 354,4 | 345,7 | 348,9 | 349,7 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 18,88 | 11,15 | 10,25 | 13,4 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| F, Límite elástico (Flim) | N | 35471 | 35106 | 35431 | 35336,0 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 295,6 | 292,6 | 295,3 | 294,5 |

Continuación de la Tabla 8. Datos obtenidos del ensayo de tracción del grupo 5

| | Unidades | Probeta 13 | Probeta 14 | Probeta 15 | Grupo 5 |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|---------|
| Def, Lím, elás tico (Alim) | %Lo | 2,75 | 1,91 | 2,24 | 2,3 |
| Módulo elástico € | MPa | 5535,6 | 6954,5 | 6153,7 | 6214,6 |
| Rel, Fza,máx,/Fza,Lím, | - | 1,59 | 1,57 | 1,57 | 1,6 |

Analizando los resultados de los ensayos de tracción de las probetas soldadas se logró observar que en las probetas 10, 11, 12, pertenecientes al grupo 4 y la probeta 13 perteneciente al grupo 5 ocurrió fractura dúctil ya que se evidenció en las probetas un alargamiento lo que generó una forma de copa o cono en la zona de rotura. El metal base de la probeta es conocido por tener buena ductilidad, debido a esto se puede decir que en estas probetas se generó una fractura dúctil ya que la rotura ocurrió en el metal base.

El resto de las probetas ensayadas presentaron una fractura frágil generada en su mayoría en el cordón de soldadura con excepción de las probetas 3 y 9 pertenecientes a los grupos 1 y 3 respectivamente. Como resultado de la comparación de los valores de resistencia a la tracción con los parámetros utilizados en el proceso de soldadura de cada grupo como se muestra en la tabla 9.

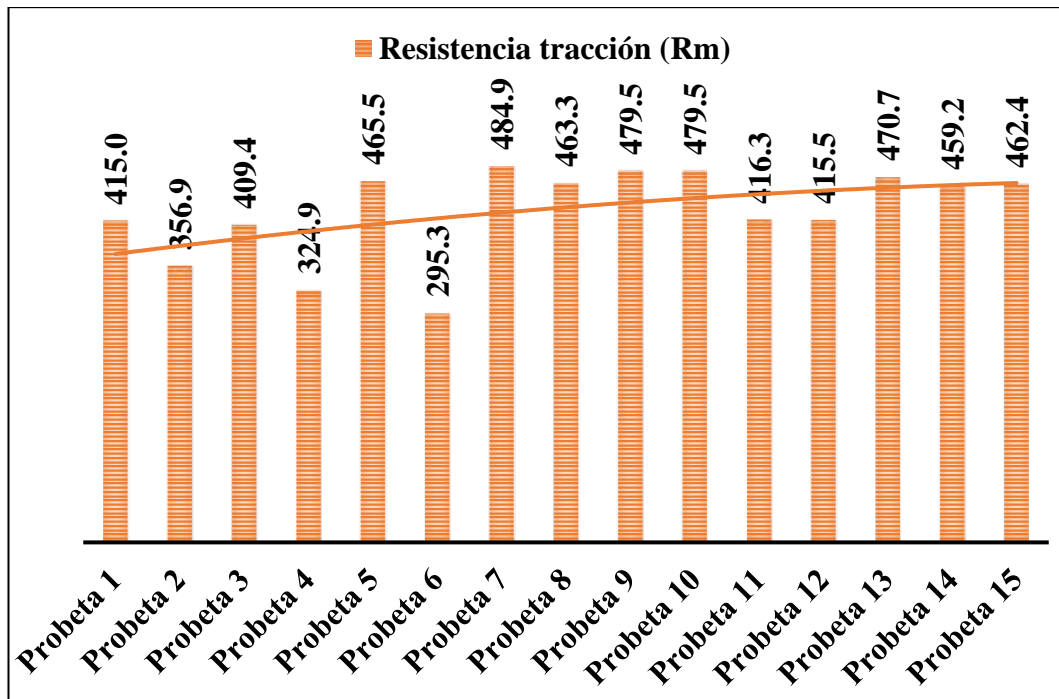
Tabla 9. Resistencia, fractura y parámetros de grupos ensayados.

| | Resistencia tracción (Mpa) | Tipo de fractura | Lugar de fractura | Voltaje (V) | Corriente (I) |
|------------------|----------------------------|------------------|-------------------|-------------|---------------|
| Probeta 1 | 415,0 | Frágil | Cordón | | |
| Probeta 2 | 356,9 | Frágil | Cordón | | |
| Probeta 3 | 409,4 | Frágil | ZAC | | |
| Grupo 1 | 393,8 | | | 18 | 75 |
| Probeta 4 | 324,9 | Frágil | Cordón | | |
| Probeta 5 | 465,5 | Frágil | Cordón | | |
| Probeta 6 | 295,3 | Frágil | Cordón | | |
| Grupo 2 | 361,9 | | | 19 | 89 |
| Probeta 7 | 484,9 | Frágil | Cordón | | |
| Probeta 8 | 463,3 | Frágil | Cordón | | |
| Probeta 9 | 479,5 | Frágil | ZAC | | |

Continuación de la **Tabla 9**. Resistencia, fractura y parámetros de grupos ensayados.

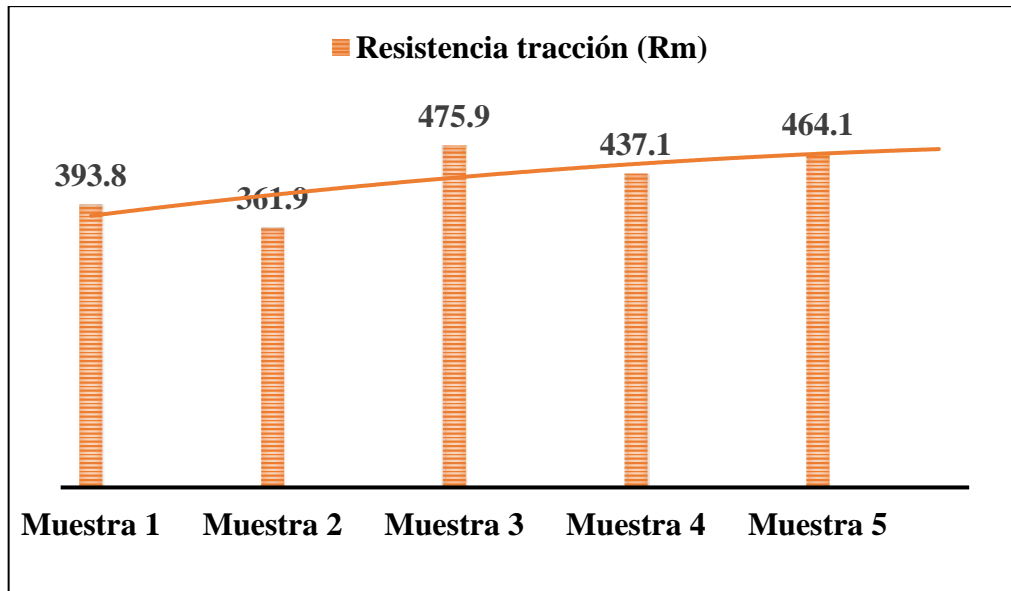
| | Resistencia tracción (Mpa) | Tipo de fractura | Lugar de fractura | Voltaje (V) | Corriente (I) |
|-------------------|----------------------------|------------------|-------------------|-------------|---------------|
| Grupo 3 | 475,9 | | | 20 | 103 |
| Probeta 10 | 479,5 | Dúctil | Metal Base | | |
| Probeta 11 | 416,3 | Dúctil | Metal Base | | |
| Probeta 12 | 415,5 | Dúctil | Metal Base | | |
| Grupo 4 | 437,1 | | | 21 | 117 |
| Probeta 13 | 470,7 | Dúctil | Metal Base | | |
| Probeta 14 | 459,2 | Frágil | Cordón | | |
| Probeta 15 | 462,4 | Frágil | Cordón | | |
| Grupo 5 | 464,1 | | | 22 | 131 |

Se dejó en evidencia que a mayores valores de corriente y voltaje la resistencia a la tracción de las probetas ensayadas aumento, tal y como se puede ver en la gráfica 1 la línea de tendencia del comportamiento de la resistencia a la tracción en las probetas.



Gráfica 1. Resistencia a la tracción por probetas.

Como se muestra una línea de tendencia de la gráfica 2, quedo en evidencia como la resistencia de cada grupo de probetas va en aumento.



Gráfica 2. Resistencia a la tracción por grupo.

Se realizó un análisis de la tendencia y el comportamiento de las probetas y grupos ensayados. Se pudo observar que el grupo 4 obtuvo valores menores en cuanto a resistencia con respecto al grupo 3 lo cual contradice un poco que a mayor intensidad de corriente y voltaje mayor resistencia, pero es importante recordar que este grupo de probetas no rompieron en el cordón por lo que los resultados arrojados de resistencia fueron del material base y no del cordón de soldadura, es decir que la resistencia del cordón fue mayor a la presentada por el material base y probablemente mayor que la del grupo 3, por lo que si se cumpliría a cabalidad con la tendencia antes mencionada.

El grupo 5 mostró valores mayores de resistencia a la tracción cumpliendo con la tendencia, sin embargo, la probeta 14 y 15 fracturaron en el cordón de soldadura, por lo que los cordones de soldadura en este grupo no fueron tan resistentes como en el grupo 4, se puede inferir que esto sucedió porque los parámetros utilizados en este grupo no fueron los más recomendables para la realización del proceso de soldadura.

Como resultado del ensayo de tracción de las 3 probetas dispuestas caracterizar el material se obtuvieron las propiedades mecánicas mostradas en la tabla 10.

Tabla 10. Datos obtenidos del ensayo de tracción para caracterización.

| | Unidades | Probeta 16 | Probeta 17 | Probeta 18 | Carácter.. |
|----------------------------------|----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 59140 | 59030 | 58340 | 58836,7 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 492,8 | 491,9 | 486,2 | 490,3 |
| Alarg. carga máxima (Agt) | %Lo | 13,1 | 13,42 | 14,9 | 13,8 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 44529 | 44446 | 43927 | 44300,7 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 123,7 | 123,5 | 122 | 123,1 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 19,03 | 19,8 | 21,58 | 20,1 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0 | 0 | 0 | 0,0 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 36818 | 36897 | 36294 | 36669,7 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 102,3 | 102,5 | 100,8 | 101,9 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 2,26 | 2,56 | 3,81 | 2,9 |
| Módulo elástico € | MPa | 5460,7 | 5358,4 | 5199,3 | 5339,5 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | - | 1,61 | 1,6 | 1,61 | 1,6 |

Al comparar la resistencia a la tracción promedio de 490MPa obtenida del ensayo de tracción y las propiedades de aceros AISI 10XX, se obtuvo como resultados que las propiedades mecánicas son aproximadamente cercanas un Acero AISI 1010 Normalizado (ver figura 33).



Figura 33. Esfuerzo máximo a tracción de un acero AISI 1010 normalizado.

Fuente: González, Luis. (1997). Efecto de los Tratamientos Térmicos de Enfriamiento continuo sobre la Estructura y las Propiedades Mecánicas en Aceros al Carbono Hipoeutectoides.

Si bien el valor promedio de la resistencia a la tracción del material base obtenido no corresponde exactamente con el valor de 371,66 MPa con el que es

comparado, la fuente indica como comentario que existió en su estudio una diferencia apreciable entre el resultado de tracción y su equivalente en vickers, ya que el equivalente es de un orden del 50% mayor, por lo que se pudo presentar una ruptura prematura. Se puede suponer en que el material pudo poseer una resistencia mayor de no ser por esa ruptura prematura y así acercarse más aun al valor de 490MPa del material base.

4.2.2 Resultados del ensayo de doblado.

De este ensayo se obtuvieron resultados cualitativos sobre el comportamiento de la ductilidad de los cordones de soldadura, los cuales no fueron favorables, es decir la mayoría de las muestras no lograron cumplir con los requisitos de aceptación, de 30 probetas ensayadas solo 8 lograron cumplir con los requisitos del examen visual, las que aprobaron fueron identificadas con el número 1 y la reprobadas con el número 0, resultando como aceptado el ensayo de doblado de cara y doblado de raíz solo en la muestra 5 y la muestra 11, y el grupo 2 como el grupo de mayor aceptación por haber obtenido mayor cantidad de muestras en total que aprobaron el ensayo. Se analizaron los resultados de doblado en función de porcentaje junto con los parámetros utilizados en el proceso de soldadura (ver tabla 11), quedo en evidencia que el grupo 2 obtuvo la mayor ductilidad a pesar de no haber obtenido buenos resultados en el ensayo de tracción por haber fracturado en el cordón de soldadura, lo que deja entrever que si bien los parámetros utilizados en este grupo no fueron los que generaron la mayor resistencia en el estudio si fueron capaces de generar una buena ductilidad.

Tabla 11. Aceptación de muestras de doblado y parámetros utilizados.

| | Doblado Cara | Doblado Raíz | Aceptación | Voltaje (V) | Corriente (I) |
|------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|--------------------------|
| Muestra 1 | 0 | 0 | 0% | | |
| Muestra 2 | 0 | 0 | 0% | | |
| Muestra 3 | 0 | 0 | 0% | | |
| Grupo 1 | 0% | 0% | 0% | 18 | 75 |
| Muestra 4 | 0 | 0 | 0% | | |

Continuación de la Tabla 11. Aceptación de muestras de doblado y parámetros utilizados.

| | Doblado Cara | Doblado Raíz | Aceptación | Voltaje (V) | Corriente (I) |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|--------------------------|
| Muestra 5 | 1 | 1 | 100% | | |
| Muestra 6 | 1 | 0 | 50% | | |
| Grupo 2 | 67% | 33% | 50% | 19 | 89 |
| Muestra 7 | 0 | 0 | 0% | | |
| Muestra 8 | 1 | 0 | 50% | | |
| Muestra 9 | 0 | 0 | 0% | | |
| Grupo 3 | 33% | 0% | 17% | 20 | 103 |
| Muestra 10 | 0 | 0 | 0% | | |
| Muestra 11 | 1 | 1 | 100% | | |
| Muestra 12 | 0 | 0 | 0% | | |
| Grupo 4 | 33% | 33% | 33% | 21 | 117 |
| Muestra 13 | 1 | 0 | 50% | | |
| Muestra 14 | 0 | 1 | 50% | | |
| Muestra 15 | 0 | 0 | 0% | | |
| Grupo 5 | 33% | 33% | 33% | 22 | 131 |

4.2.3 Resultados del ensayo de micro-dureza vickers.

Del ensayo de micro-dureza vickers realizado a las muestras soldadas se obtuvieron los valores que se muestran en la tabla 12, donde HV es el valor promedio de la dureza de cada muestra.

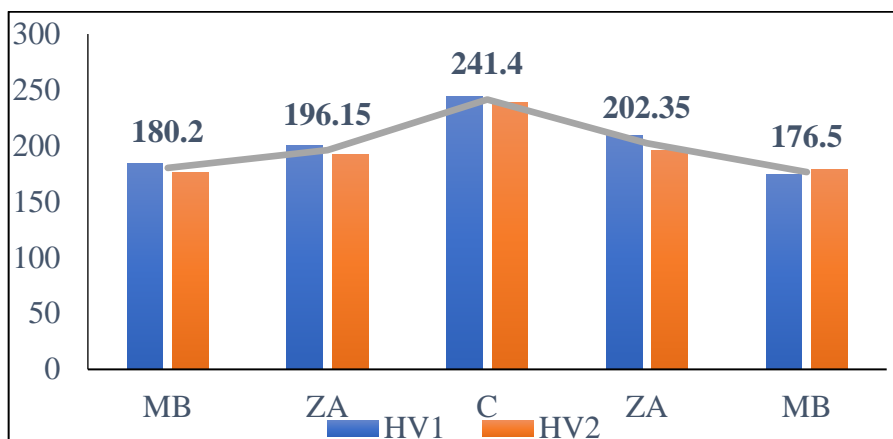
Tabla 12. Resultados de micro-dureza vickers de las muestras.

| Muestra 1, Grupo 1 | | | | | |
|---------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Dureza Vickers | MB | ZA | C | ZA | MB |
| HV1 | 183,9 | 200,3 | 244 | 208,9 | 174,6 |
| HV2 | 176,5 | 192 | 238,8 | 195,8 | 178,4 |
| HV | 180,2 | 196,15 | 241,4 | 202,35 | 176,5 |
| Muestra 5, Grupo 2 | | | | | |
| Dureza Vickers | MB | ZA | C | ZA | MB |
| HV1 | 179,6 | 175,1 | 239 | 221,6 | 176,3 |
| HV2 | 164,9 | 183,2 | 231,2 | 199,6 | 164,5 |
| HV | 172,25 | 179,15 | 235,1 | 210,6 | 170,4 |

Continuación de la Tabla 12. Resultados de micro-dureza vickers de las muestras.

| Muestra 8, Grupo 3 | | | | | |
|---------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Dureza Vickers | MB | ZA | C | ZA | MB |
| HV1 | 196,2 | 207,3 | 243,1 | 217,3 | 208,5 |
| HV2 | 169,4 | 216,9 | 262,9 | 229,8 | 174 |
| HV | 182,8 | 212,1 | 253 | 223,55 | 191,25 |
| Muestra 10, Grupo 4 | | | | | |
| Dureza Vickers | MB | ZA | C | ZA | MB |
| HV1 | 176,1 | 209,3 | 259,5 | 209,8 | 187,6 |
| HV2 | 182,6 | 213,1 | 243,5 | 193,6 | 189,3 |
| HV | 179,35 | 211,2 | 251,5 | 201,7 | 188,45 |
| Muestra 15, Grupo 5 | | | | | |
| Dureza Vickers | MB | ZA | C | ZA | MB |
| HV1 | 196,2 | 207,3 | 234,6 | 201,3 | 180,3 |
| HV2 | 201,1 | 213,5 | 246,1 | 209,3 | 194,7 |
| HV | 198,65 | 210,4 | 240,35 | 205,3 | 187,5 |

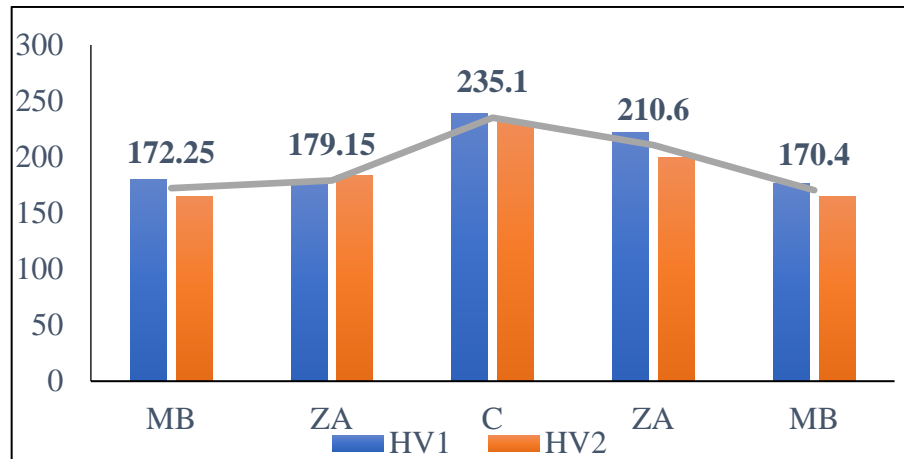
Como resultado del ensayo de micro-dureza efectuado a la muestra 1 perteneciente al grupo 1 se obtuvieron los valores promedio por dureza, donde se observó que los valores entre las zonas afectadas, y los valores de las zonas de metal base por el calor no difieren mucho entre sí, por lo que el ensayo fue bastante preciso.



Gráfica 3. Micro-dureza a lo largo de la muestra 1, grupo 1.

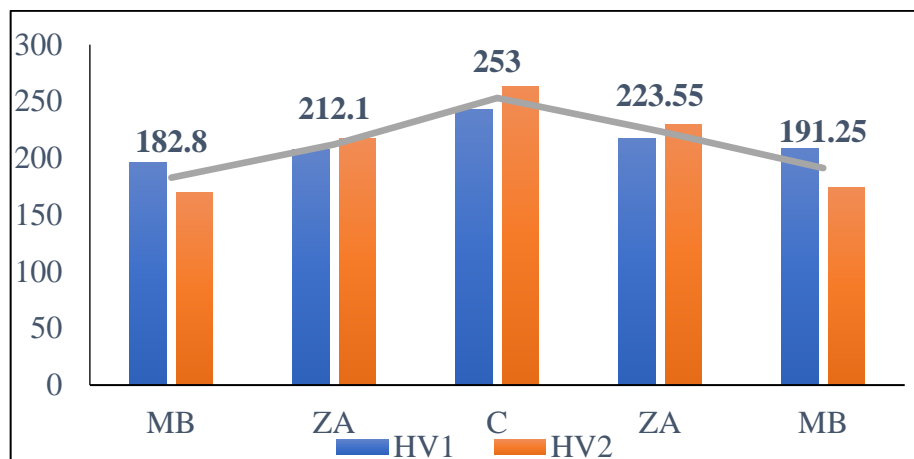
Producto del ensayo de micro-dureza de la muestra 5 perteneciente al grupo 2, se obtuvieron los resultados que se muestran en la gráfica 4. se pudo observar

que esta muestra presento la menor dureza en el cordón de soldadura de todas las muestras sometidas al ensayo.



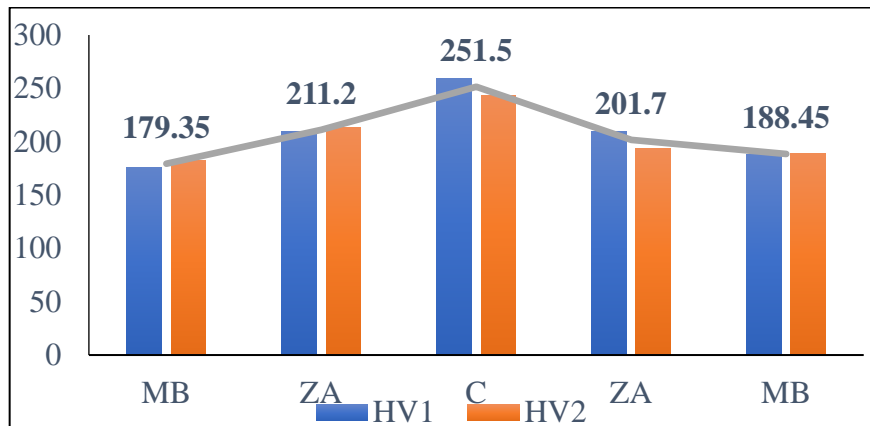
Gráfica 4. Micro-dureza a lo largo de la muestra 5, grupo 2.

En la gráfica 5 se muestran los resultados del ensayo de micro-dureza vickers de la muestra 8 perteneciente al grupo 3, donde se pudo observar que la muestra 5 obtuvo la mayor dureza en el cordón de soldadura de todas las muestras analizadas.



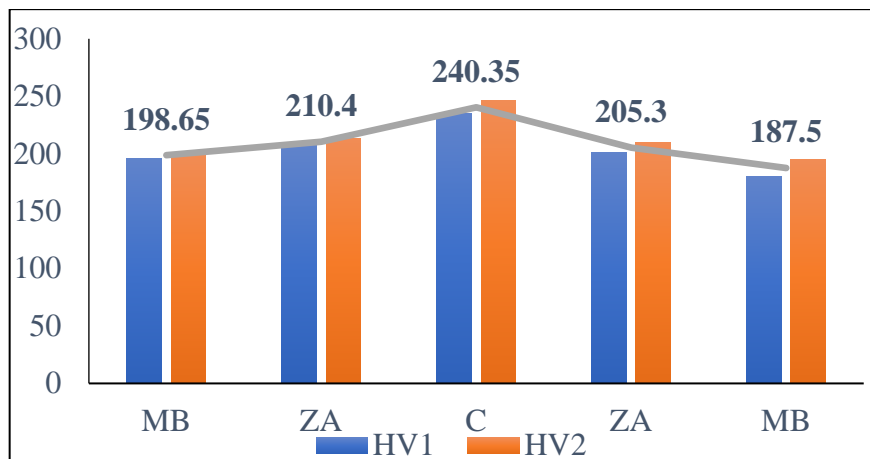
Gráfica 5. Micro-dureza a lo largo de la muestra 8, grupo 3.

Del ensayo realizado a la muestra 10 perteneciente al grupo 4 se obtuvieron los valores promedio por dureza que se muestran en la gráfica 6. Donde se pudo observar un buen comportamiento a lo largo de la zona analizada.



Gráfica 6. Micro-dureza a lo largo de la muestra 10, grupo 4.

Se puede observar en la gráfica 7 el comportamiento de las zonas afectadas por el calor, del metal base y del cordón de soldadura de la muestra 15 perteneciente al grupo 5.

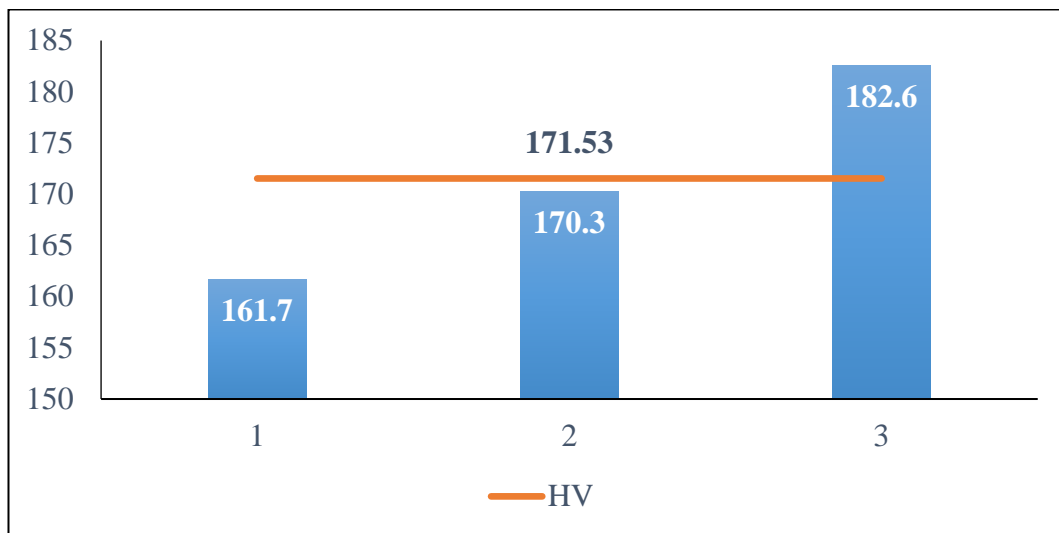


Gráfica 7. Micro-dureza a lo largo de la muestra 15, grupo 5.

Se presentó un comportamiento en forma de campana a lo largo del área analizada de cada muestra, lo que indicó que las zonas afectadas por el calor y la zona de fusión o cordón de soldadura presentan mayor dureza que el material base, La forma de campana es un indicador de que los parámetros de soldadura usados generaron un comportamiento esperado, ya que, al soldar, el tamaño de grano original del material disminuyó aumentando la dureza en la zona del cordón gracias al calor aportado durante la soldadura, aumentando así la dureza.

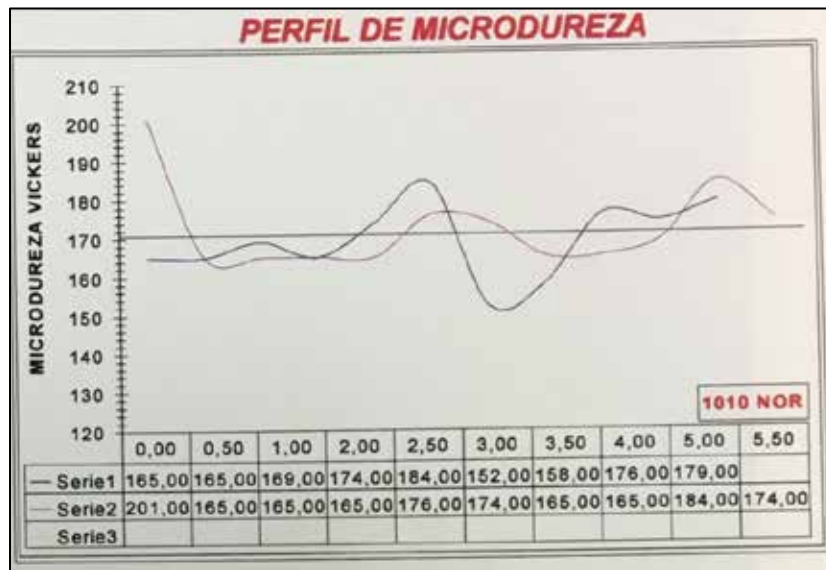
A pesar de que la corriente y el voltaje aportado fueron aumentando para cada muestra, en cada gráfica se pueden observar un mismo rango de valores en la dureza del cordón de soldadura y en la zona afectada por el calor, por lo que se puede inferir en que la dureza es una propiedad mecánica que forma parte del material aportado y que no varía mucho en función de los parámetros utilizados en el proceso de soldadura.

De los resultados obtenidos del ensayo de micro-dureza vickers a la muestra de caracterización, se obtuvo un promedio del valor de la dureza del material base como se muestra en la gráfica 8.



Gráfica 8. Micro-dureza a lo largo de la muestra de caracterización.

El valor promedio de 171,53 HV obtenido fue comparado con valores de micro-dureza de distintos aceros de bajo carbono. Se pudo inferir que el material base corresponde a un acero AISI 1010 normalizado gracias a la comparación establecida entre el acero estudiado y el mostrado en la gráfica 9 el cual posee una dureza promedio de 170,76 HV.



Gráfica 9. Micro-dureza de un acero AISI 1010 normalizado.

Fuente: González, Luis. (1997). Efecto de los Tratamientos Térmicos de Enfriamiento continuo sobre la Estructura y las Propiedades Mecánicas en Aceros al Carbono Hipoeutectoides.

4.3 Evaluación de resultados para obtener el comportamiento de la resistencia a la tracción del cordón de soldadura.

4.3.1 Resultados de macroscopía.

El análisis macroscópico fue realizado a 5 muestras seleccionadas una de cada grupo de muestras como se muestra en la Tabla 13.

En la figura 34 se puede observar el resultado del macro-ataque a las muestras 3 perteneciente al grupo 1, donde se pudo ver el cordón superior e inferior realizado a la muestra además de un orificio de gran tamaño en porcentaje con el espesor del material en medio de los cordones que evidencio falta de penetración.



Figura 34. Muestra 3 utilizada en macroscopía.

Tabla 13. Muestras analizadas en macroscopía.

| Muestras | Grupo |
|----------|-------|
| 3 | 1 |
| 5 | 2 |
| 8 | 3 |
| 11 | 4 |
| 13 | 5 |

En la muestra 5 perteneciente al grupo 2 se pudo observar claramente la zona de fusión o el metal aportado por el electrodo y la zona del material base (ver figura 35), al igual que la muestra 3 se observó falta de penetración a pesar de que la muestra fue soldada con parámetros de mayor valor que la muestra 3.



Figura 35. Muestra 5 utilizada en macroscopía.

La muestra 8 perteneciente al grupo 3 (ver figura 36) no logro mostrar lo suficiente la zona de fusión en diferenciación con la zona del metal base tal vez porque el tiempo en que la muestra duro bajo ataque no fue lo suficiente, sin embargo, se logra observar que le cordón inferior logro mayor penetración que le superior. A pesar de que ambos obtuvieron buena penetración aun así quedo una zona de vacío en medio de los cordones.



Figura 36. Muestra 8 utilizada en macroscopía.

En la figura 37 se puede apreciar el resultado de las muestras 11 luego de haber sido atacada químicamente, se pudo observar la zona de ambos cordones de soldadura, quedo en evidencia como el cordón superior tuvo una mayor penetración que el cordón inferior.



Figura 37. Muestra 11 utilizada en macroscopía.

La muestra 11 dejo en evidencia que el cordón superior obtuvo una mayor penetración en la muestra que el inferior (ver figura 38), además de que el agujero es de menor tamaño que el presente en la muestra 3, por lo que se pudo constatar que los parámetros utilizados al ser mayores aportaron más energía y más penetración del cordón sin embargo no la suficiente para obtener una penetración completa.



Figura 38. Muestra 13 utilizada en macroscopía.

En cada una de las muestras quedó en evidencia que fue realizado un proceso de soldadura, los orificios producto de la falta de penetración de los cordones aparecieron ya que no se obtuvo la energía necesaria de los parámetros

de soldadura para que la pieza se pudiera unir uniformemente, se puede inferir en que la junta a tope con dos cordones no fue suficiente para una penetración completa en el material, a pesar de que la norma ANSI/AWS D1.1 Código de soldadura de acero estructural, indica que este proceso es aceptable para soldadura de ranuras cuadradas con espesores de material base hasta $\frac{1}{4}$ de pulgada o lo que es lo mismo 6,35mm, además de que el electrodo E6013 pudo no haber sido el más indicado en cuento a lograr una penetración completa en una sola pasada y sin haber realizado un biselado en la junta a tope.

Como parte de la macroscopía, del análisis con aumento de 10X se obtuvieron una diversidad de defectos para cada muestra como se muestra en las tablas 14 y 15.

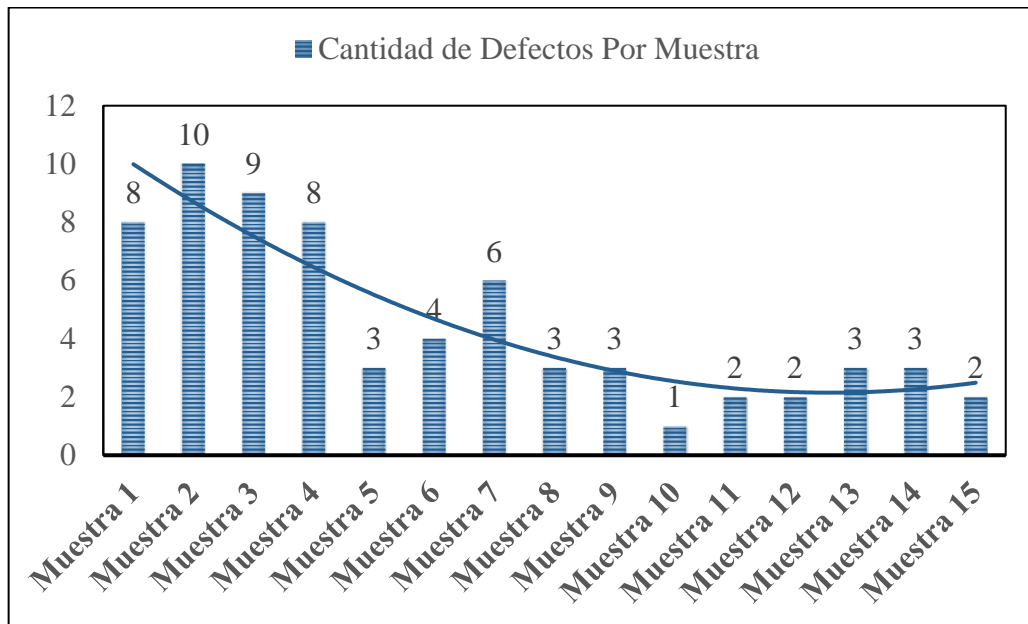
Tabla 14. Defectos encontrados por muestra parte 1.

| Defectos | Porosidad Dispersada | Porosidad Tubular | Porosidad Alineada | Porosidad Alargada | Fusión Incompleta |
|-------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Muestra 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| Muestra 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Muestra 3 | 1 | 3 | 0 | 0 | 1 |
| Muestra 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Muestra 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muestra 6 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 |
| Muestra 7 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| Muestra 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muestra 9 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Muestra 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Muestra 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Muestra 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Muestra 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muestra 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muestra 15 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Total | 11 | 5 | 1 | 5 | 11 |

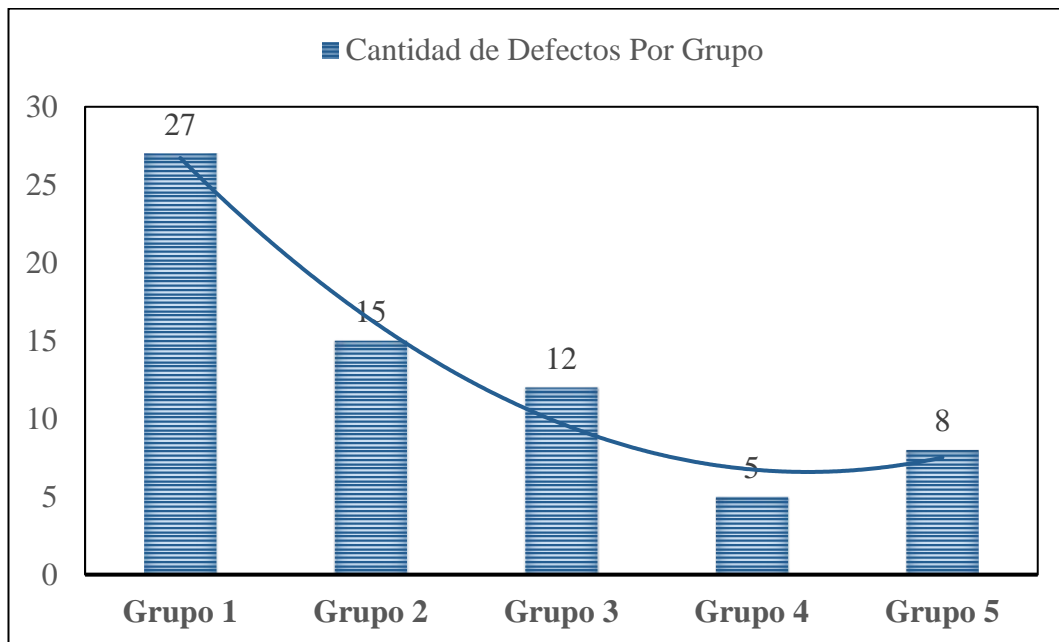
Tabla 15. Defectos encontrados por muestra parte 2.

| Defectos | Fusión Incompleta entre soldadura y metal base | Penetración Incompleta | Inclusiones de Escoria | Grietas Transversales | Grieta Longitudinal |
|-------------------|---|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Muestra 1 | 0 | 4 | 2 | 0 | 0 |
| Muestra 2 | 3 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| Muestra 3 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| Muestra 4 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Muestra 5 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| Muestra 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muestra 7 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| Muestra 8 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muestra 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muestra 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muestra 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muestra 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muestra 13 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Muestra 14 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Muestra 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 13 | 13 | 7 | 0 | 1 |

Los defectos fueron cuantificados por muestra (ver gráfica 10) y por grupo de muestra (ver gráfica 11), observándose una línea de tendencia que dejó ver que al aumentar el voltaje y la intensidad de corriente se generaron menos defectos en el proceso de soldadura.

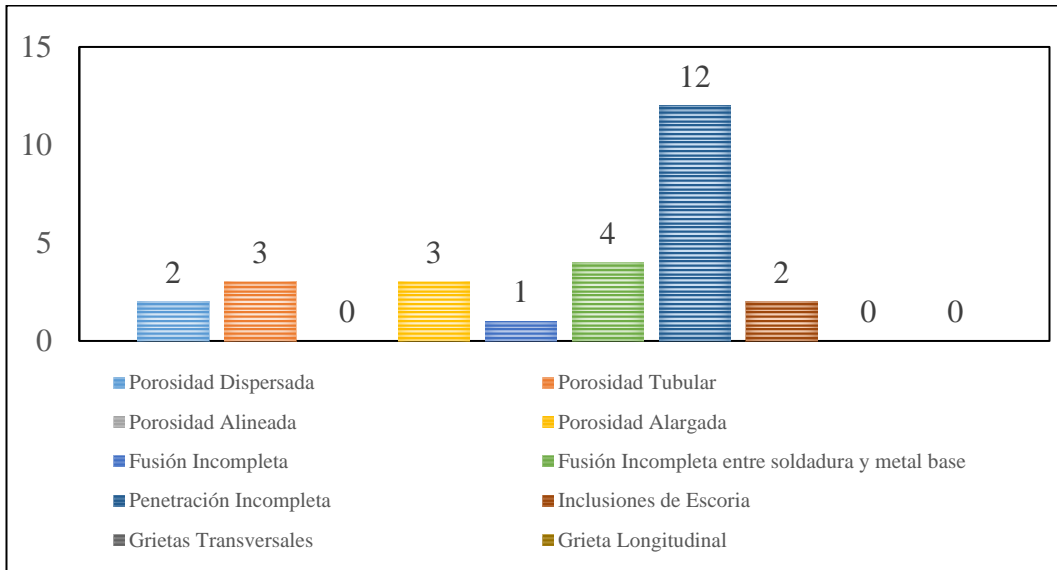


Gráfica 10. Defectos totales presentes en cada muestra.



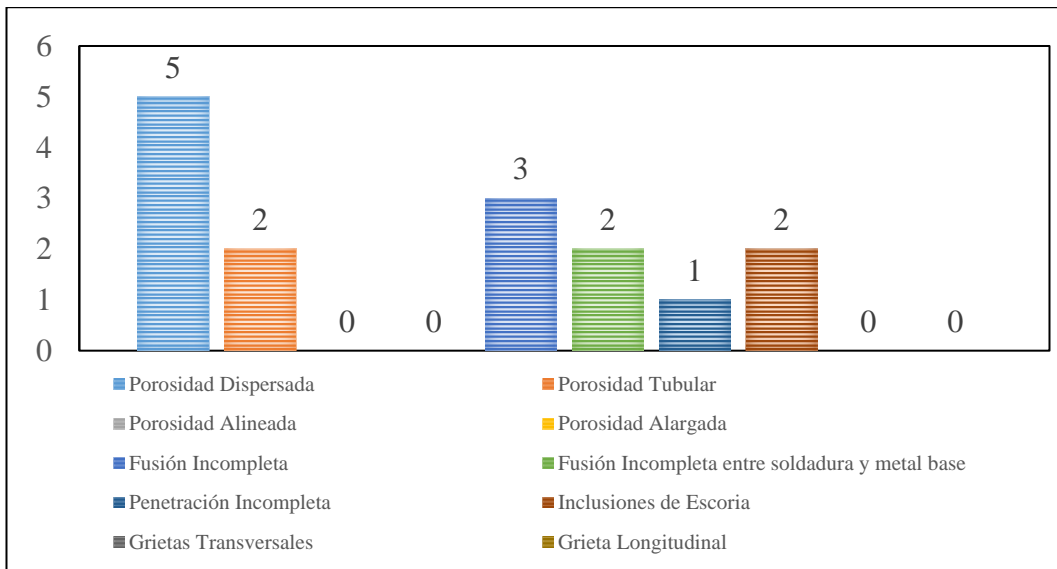
Gráfica 11. Defectos totales presentes por grupo de muestras.

Como resultado de la búsqueda de defectos generados en el proceso de soldadura se encontró que para el grupo de muestras 1 predominó la penetración incompleta como se ve en la gráfica 12.



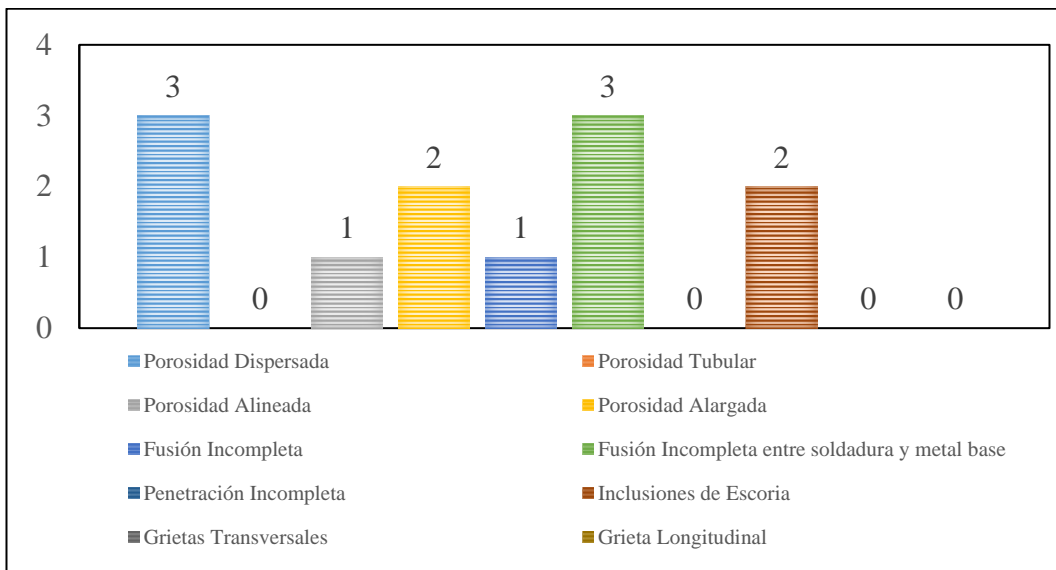
Gráfica 12. Defectos presentes en el grupo 1.

En la búsqueda de defectos presentes en las muestras pertenecientes al grupo 2, se obtuvo como defecto predominante las porosidades dispersas como es muestra en la gráfica 13.



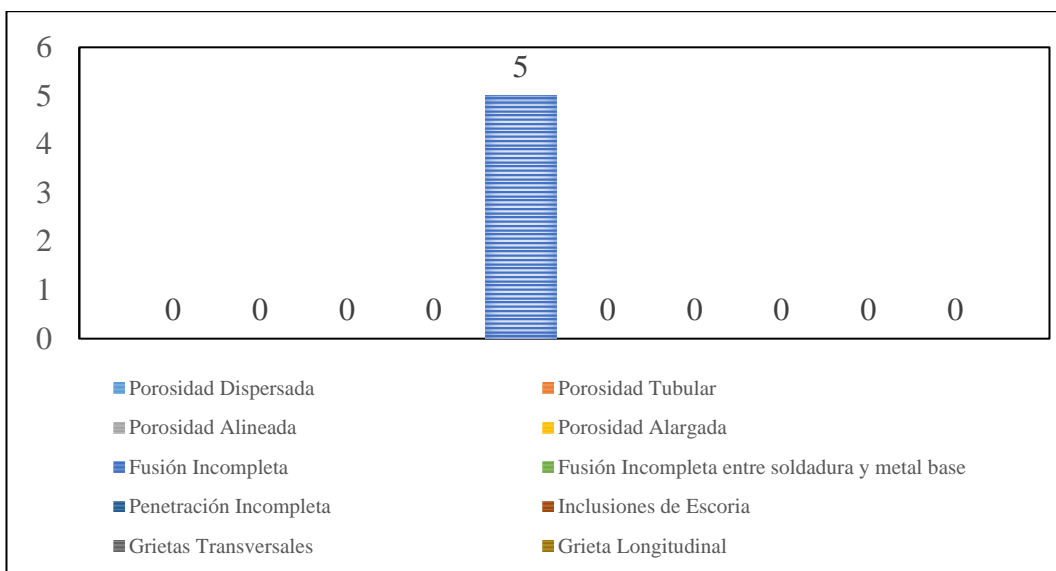
Gráfica 13. Defectos presentes en el grupo 2.

Tal y como se muestra en la gráfica 14 en el grupo de muestras 3 se encontró una igualdad de afectación entre porosidades dispersas y fusión incompleta entre soldadura y metal base



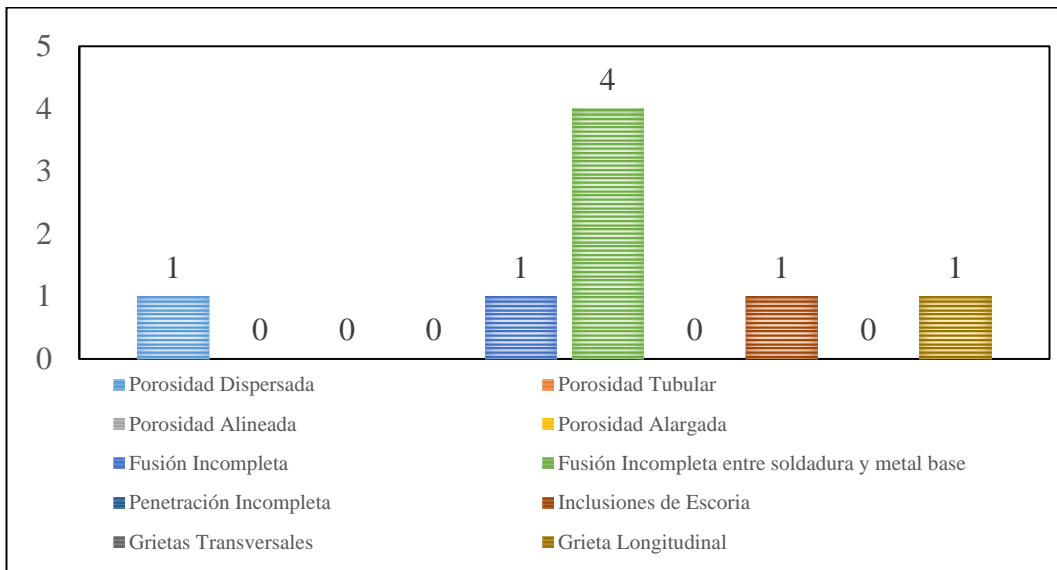
Gráfica 14. Defectos presentes en el grupo 3.

En el grupo de muestras 4 se observó que solo se presentó como defecto la fusión incompleta, como se muestra en la gráfica 15.



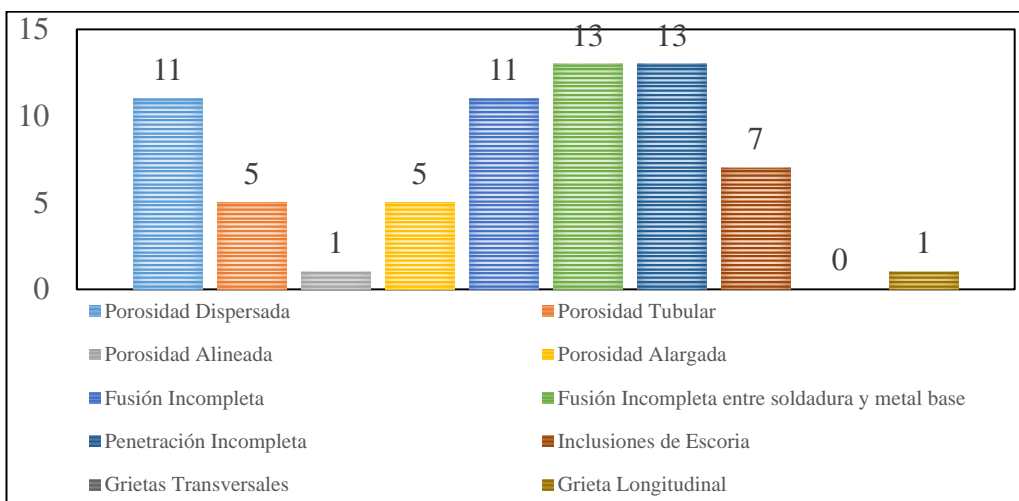
Gráfica 15. Defectos presentes en el grupo 4.

Por último, en el grupo 5 se presentó en su mayoría el defecto de fusión incompleta entre soldadura y metal base (ver gráfica 16).



Gráfica 16. Defectos presentes en el grupo 5.

Analizando los defectos en su totalidad el defecto predominante fue la fusión incompleta como se muestra en la gráfica 17, el cual se dividió cuando se realizó la inspección en fusión incompleta, este se presentó en el cuerpo o estructura del cordón, y la fusión incompleta entre el cordón de soldadura y el metal base.

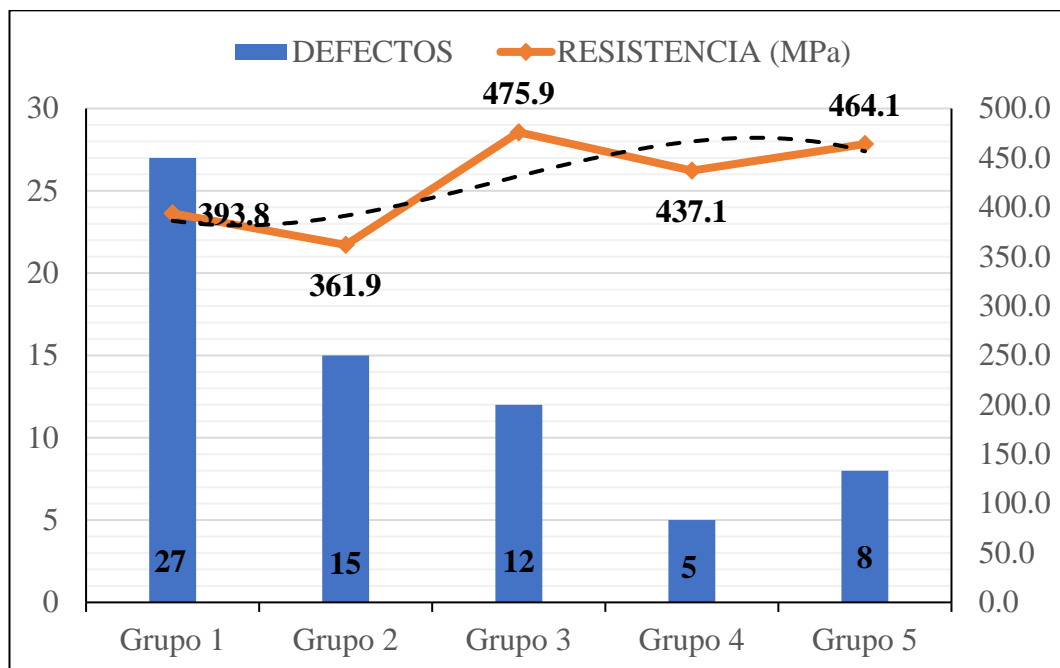


Gráfica 17. Defectos predominantes en total de las muestras.

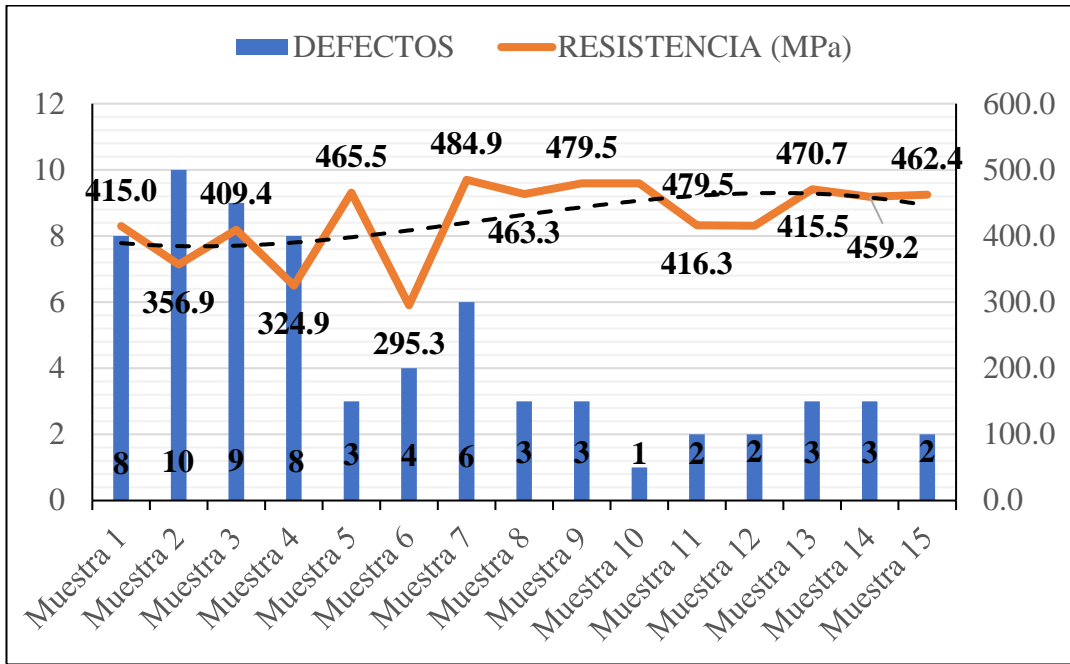
Los defectos encontrados en la macroscopía fueron analizados en base a la resistencia que se obtuvo del ensayo de tracción, este análisis mostro que el

comportamiento de la resistencia fue favorable en las muestras en las que se presentaron menos defectos como se muestra en la gráfica 18 y gráfica 19, con esto se podría decir que lo mencionado con anterioridad en el punto 4.2.1, que no es más que cuando se utilizó mayor voltaje e intensidad de corriente la resistencia del cordón aumento, está relacionado con los defectos ya que lo más probable es que la resistencia a la tracción aumento debido a menos presencia de defectos que afectaran a esta.

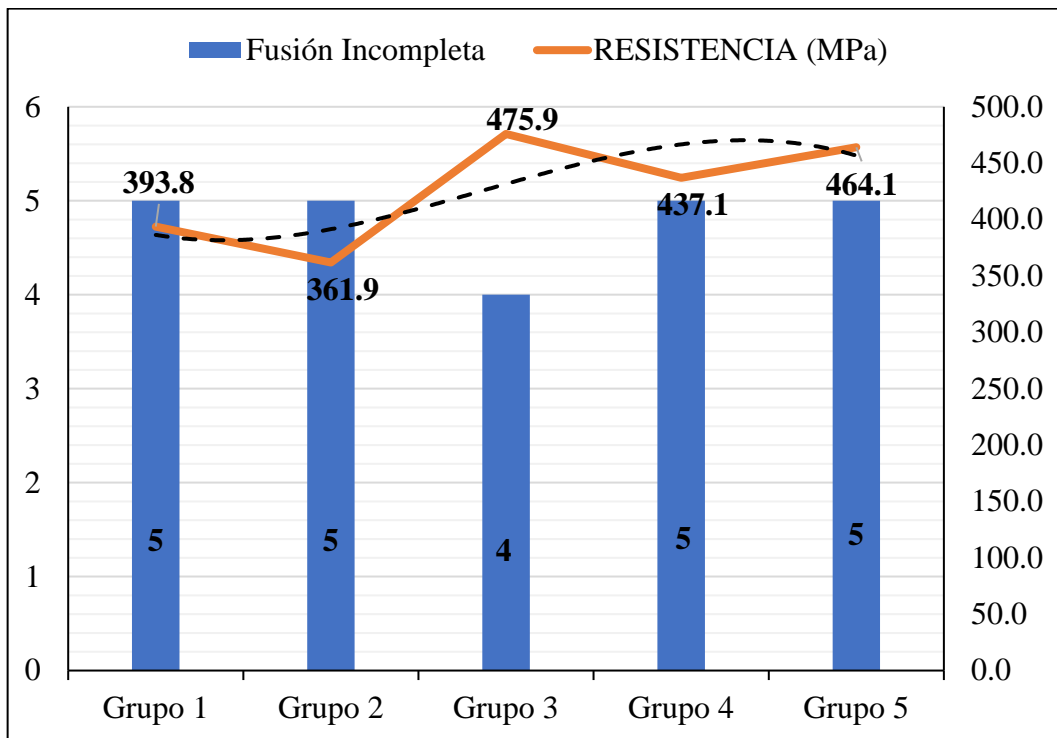
Como se mencionó anteriormente el defecto predominante en el estudio fue la fusión incompleta. Analizando la línea de tendencia de la resistencia a la tracción del cordón de soldadura en función de la función incompleta (ver gráfica 20), se pudo observar como la resistencia de cada grupo de muestras es afectada negativamente por la falta de fusión estudiada, disminuyendo así su resistencia.



Gráfica 18. Defectos vs resistencia a la tracción por grupo de muestras.

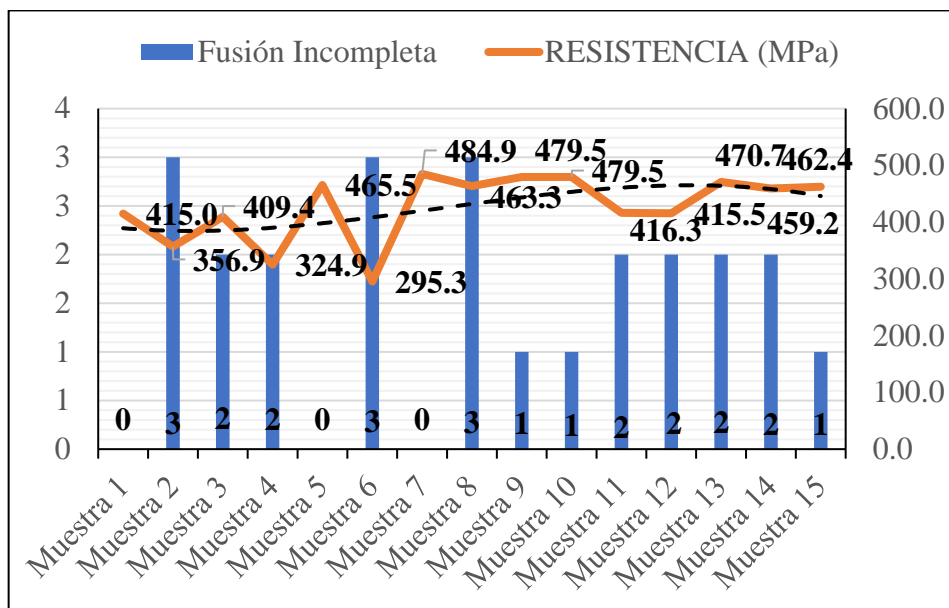


Gráfica 19. Defectos vs resistencia a la tracción por muestra.



Gráfica 20. Comportamiento de la resistencia por grupo de muestras en base a la fusión incompleta.

En el caso puntual de la muestra 6 la resistencia bajó considerablemente en comparación a la muestra 5 como a pesar de pertenecer al mismo grupo, lo que quiere decir que fue soldada bajo los mismos parámetros, se puede inferir a que esto fue debido a que la muestra 6 fue gravemente afectada por el defecto de falta de fusión como se muestra en la gráfica 21, en comparación de la muestra 5 que solo estuvo afectada por porosidades e inclusiones de escoria (ver tablas 21 y 22), se puede atribuir esta disminución de la resistencia ya que la falta de fusión es un defecto que es más influyente en el cordón de soldadura que las porosidades debido al nivel de daño que genera. La muestra 8 también presentó la misma cantidad de defectos que la muestra 6, sin embargo, la resistencia no fue tan baja como la de la última mencionada esto pudo deberse a que los parámetros utilizados fueron más favorables en la resistencia. A pesar de las diferencias entre algunos valores de resistencia el estudio se mantiene dentro de un rango aceptable por lo que se puede decir que las probetas que utilizaron mayores valores de corriente y voltaje presentaron menor cantidad de defectos de falta de fusión, generando esto que no se comprometiera la estructura de la soldadura y las muestras pudieran presentar mayores valores de resistencia a la tracción.



Gráfica 21. Comportamiento de la resistencia por muestra en base a la fusión incompleta.

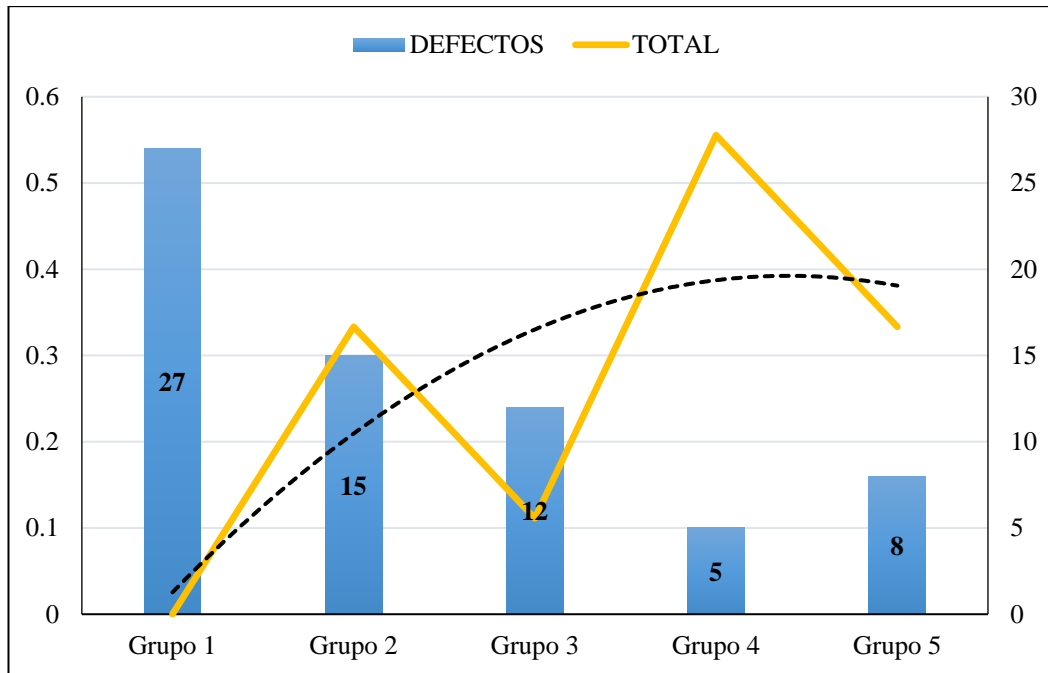
Del análisis total de las muestras se obtuvo se pudo encontrar porcentualmente cuales muestras mostraron resultados más favorables como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16. Análisis total de las muestras.

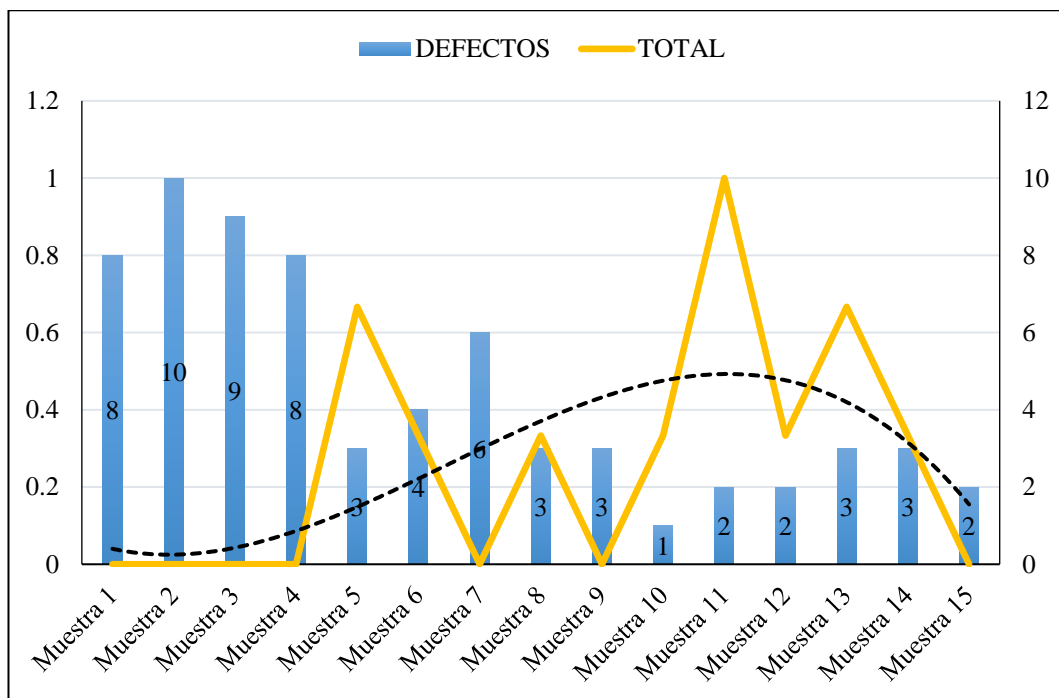
| | Doblado Cara | Doblado Raíz | Tracción | Total | Defectos |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|--------------|-----------------|
| Muestra 1 | 0 | 0 | 0 | 0% | 8 |
| Muestra 2 | 0 | 0 | 0 | 0% | 10 |
| Muestra 3 | 0 | 0 | 0 | 0% | 9 |
| Grupo 1 | 0% | 0% | 0% | 0% | 27 |
| Muestra 4 | 0 | 0 | 0 | 0% | 8 |
| Muestra 5 | 1 | 1 | 0 | 67% | 3 |
| Muestra 6 | 1 | 0 | 0 | 33% | 4 |
| Grupo 2 | 67% | 33% | 0% | 33% | 15 |
| Muestra 7 | 0 | 0 | 0 | 0% | 6 |
| Muestra 8 | 1 | 0 | 0 | 33% | 3 |
| Muestra 9 | 0 | 0 | 0 | 0% | 3 |
| Grupo 3 | 33% | 0% | 0% | 11% | 12 |
| Muestra 10 | 0 | 0 | 1 | 33% | 1 |
| Muestra 11 | 1 | 1 | 1 | 100% | 2 |
| Muestra 12 | 0 | 0 | 1 | 33% | 2 |
| Grupo 4 | 33% | 33% | 100% | 56% | 5 |
| Muestra 13 | 1 | 0 | 1 | 67% | 3 |
| Muestra 14 | 0 | 1 | 0 | 33% | 3 |
| Muestra 15 | 0 | 0 | 0 | 0% | 2 |
| Grupo 5 | 33% | 33% | 33% | 33% | 8 |

Como se muestra en las gráficas 22 y 23 para el análisis por grupo y la gráfica para el análisis por muestra, se puede decir que el grupo de muestras que presento resultados más favorables fue el grupo 4 con un 56%, ya que en este grupo se presentaron buenos resultados en cuanto a la ductilidad, todas la probetas de tracción fracturaron en el material base y no en el cordón de soldadura presentando así una buena soldabilidad, además de que se presentaron menor

cantidad de defectos, gracias a esto se pudo observar que los parámetros utilizados en el grupo 4 fueron los de mayor confiabilidad en el estudio.



Gráfica 22. Análisis total del grupo de muestras.



Gráfica 23. Análisis total de las muestras.

4.3.2 Resultados de microscopía.

Al finalizar la preparación de la muestra, ataque químico y análisis microscópico de las 5 muestras soldadas del acero estudiado se obtuvo entonces lo siguiente:

Muestra 1 (Grupo 1):

En la figura 39 con aumento de 400x se pueden apreciar los granos de ferrita y presencia de perlita en los límites de grano en el metal base de la muestra 1.

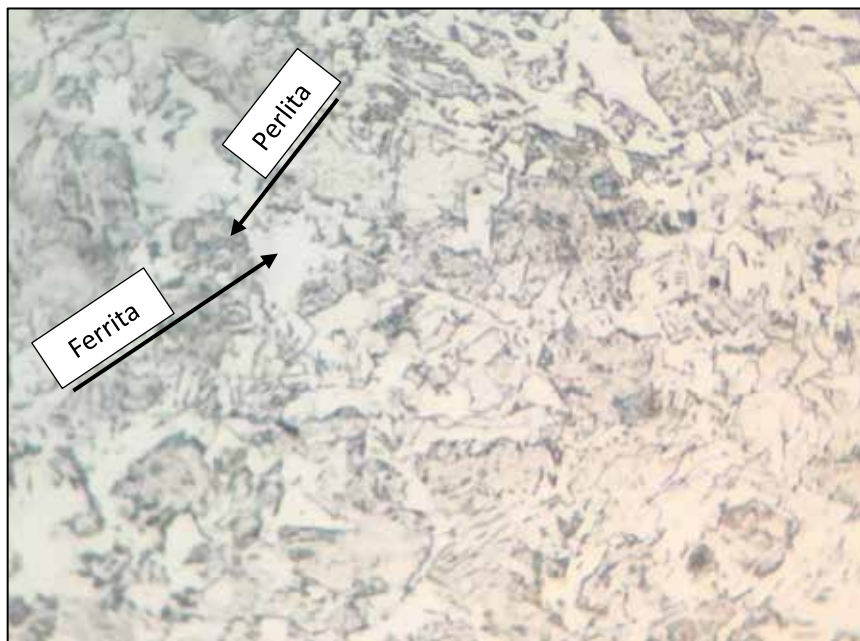


Figura 39. Metal base de la muestra 1 a 400x.

La figura 40 ilustra el límite entre la zona afectada por el calor y la zona del metal base, donde se pudo observar el cambio en el tamaño de los granos de la ferrita con un aumento de 100x. En la zona afectada por el calor (ZAC) se pudo ver granos más pequeños y en la zona del metal base los granos de mayor tamaño.

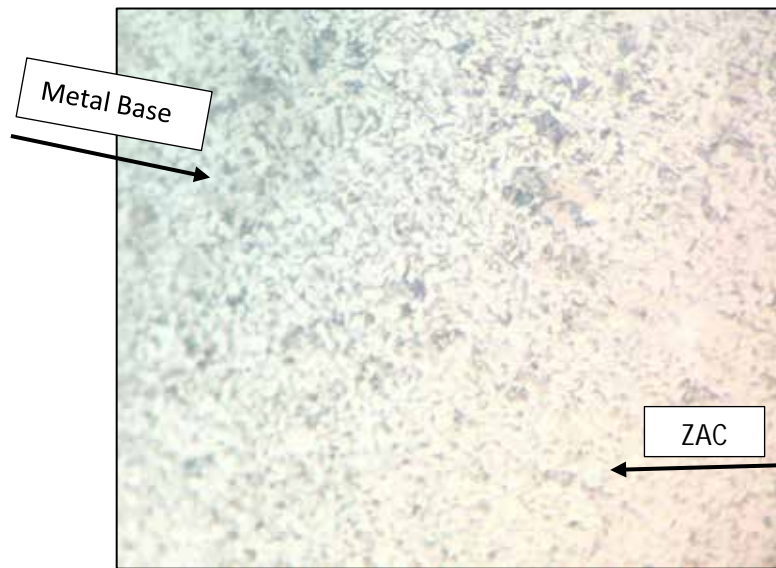


Figura 40. Límite entre la zona afectada por el calor y la zona del metal base de la muestra 1 a 100x.

De manera similar que en la figura 40, en la figura 41 se pudo observar el límite entre la zona afectada por el calor y la zona del metal base de la muestra 1, pero con un aumento de 400x.

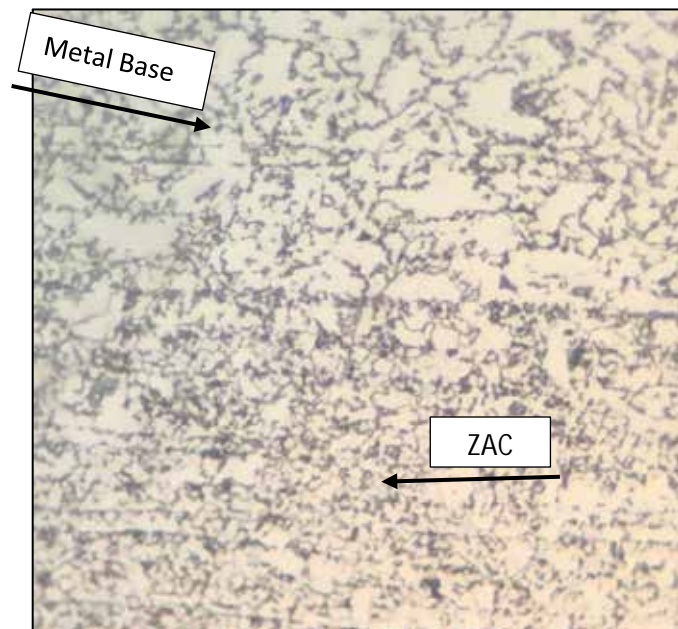


Figura 41. Límite entre la zona afectada por el calor y la zona del metal base de la muestra 1 a 400x.

Se pudo apreciar la solidificación en distintas zonas del cordón (ver figura 42). Se pudo apreciar dos zonas afectadas por el calor (ZAC) en donde los granos son de menor tamaño y una zona de metal base en donde se visualizan los granos más grandes. También se puede observar en la figura esquina inferior izquierda una fusión incompleta en la superficie de la ranura del cordón de soldadura.

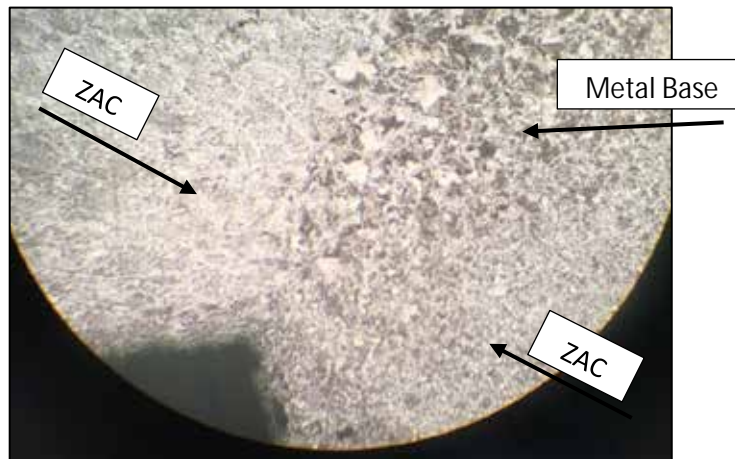


Figura 42. Solidificación en distintas zonas del cordón de la muestra 1 a 100x.

Muestra 5 (Grupo 2):

Del análisis a la muestra 5 se pudo observar en la figura el límite entre la zona del metal base (esquina superior derecha) y la zona afectada por el calor, así como también la diferencia entre el tamaño de los granos como se muestra en la figura 43.



Figura 43. Límite entre la zona afectada por el calor y la zona del metal base de la muestra 5 a 100x.

La figura 44 ilustra los granos de la zona afectada por el calor a 400x, comparándolo con la figura 45 se pudo apreciar la diferencia con los granos de mayor tamaño del metal base.

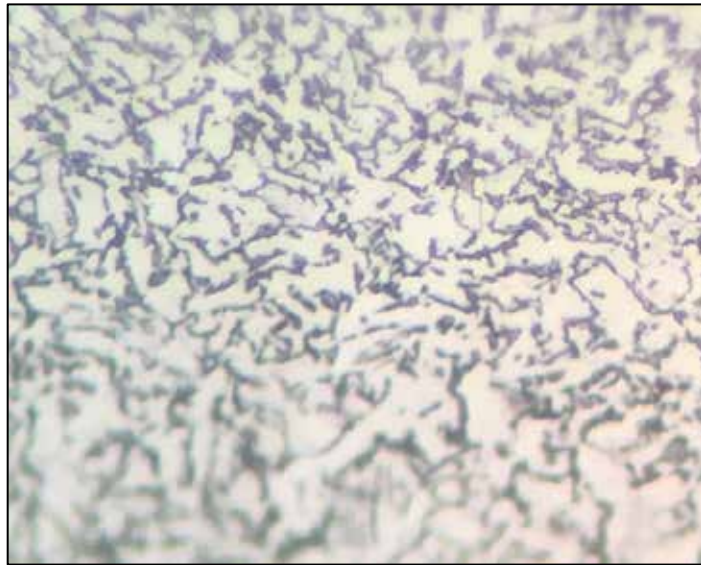


Figura 44. Zona afectada por el calor de la muestra 5 a 400x.

En la siguiente figura 45, se pudo identificar la zona del metal base a 400x de la muestra 5, siendo similar al a zona del metal base de la muestra 1.

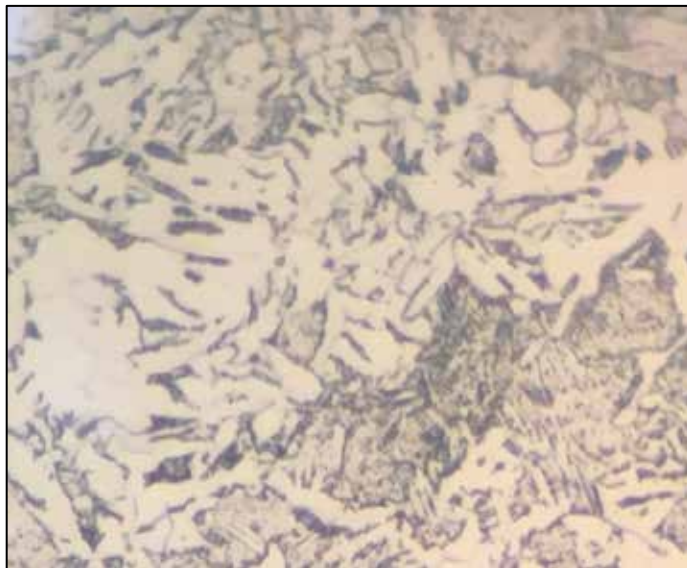


Figura 45. Zona del metal base de la muestra 5 a 400x.

Muestra 8 (Grupo 3):

Se pudo observar, de igual manera que la figura 44, la zona afectada por el calor de la muestra 8 a 400x, siendo ambas imágenes muy similares (ver figura 46).

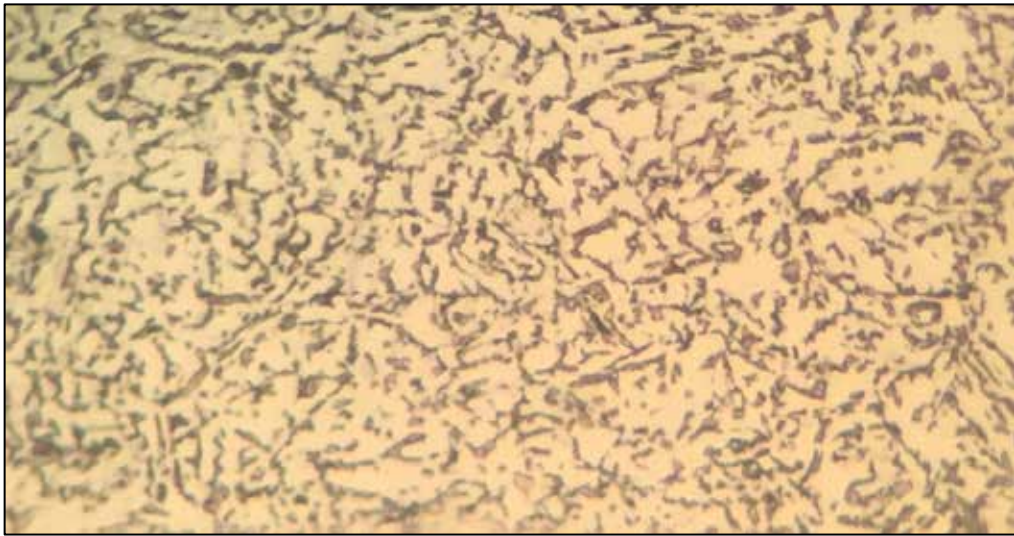


Figura 46. Zona afectada por el calor de la muestra 8 a 400x.

Similar a la figura 45, en la figura 47 se pudo observar la zona del metal base a 400x de la muestra 8.

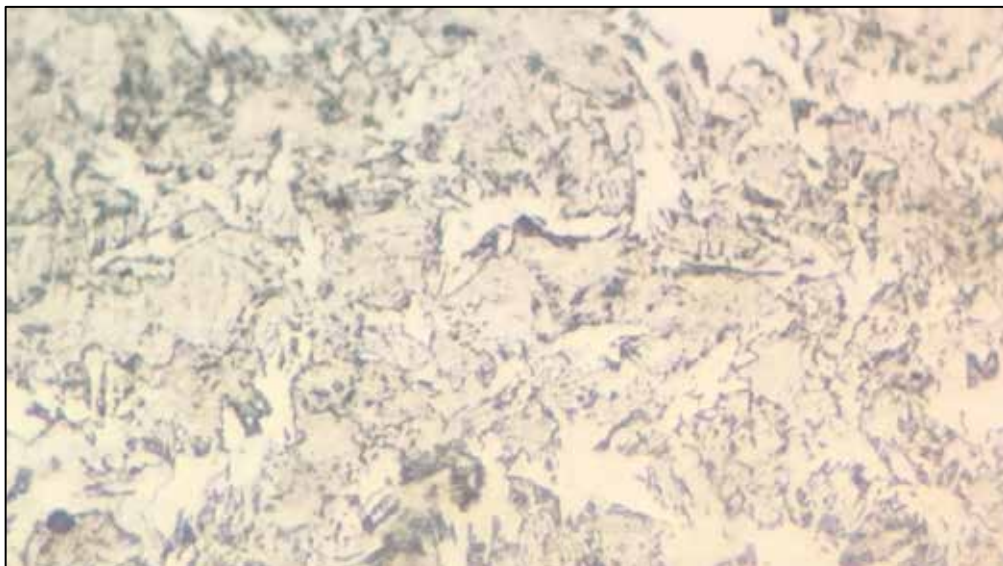


Figura 47. Zona del metal base de la muestra 8 a 400x.

Muestra 10 (Grupo 4):

Similar a la figura 42, en la figura 48 se pudo observar la solidificación y variación del tamaño de los granos alrededor de la fusión incompleta en la superficie de la ranura del cordón de soldadura, así como también el límite entre las zonas afectadas por el calor y las zonas de metal base. Cordón

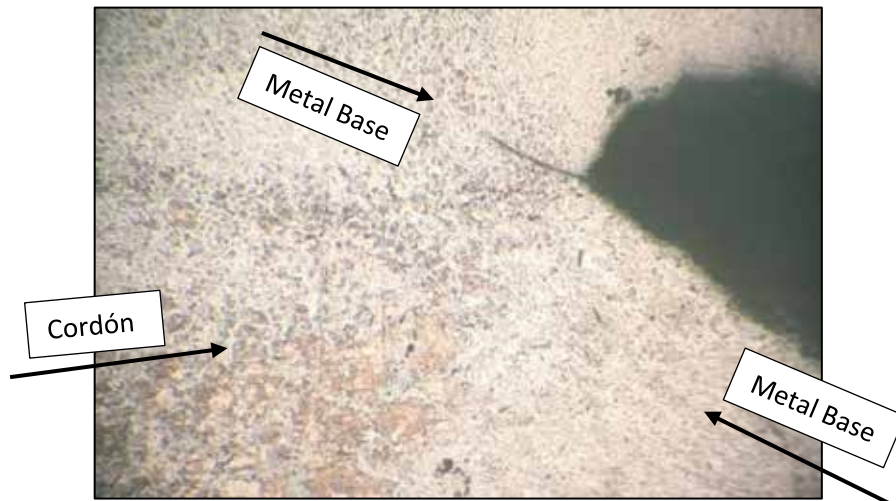


Figura 48. Solidificación en distintas zonas del cordón de la muestra 10 a 100x.

En la figura 49 se pudo ver la zona del metal base de la muestra 10 a 400x, siendo similar a las zonas de metal base de las otras muestras.

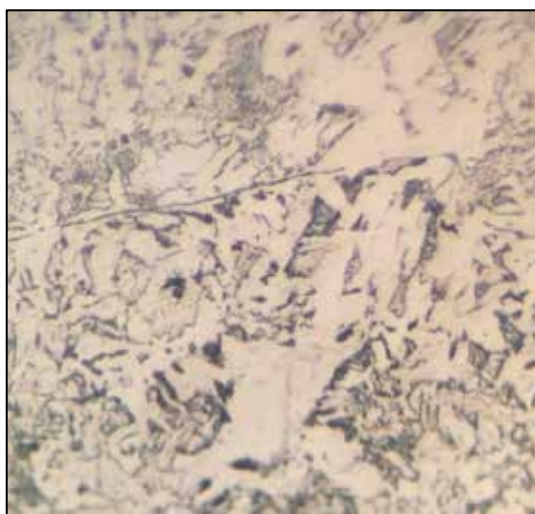


Figura 49. Zona del metal base de la muestra 10 a 400x.

La figura 50, ilustra la zona afectada por el calor en donde se puede apreciar la disminución del tamaño de granos con respecto a la zona del metal base, el cual es un comportamiento evidenciado en todas las muestras.

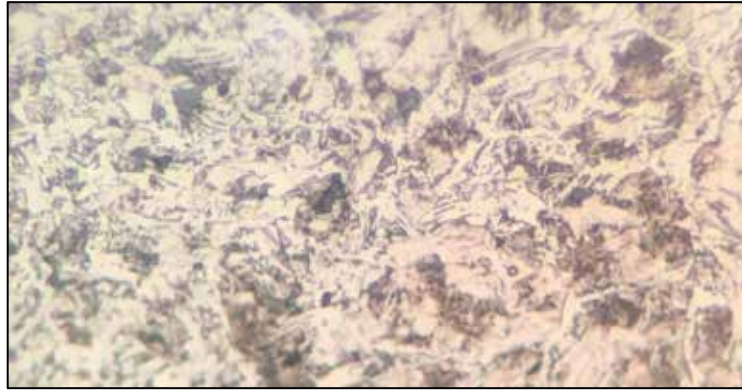


Figura 50. Zona afectada por el calor de la muestra 10 a 400x.

Muestra 15 (Grupo 5):

La zona del metal base de la muestra 15 a 400x de aumento visual se puede apreciar en la siguiente figura 51 mostrada a continuación:

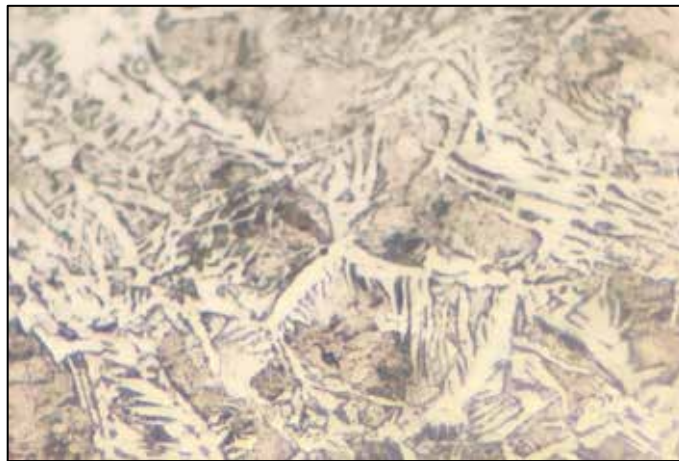


Figura 51. Zona del metal base de la muestra 15 a 400x.

De manera similar a las figuras 42 y 48, se pudo apreciar las distintas variaciones en la solidificación del material ocurridas después de la soldadura, por los lados superior, inferior, izquierdo y derecho de la fusión incompleta en la superficie de la ranura del cordón de soldadura (ver figura 52). El cordón fue

realizado por los lados superiores e inferiores en donde se puede observar que el tamaño de grano es menor en comparación con los lados laterales de la ranura.

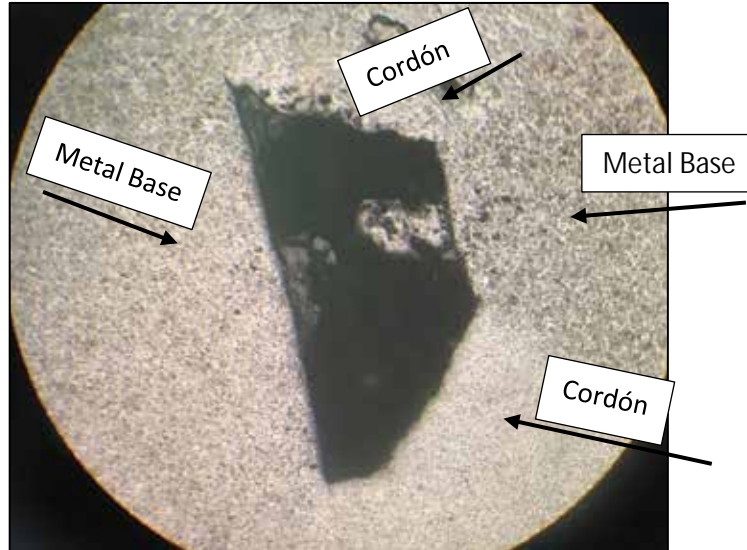


Figura 52. Solidificación en distintas zonas del cordón de la muestra 15 a 100x.

Muestra de Caracterización:

Se pudo apreciar una franja negra en el metal base de la muestra de caracterización, así como también sus granos de ferrita como se muestra en la figura 53. Esto se pudo haber sucedido a algún procedimiento cometido durante el laminado del metal.

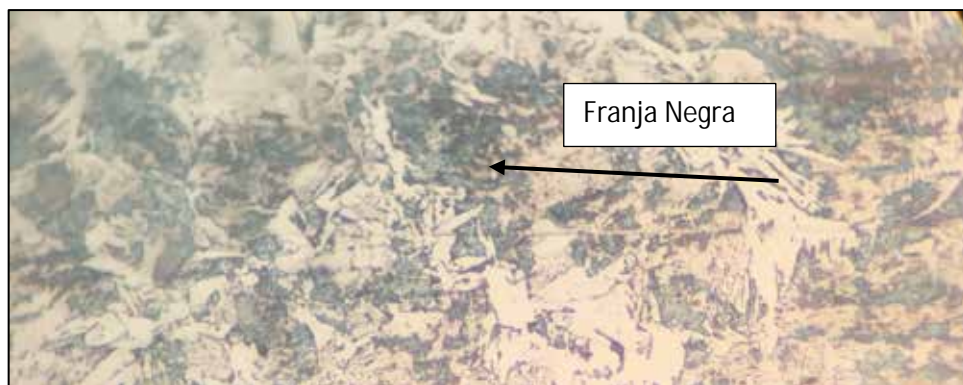


Figura 53. Franja negra en la muestra de caracterización a 400x.

En la figura 54 se pudo apreciar los granos de ferrita del metal base similares al metal base de las muestras soldadas, así como también la perlita en los límites de grano.

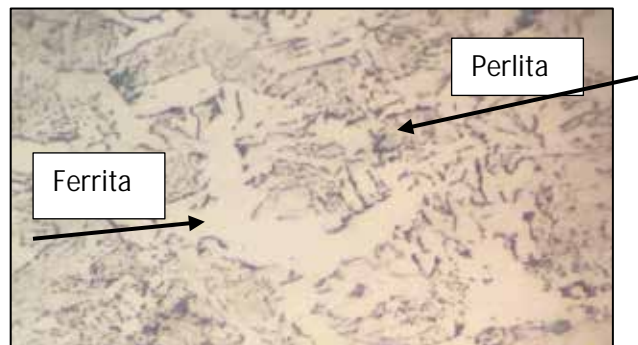
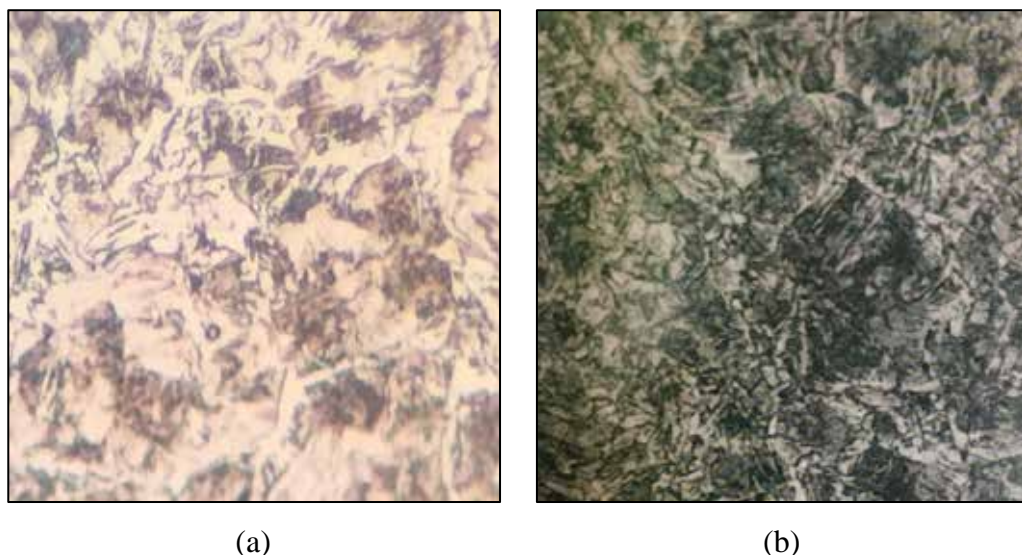


Figura 54. Muestra de caracterización a 400x.

La figura 55 representa una comparación entre el metal base de la muestra de caracterización y el metal base de un acero AISI 1010 de un estudio realizado por González, Luis (1997), sobre los efectos de los tratamientos térmicos de enfriamiento continuo sobre la estructura y las propiedades mecánicas en aceros al carbono hipoeutectoides. Se puede observar que hay una similitud entre el metal base de ambos aceros, en donde se puede inferir que el material estudiado es un acero AISI 1010 normalizado por la similitud apreciada en las figuras que existe en el acero AISI 1010 normalizado de González, Luis previamente mencionado.



(a). Microscopía de material en estudio a 100x. Bencomo, Molina. (2017).

(b) Microestructura de un acero AISI 1010 normalizado a 100x. González, Luis. (1997).

Figura 55. Comparación longitudinal de las microscopías de un acero AISI 1010 normalizado con el material estudiado.

4.4 Obtención del modelo del comportamiento de la resistencia a la tracción del cordón de soldadura.

Los resultados que arrojo software de cálculo matemático, son los que se muestran en las tablas 17 a 19. En los resúmenes de estas tablas, se repasa la interpretación y/o definición de cada uno de los componentes de éstas.

Tabla 17. Estadísticas de la regresión obtenidas mediante la herramienta de análisis de datos.

| Estadísticas de la regresión | |
|--|--------------|
| Coefficiente de correlación múltiple | 0,53260322 |
| Coefficiente de determinación R ² | 0,28366619 |
| R ² ajustado | 0,1516405198 |
| Error típico | 52,096134666 |
| Observaciones | 15 |

Coefficiente de correlación múltiple: significa que un 53.2763% de los datos están relacionados.

Coefficiente de determinación R²: el significado de este coeficiente es qué tanto interpretan a la variable dependiente Y. Por los resultados se pudo afirmar, en este caso, que el 28.3667% de las variables independientes explican a la variable dependiente.

R² ajustado: es el coeficiente de determinación ajustado dado por la ecuación:

$$R_{ajustado}^2 = 1 - \frac{SSE / (n - k - 1)}{SST}$$

Donde SSE es la suma de los cuadrados de los residuos y SST es la suma de los cuadrados totales.

Error típico:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{SSR}{n-k-1}} = 52,0961$$

Observaciones: n, es el número de datos considerados para la realización del modelo de regresión.

Tabla 18. Promedio de los cuadrados.

| | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Promedio de los cuadrados | F | Valor crítico de F |
|-----------|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------|---------------------------|
| Regresión | 2 | 13971,611342 | 6985,805671 | 5,147963904 | 0,024307158 |
| Residuos | 13 | 35282,09421 | 2714,007247 | | |
| Total | 15 | 49253,705555 | | | |

Los grados de libertad de la regresión: son 2 debido a que estamos trabajando con dos variables independientes y son iguales al valor “k” del denominador que aparece en la fórmula del error típico ($n - k$).

Los grados de libertad de los residuos: son 13 y resultan de la diferencia: $n - k$; en donde $n = 15$ datos, $k = 2$ variables independientes; por lo tanto, $n - k = 15 - 2 = 13$.

Los grados de libertad totales: son 15 y resultan de la suma de los grados de libertad anteriores; esto es: grados de libertad totales = grados de libertad de la regresión + grados de libertad de los residuos; por lo tanto, $k + (n - k) = n = 15$.

Suma de cuadrados:

1. Suma de cuadrados de la regresión: $SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 = 13971,6113$
2. Suma de cuadrados de los residuos: $SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2 = 35282,0942$
3. Suma de cuadrados total: $SST = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = 49253,7056$

El promedio de los cuadrados de la regresión: resulta de dividir la suma de cuadrados de la regresión entre sus grados de libertad.

$$\text{Promedio de los cuadrados de la regresión: } \frac{SSR}{k} = \frac{13971,6113}{2} = 6985,8057$$

El promedio de los cuadrados de los residuos: resulta de dividir la suma de cuadrados de los residuos entre sus grados de libertad.

$$\text{Promedio de los cuadrados de los residuos: } \frac{SSE}{n-k} = \frac{35282,0942}{13} = 2714,0072$$

F y el valor crítico: Los valores de F y el valor crítico son útiles para probar la hipótesis siguiente:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$$

$$H_1: \text{al menos una } \beta_i \neq 0$$

Para tomar la decisión si no rechazamos o rechazamos la hipótesis nula H_0 alor que aparece en la tabla 18, el cual es: $F = 5,1480$, que resulta de dividir el promedio de los cuadrados de la regresión entre el promedio de los residuos contra el valor de las tablas de distribución de Fisher (con un 95% de confiabilidad), el cual resulta ser de la siguiente manera:

$$F = 2 \frac{\text{Promedio de los cuadrados de la regresión}}{\text{Promedio de los cuadrados de los residuos}} = 2 \left(\frac{\frac{13971,6113}{2}}{\frac{35282,0942}{13}} \right)$$

$$F = 5,1480$$

$$F_t = F \text{ de tablas} = F_{\alpha, v_1, v_2} = F_{0,05, 2, 13} = 3,806$$

En donde v_1 , v_2 , son los grados de libertad del numerador y del denominador respectivamente, y rechazamos la hipótesis nula H_0 si $F > F_t$, dado que $F = 5,1480$ es mayor que $F_t = 3,806$ concluimos que se rechaza la hipótesis nula H_0 . A continuación, consideramos el valor crítico de F es:

$$0,024307157$$

confiabilidad); dado que la regla de decisión es rechazar la hipótesis nula H_0

0.

Para verificar si los resultados son confiables (estadísticamente significativos), se observó el valor crítico F (5,1480). Como este valor es menor a 0,05 (95% de confiabilidad), la regresión es estadísticamente significativa. Si la significancia F fuese mayor que 0,05, probablemente sea mejor dejar de usar este conjunto de variables independientes o descartar una de las variables independientes. Elimine una variable con un valor P alto (mayor que 0.05) y vuelva a ejecutar la regresión hasta que la significación F caiga por debajo de 0.05.

A continuación, se presentan los valores de los coeficientes arrojados por Excel para cada variable independiente.

Tabla 19. Variables independientes.

| | Coefficientes |
|----------------------|----------------------|
| Intercepción | 267,77876984 |
| Voltaje (V) | 0 |
| Corriente (A) | 1,541468253 |

Coefficientes: Los valores correspondientes a la columna de los Coeficientes se refieren a los valores que toman los parámetros $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$. El primero de ellos, que se encuentra en la columna intercepción, es $\hat{\beta}_0$; donde aparece la variable Voltaje (V) es $\hat{\beta}_1$; la variable Corriente (A) es $\hat{\beta}_2$.

Error típico: Los errores típicos que aparecen en la salida de la tabla 19, corresponden a cada uno de los β_i y se calculan considerando el error típico que aparece en la tabla 17 multiplicado por el i-ésimo elemento de la matriz $\sqrt{C_{ii}}$.

$$\hat{\sigma}_{\beta_i} = \hat{\sigma} \sqrt{C_{ii}} = \sqrt{\frac{SSR}{n - k - 1}} \sqrt{C_{ii}}$$

Tabla 20. Errores típicos.

| | Error típico |
|----------------------|---------------------|
| Intercepción | 71,25788382 |
| Voltaje (V) | 0 |
| Corriente (A) | 0,679386383 |

Con esta información se pudo formar la ecuación de regresión lineal múltiple, la cual se describe de la manera siguiente:

$$Y = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2$$

Que al sustituir los valores resulta en:

$$Y = R(v, c) = 267,7788 + 0 \text{ (Voltaje)} + 1,5415 \text{ (Corriente)}$$

Sustituyendo los valores de los parámetros de la corriente que fueron utilizados durante el proceso de soldado de cada probeta y muestras, con la finalidad de comparar la resistencia predicha con la resistencia obtenida después de haber realizado los ensayos de tracción, y calcular la diferencia o residuo de cada probeta y muestra se obtuvo la tabla 21 y la tabla 22.

Tabla 21. Valores de resistencia a la tracción predicha, resistencia a la tracción real, y residuales de cada probeta.

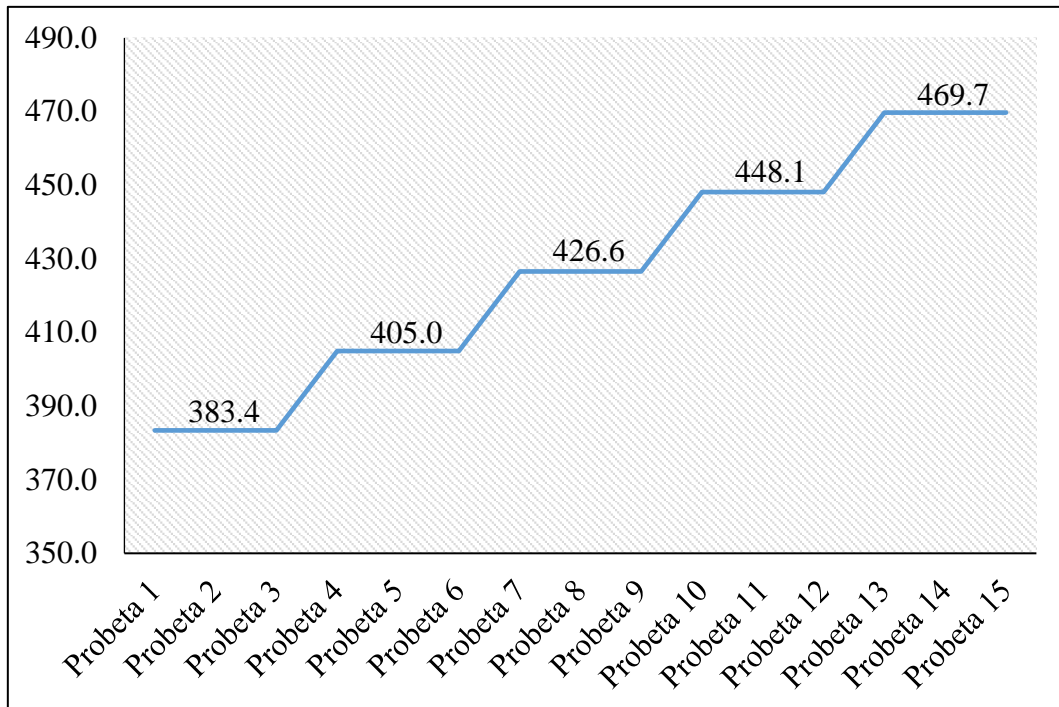
| | | | |
|----|-------------|-------|---------|
| 1 | 383,3888889 | 415,0 | 31,6111 |
| 2 | 383,3888889 | 356,9 | -26,472 |
| 3 | 383,3888889 | 409,4 | 26,0277 |
| 5 | 404,9694444 | 465,5 | 60,5305 |
| 6 | 404,9694444 | 295,3 | -109,71 |
| 7 | 426,55 | 484,9 | 58,3666 |
| 8 | 426,55 | 463,3 | 36,7833 |
| 9 | 426,55 | 479,5 | 52,95 |
| 10 | 448,1305556 | 479,5 | 31,3694 |
| 11 | 448,1305556 | 416,3 | -31,880 |
| 12 | 448,1305556 | 415,5 | -32,630 |
| 13 | 469,7111111 | 470,7 | 0,95555 |
| 14 | 469,7111111 | 459,2 | -10,544 |
| 15 | 469,7111111 | 462,4 | -7,2944 |

Calculó de la diferencia o residuo de cada muestra y grupo apreciado en la tabla 22.

Tabla 22. Valores de resistencia a la tracción predicha, resistencia a la tracción real, y residuales de cada muestra.

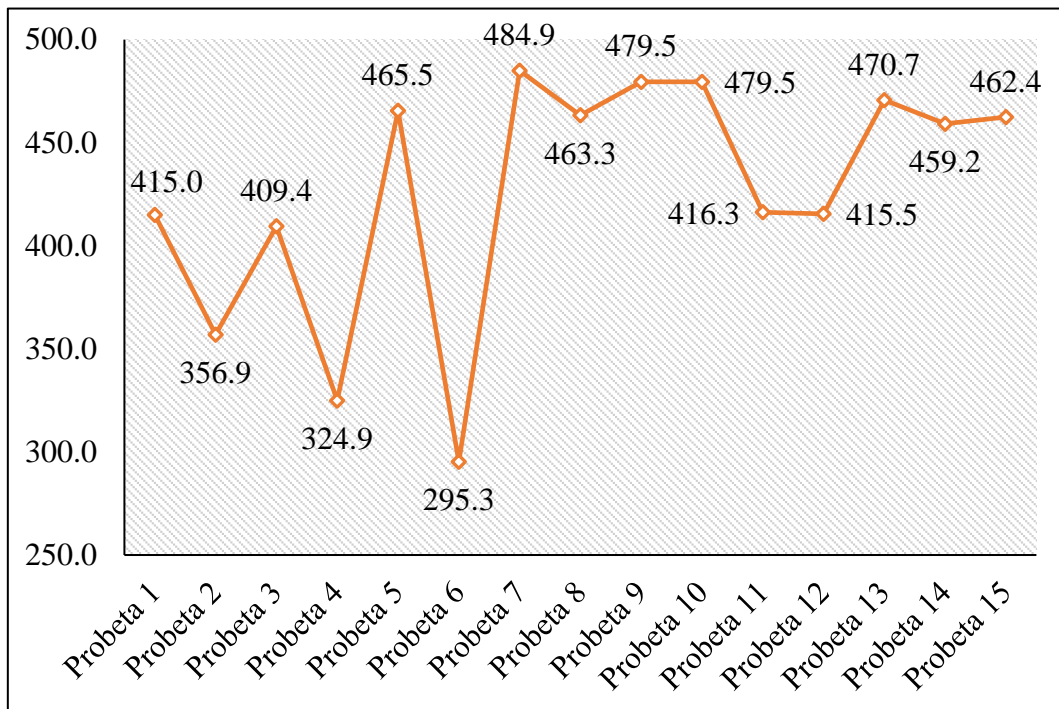
| | | | |
|---|-------|-------|-------|
| 1 | 393,8 | 383,4 | 10,4 |
| 2 | 361,9 | 405,0 | -43,1 |
| 3 | 475,9 | 426,6 | 49,3 |
| 4 | 437,1 | 448,1 | -11,0 |
| 5 | 464,1 | 469,7 | -5,6 |

A partir de los valores tabulados anteriormente, se obtuvo la gráfica 24 que ilustra la resistencia a la tracción predicha de cada probeta.



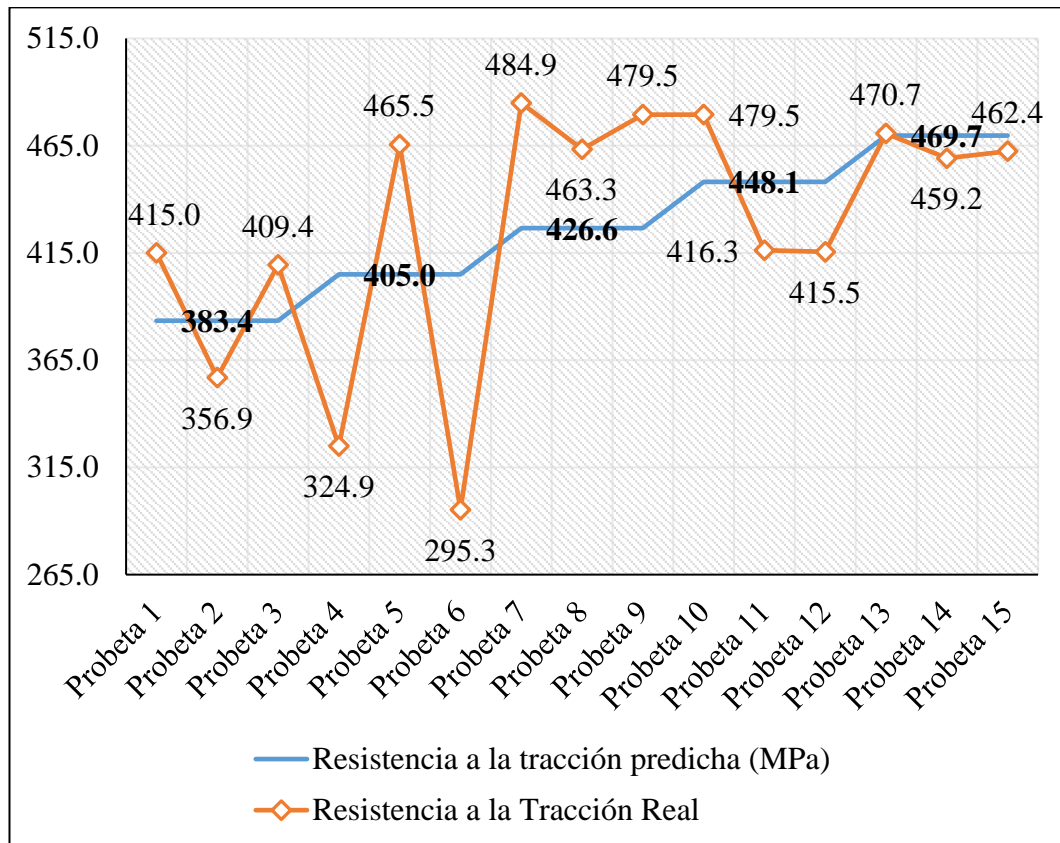
Gráfica 24. Resistencia a la tracción predicha de cada probeta.

De manera similar que la gráfica anterior, la gráfica 25 ilustra la resistencia a la tracción real de cada probeta.



Gráfica 25. Resistencia a la tracción real de cada probeta.

Finalmente, la gráfica 26 representa la comparación de la resistencia predicha con la resistencia obtenida después de haber realizado los ensayos de tracción, y la diferencia de estas resistencias se mostraron en la tabla 21. anteriormente.



Gráfica 26. Resistencia a la tracción predicha vs. la resistencia a la tracción real de cada probeta.

CONCLUSIONES

- Mediante la caracterización se logró establecer que el metal base utilizado en el estudio es un acero AISI 1010 con un tratamiento térmico de normalizado.
- Se puede decir que los parámetros de 22V y 117A son los más favorables en el proceso de soldadura SMAW con electrodo E6013 para un acero AISI 1010 normalizado, debido a que las muestras soldadas con estos parámetros generaron la mayor resistencia a la tracción, un comportamiento aceptable en cuanto a ductilidad y presentaron la menor cantidad de defectos en el proceso.
- Se constató que soldar el metal base de 6mm en junta a tope en un rango de voltaje de 18V a 22V y un rango de intensidad de corriente de 75A a 131A no genero la penetración necesaria para un buen comportamiento de resistencia y ductilidad, a pesar de haber realizado un cordón de soldadura superior y uno inferior.
- La mayor cantidad de defectos generados en el proceso de soldadura se presentaron en las muestras soldadas con parámetros de menor aportación de energía (18V y 75A), por lo que se puede inferir en que, de los parámetros recomendados estos son los menos favorables para este tipo de proceso de soldadura.
- El aumento de la resistencia y la presencia de defectos está directamente relacionado con los parámetros de soldadura, ya que, a mayor cantidad de energía aportada se presentaron mayores valores de resistencia y género menor cantidad de defectos.
- Del análisis de defectos generados, la fusión incompleta predominó en cuanto a presencia de defectos en las muestras soldadas, defecto que se podría decir, fue el más influyente en la resistencia de los cordones de soldadura debido al nivel de afección que este puede generar.

- El voltaje no es influyente en la resistencia del cordón de soldadura para esta investigación, como si lo es de vital importancia la intensidad de corriente. Es por esto que en el modelo matemático para la predicción de la resistencia del cordón el valor del voltaje siempre es cero.
- Se obtuvo el comportamiento de la resistencia a la tracción del cordón de soldadura SMAW afectado por falta de fusión para un acero AISI 1010 normalizado, en base al voltaje y la intensidad de corriente.

RECOMENDACIONES

- Antes del proceso de soldadura en junta a tope realizar un bisel en V a la muestra, para obtener una mayor penetración.
- Realizar doble pasada en el proceso de soldadura, la primera de raíz para una buena penetración y otra de relleno.
- Complementar con ensayos no destructivos más profundos que la inspección visual, como líquidos penetrantes, partículas magnéticas etc., con la finalidad de obtener mayor verificación de la homogeneidad y la continuidad del material analizado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arias, F. G. (1999). **El Proyecto de Investigación. Guía para su Elaboración.** Editorial Episteme. Arial Ediciones. Caracas Venezuela.

Arias, F. G. (2012). **El Proyecto de Investigación (Introducción a la Metodología Científica).** Editorial Episteme. Caracas, Venezuela.

Ashby, Michael F. & Jones, David Rayner Hunkin (1992). **Selección de Materiales.** Editorial Butterworth-Heinemann. Departamento de Ingeniería, Cambridge, Inglaterra.

ASTM E-8/ASTM E-8M, **Métodos Estandarizados Para Ensayos de Tensión de Materiales Metálicos.**

ASTM E-92, **Método Estándar para la Dureza Vickers de Materiales Metálicos.**

ASTM E-384, **Método de Prueba Para Medir la Dureza Knoop y Vickers de Materiales.**

ASTM E-3 (2004), **Preparación de muestras metalográficas.**

AWS B4 (2007). **Métodos Estandarizados para Pruebas Mecánicas de Soldaduras.**

AWS B1.11. (2000). **Guía para la Inspección Visual de Soldaduras.**

AWS D1.1/D1.1M (2010). **Código de Soldadura de Acero Estructural**

Bavaresco, Aura (2006). **Proceso Metodológico en la Investigación (Cómo hacer un Diseño de Investigación)**. Editorial de la Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. Bernau, R.L (1958). **Elementos de Metalografía y de Acero al Carbono**. Editorial Andrés Bello. Santiago de Chile, Chile.

Bringas, John E. (2004).

, 3ra. Edición. Editorial ASTM International.

Cohen, J. & Cohen P. & West, S.G., & Aiken, L.S. (2003). **Análisis de regresión/correlación múltiple aplicado para las ciencias del comportamiento**. 2a Edición. Editorial Lawrence Erlbaum. Hillsdale, NJ.

David A. Freedman (2009). **Modelos Estadísticos: Teoría y Práctica**. Universidad de Cambridge, Inglaterra.

Davis, Joseph R. (2004). 2da Edición. Editorial ASM International. Estados Unidos.

Elert, Glenn (2009). **Densidad del Acero**. Nueva York, Estados Unidos.

Espinosa L. (2011) **Predicción de la geometría del cordón y curva de tracción en soldadura robótica de aceros dúplex por redes neuronales**, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Caracas, Venezuela.

F. R. Morral, E. & Jimeno, P. Molera (1982). **Metalurgia general**. Editorial Reverté, S.A. Barcelona, España.

Fuentes, F (1982). **Ensayos Mecánicos en Metales**. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, México.

Gilat, Amos (2004). Editorial
Wiley. Michigan, Estados Unidos.

González, Luis. (1997). **Efecto de los Tratamientos Térmicos de Enfriamiento continuo sobre la Estructura y las Propiedades Mecánicas en Aceros al Carbono Hipoeutectoides.**

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2003). **Metodología de la Investigación.** McGraw – Hill. México.

J.R. Davis (1996). . Editorial
ASM International. Estados Unidos.

Jeffus, Larry (2011). **Principios de Soldadura y Aplicaciones**, 7ma Edición.
Editorial Delmar Cengage Learning. Albany, New York.

Kalpakjain, S. & Schmid, S.R (2008): **Manufactura, Ingeniería y Tecnología**, 5ta edición. México. D.F.

La Fundación de Soldadura de Arco James F. Lincoln (2015).

14ta Edición. Editorial Lincoln Electric Co.

Lawrence H. Van Vlack. (1980). **Elementos de Ciencia e Ingeniería de Materiales**, 4ta Edición, Addison Wesley.

Matthews, Clifford (2001). Editorial ASME
International. Estados Unidos.

Miguel V. & Martínez-Conesa E.J. & Segura F. Manjabacas M.C. & Abellán E. (2012) **Optimización del proceso de soldadura GMAW de uniones a tope de la aleación AA 6063-T5 basada en la metodología de superficie de respuesta y en la geometría del cordón de soldadura**, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España.

Ochshorn, Jonathan (2002). . Editorial Taylor y Francis. Nueva York, Estados Unidos.

Payares M. & De Barros C. (1997) **Modelo para la determinación del área del cordón en soldadura a tope de aluminio 6063 - T5** Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Caracas, Venezuela.

Philip D. Harvey (1982). **Propiedades de Ingeniería del Acero**. Editorial ASM International. Michigan, Estados Unidos.

Sabino, C (1992). **El Proceso de Investigación**. Editorial Panapo. Caracas, Venezuela.

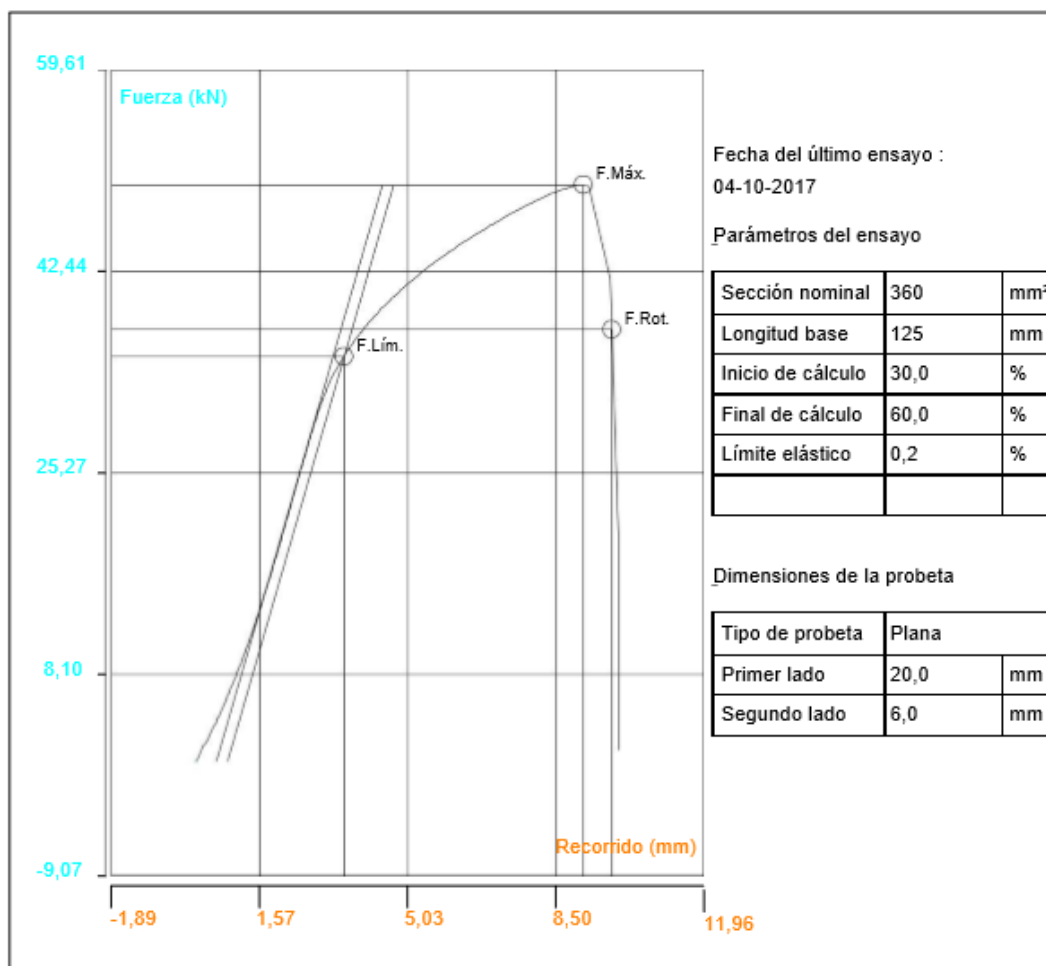
Smith, William F. & Hashemi, Javad (2006). , 4ta Edición. Editorial McGraw-Hill. Nueva York, Estados Unidos.

Vidal J. & Dorta M. & Mateo A. & Fargas G. & Camejo F. (2011) **Modelos empíricos para la predicción de la geometría del cordón en soldaduras a tope de un acero inoxidable dúplex 2205**”, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

William F. Smith & Javad Hashemi, PhD. (2006). **Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales**, 4ta Edición. Editorial McGraw-Hill. DF, México.

ANEXOS

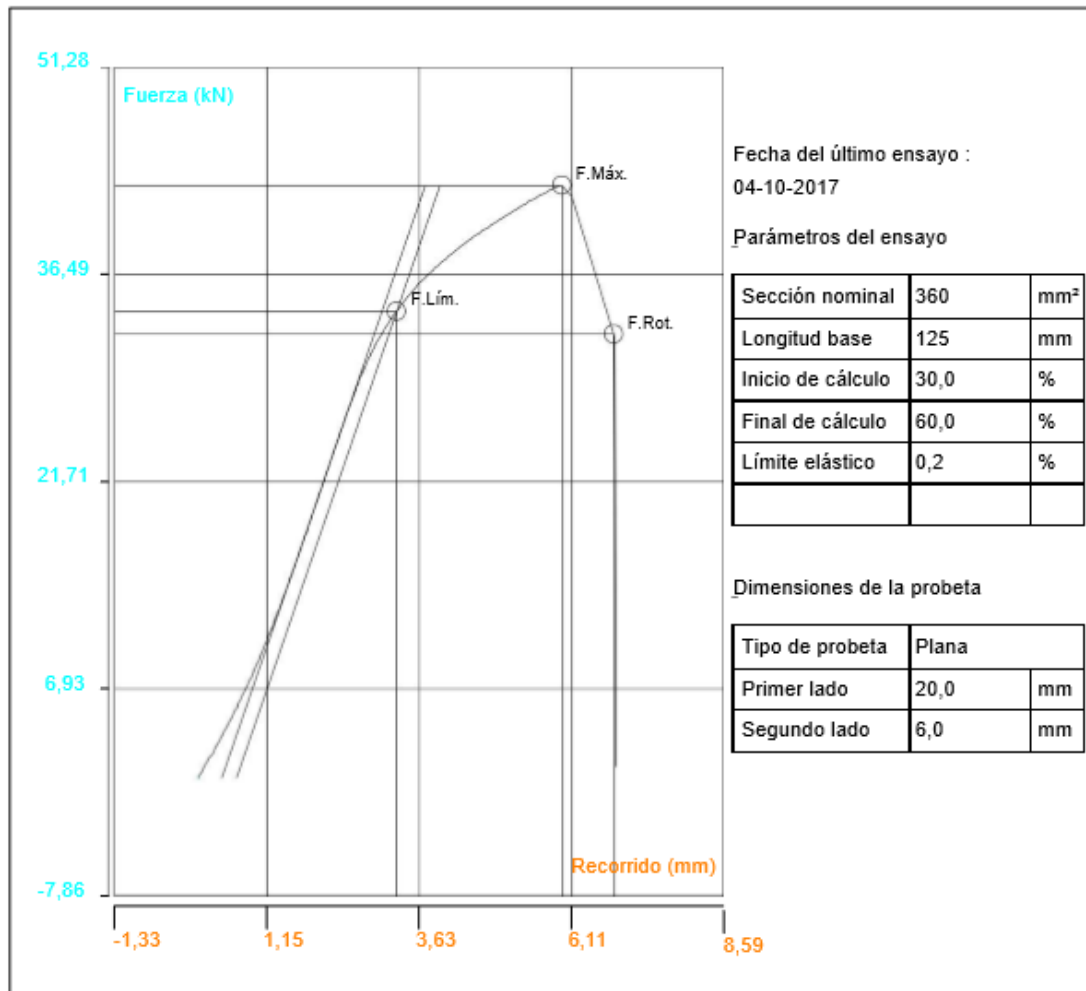
ANEXO A



| | | Probeta 1_004Media | |
|---------------------------|-----|--------------------|--------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 49800 | 49800 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 415,0 | 415,0 |
| Alarg. carga máxima (Ag) | %Lo | 7,34 | 7,34 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 37496 | 37496 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 312,5 | 312,5 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 7,86 | 7,86 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0,00 | 0,00 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 35195 | 35195 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 293,3 | 293,3 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 2,85 | 2,85 |
| Módulo elástico (E) | MPa | 4381,5 | 4381,5 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | | 1,41 | 1,41 |

Anexo A. 1 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 1

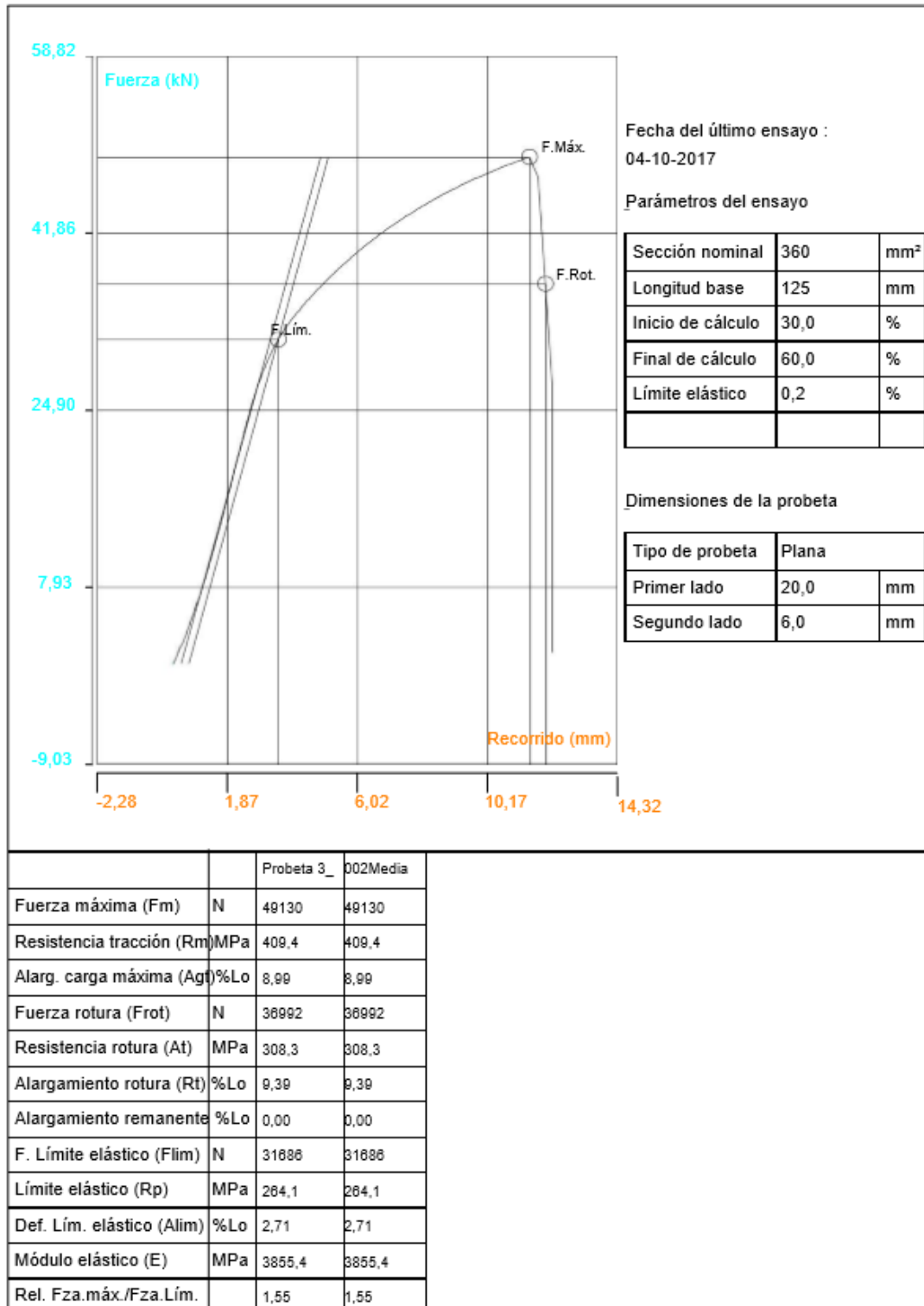
Fuente: TREXA C.A,



| | | Probeta 2_003Media | |
|---------------------------|-----|--------------------|--------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 42830 | 42830 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 356,9 | 356,9 |
| Alarg. carga máxima (Ag) | %Lo | 5,00 | 5,00 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 32248 | 32248 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 288,7 | 288,7 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 5,70 | 5,70 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0,00 | 0,00 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 33836 | 33836 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 282,0 | 282,0 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 2,76 | 2,76 |
| Módulo elástico (E) | MPa | 4259,2 | 4259,2 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | | 1,27 | 1,27 |

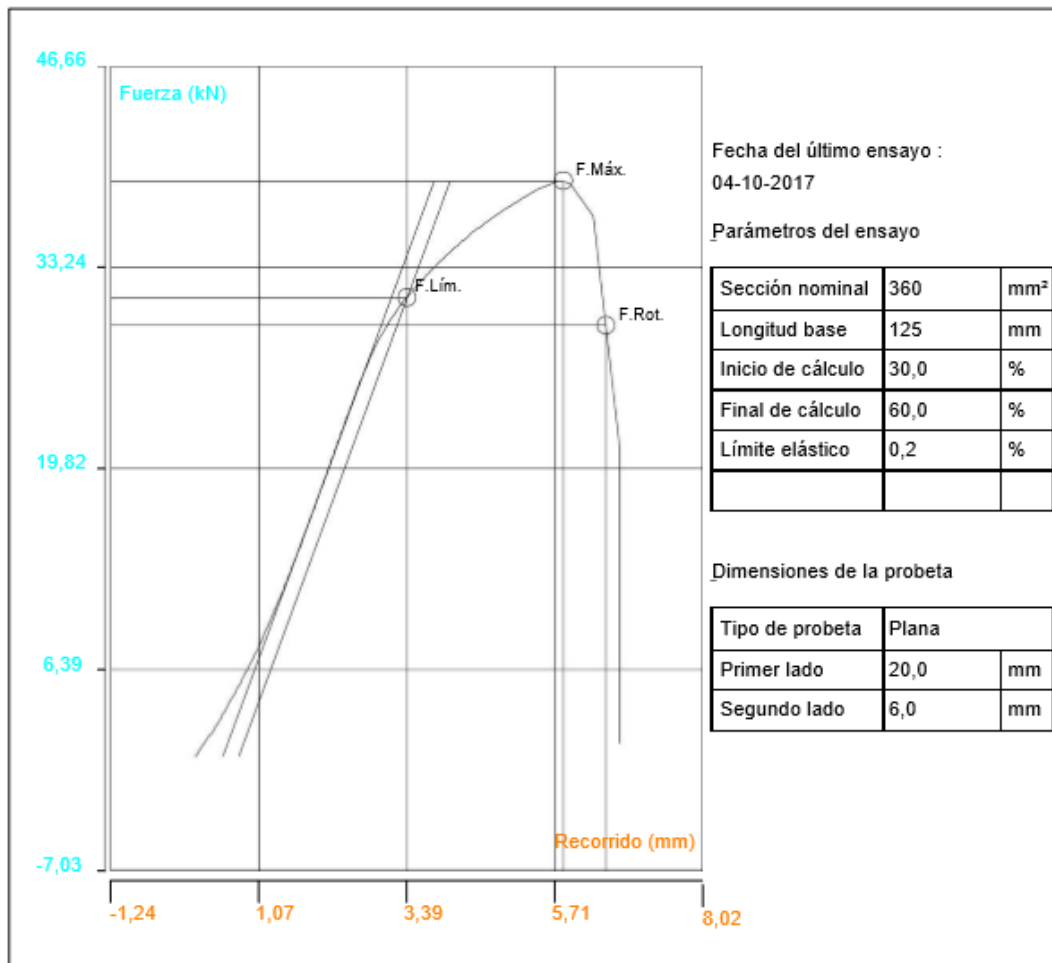
Anexo A. 2 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 2

Fuente: TREXA C.A,



Anexo A. 3 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 3

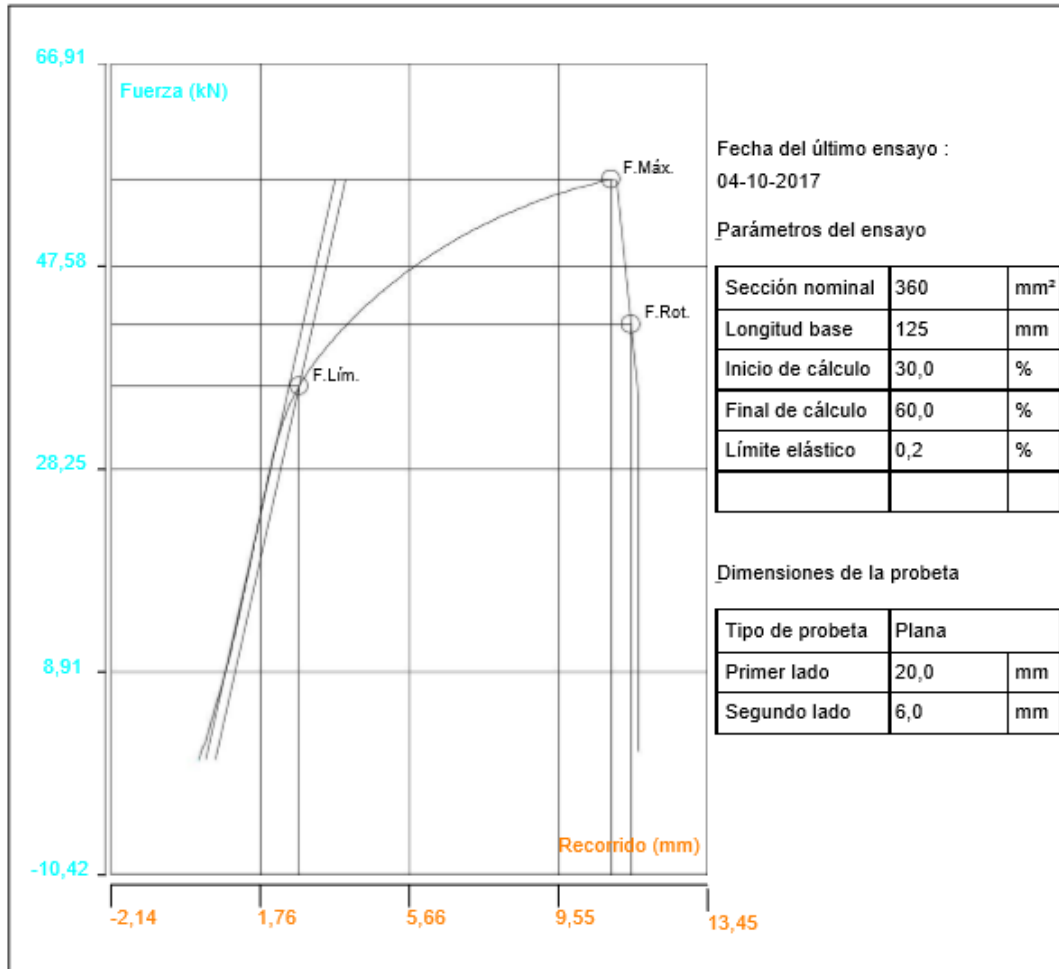
Fuente: TREXA C.A,



| | | Probeta 4_ | 001Media |
|---------------------------|-----|------------|----------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 38990 | 38990 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 324,9 | 324,9 |
| Alarg. carga máxima (Ag) | %Lo | 4,66 | 4,66 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 29357 | 29357 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 244,6 | 244,6 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 5,19 | 5,19 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0,00 | 0,00 |
| F, Límite elástico (Flim) | N | 31222 | 31222 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 280,2 | 280,2 |
| Def, Lím, elástico (Alim) | %Lo | 2,70 | 2,70 |
| Módulo elástico (E) | MPa | 4047,7 | 4047,7 |
| Rel, Fza,máx./Fza,Lím, | | 1,25 | 1,25 |

Anexo A. 4 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 4

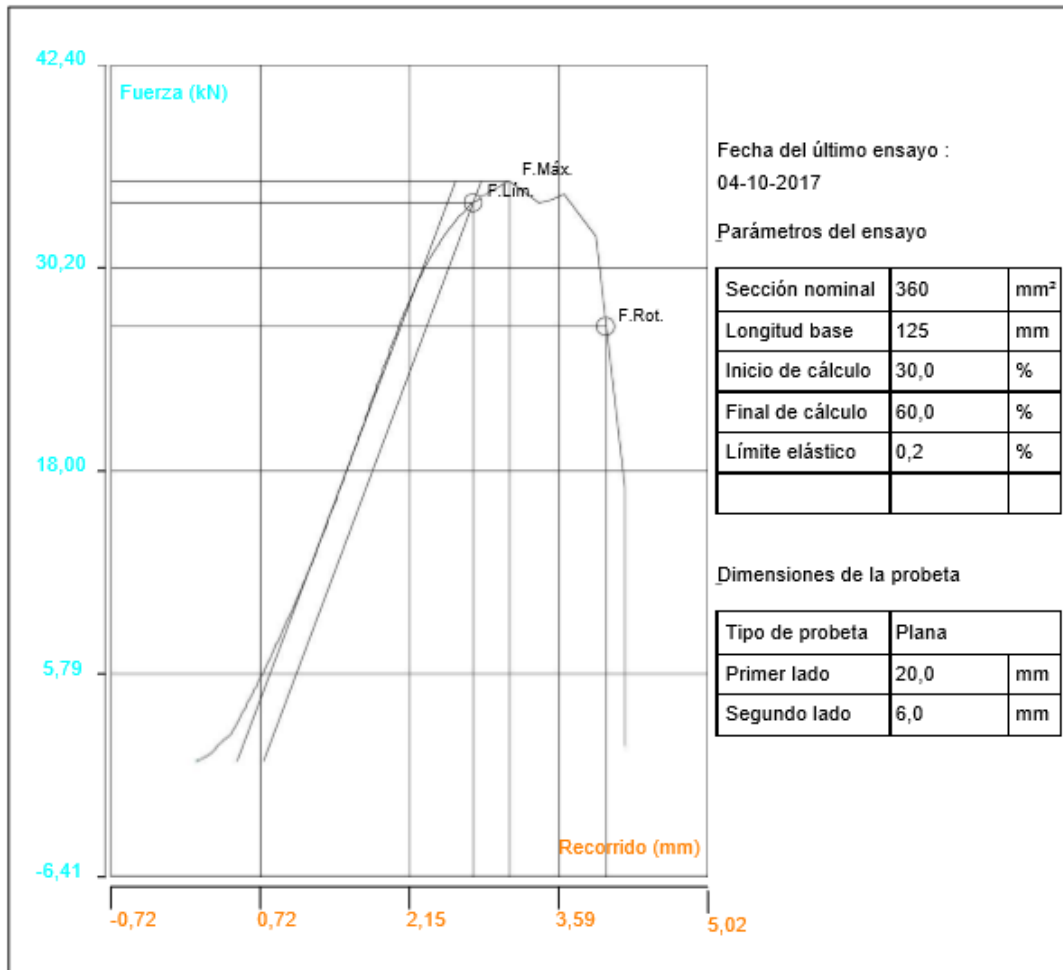
Fuente: TREXA C.A,



| | | Probeta 5_007Media | |
|---------------------------|-----|--------------------|--------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 55860 | 55860 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 465,5 | 465,5 |
| Alarg. carga máxima (Ag) | %Lo | 8,42 | 8,42 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 42059 | 42059 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 350,5 | 350,5 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 8,83 | 8,83 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0,00 | 0,00 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 38172 | 38172 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 301,4 | 301,4 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 2,10 | 2,10 |
| Módulo elástico (E) | MPa | 5840,0 | 5840,0 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | | 1,54 | 1,54 |

Anexo A. 5 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 5

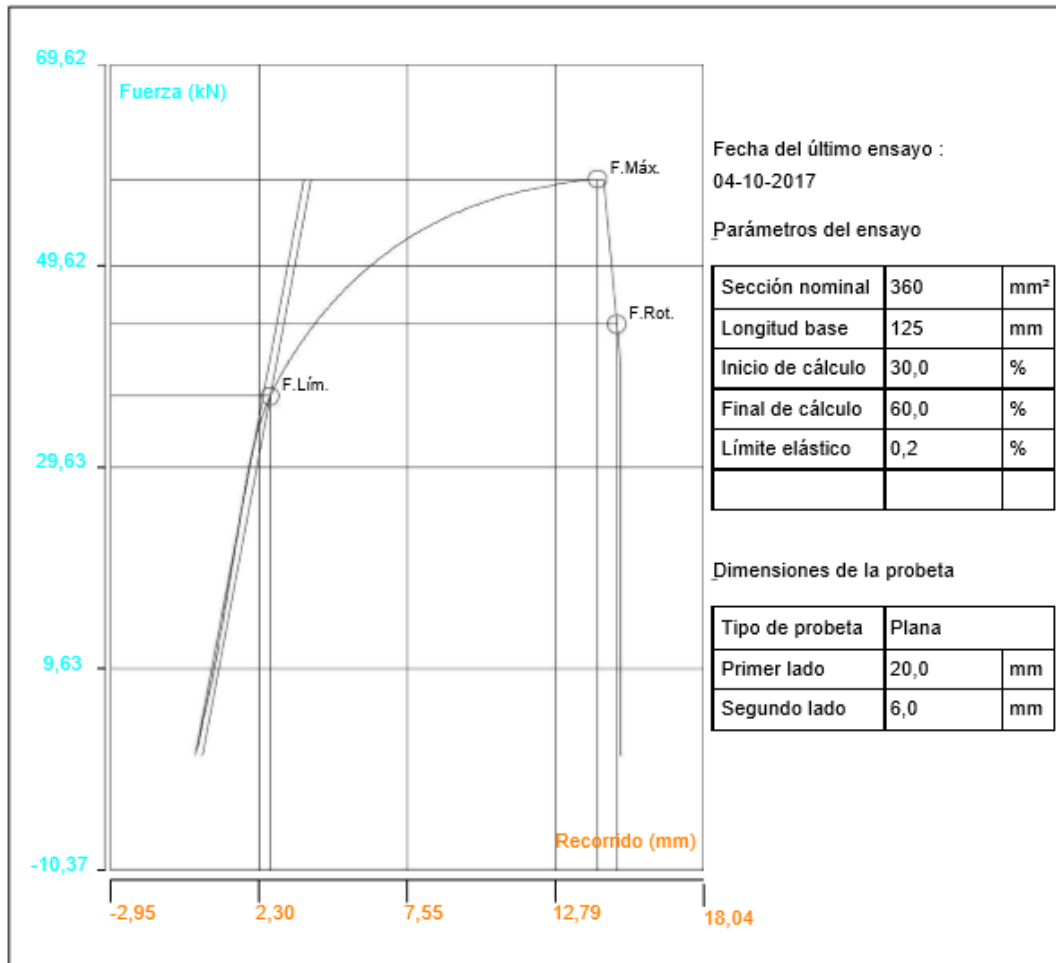
Fuente: TREXA C.A,



| | | Probeta 6_008Media | |
|---------------------------|-----|--------------------|--------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 35430 | 35430 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 295,3 | 295,3 |
| Alarg. carga máxima (Agf) | %Lo | 2,47 | 2,47 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 26677 | 26677 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 222,3 | 222,3 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 3,22 | 3,22 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0,00 | 0,00 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 34118 | 34118 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 284,3 | 284,3 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 2,20 | 2,20 |
| Módulo elástico (E) | MPa | 5794,2 | 5794,2 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | | 1,04 | 1,04 |

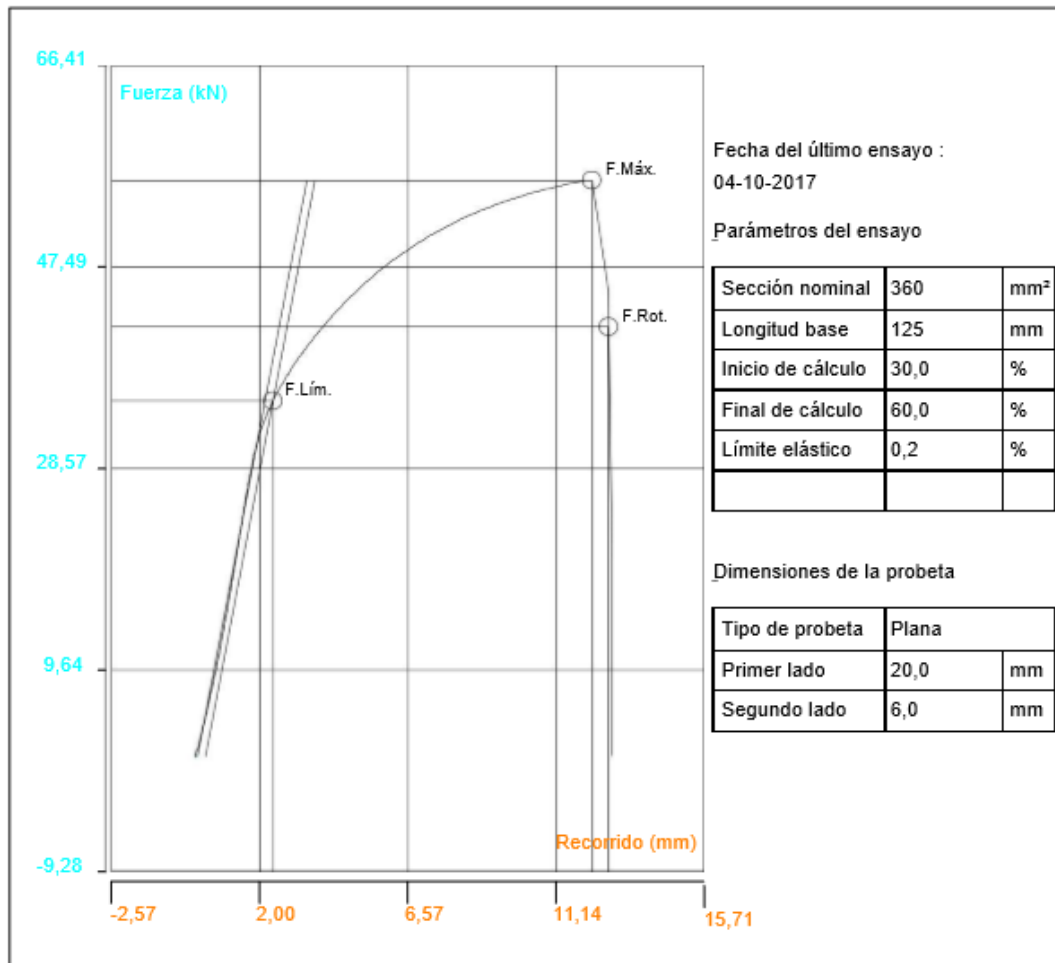
Anexo A. 6 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 6

Fuente: TREXA C.A,



| | | Probeta 7_005Media | |
|---------------------------|-----|--------------------|--------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 58190 | 58190 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 484,9 | 484,9 |
| Alarg. carga máxima (Agt) | %Lo | 11,39 | 11,39 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 43814 | 43814 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 365,1 | 365,1 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 11,94 | 11,94 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0,00 | 0,00 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 36689 | 36689 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 305,7 | 305,7 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 2,14 | 2,14 |
| Módulo elástico (E) | MPa | 5205,0 | 5205,0 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | | 1,59 | 1,59 |

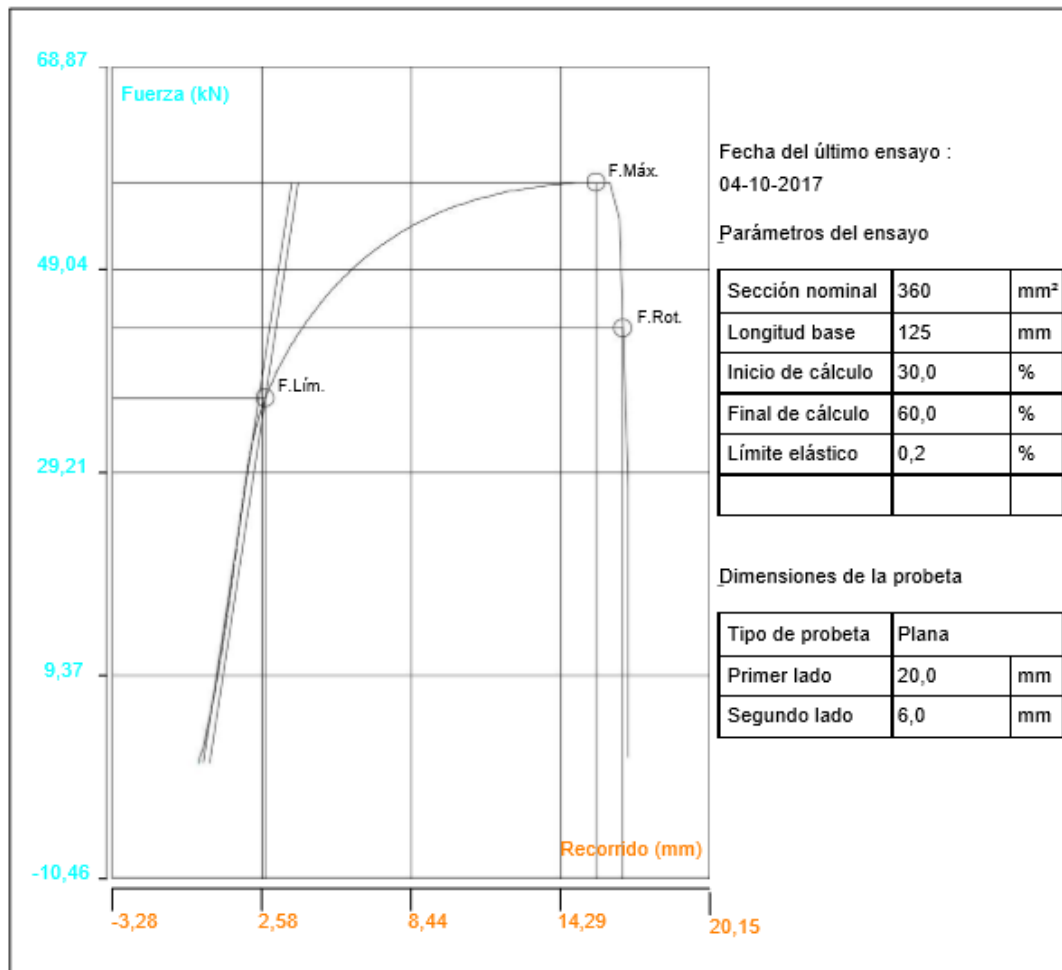
Anexo A. 7 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 7
Fuente: TREXA C.A,



| | | Probeta 8_004Media | |
|---------------------------|-----|--------------------|--------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 55600 | 55600 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 463,3 | 463,3 |
| Alarg. carga máxima (Ag) | %Lo | 9,98 | 9,98 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 41863 | 41863 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 348,9 | 348,9 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 10,39 | 10,39 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0,00 | 0,00 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 34898 | 34898 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 290,8 | 290,8 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 1,99 | 1,99 |
| Módulo elástico (E) | MPa | 5511,2 | 5511,2 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | | 1,59 | 1,59 |

Anexo A. 8 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 8

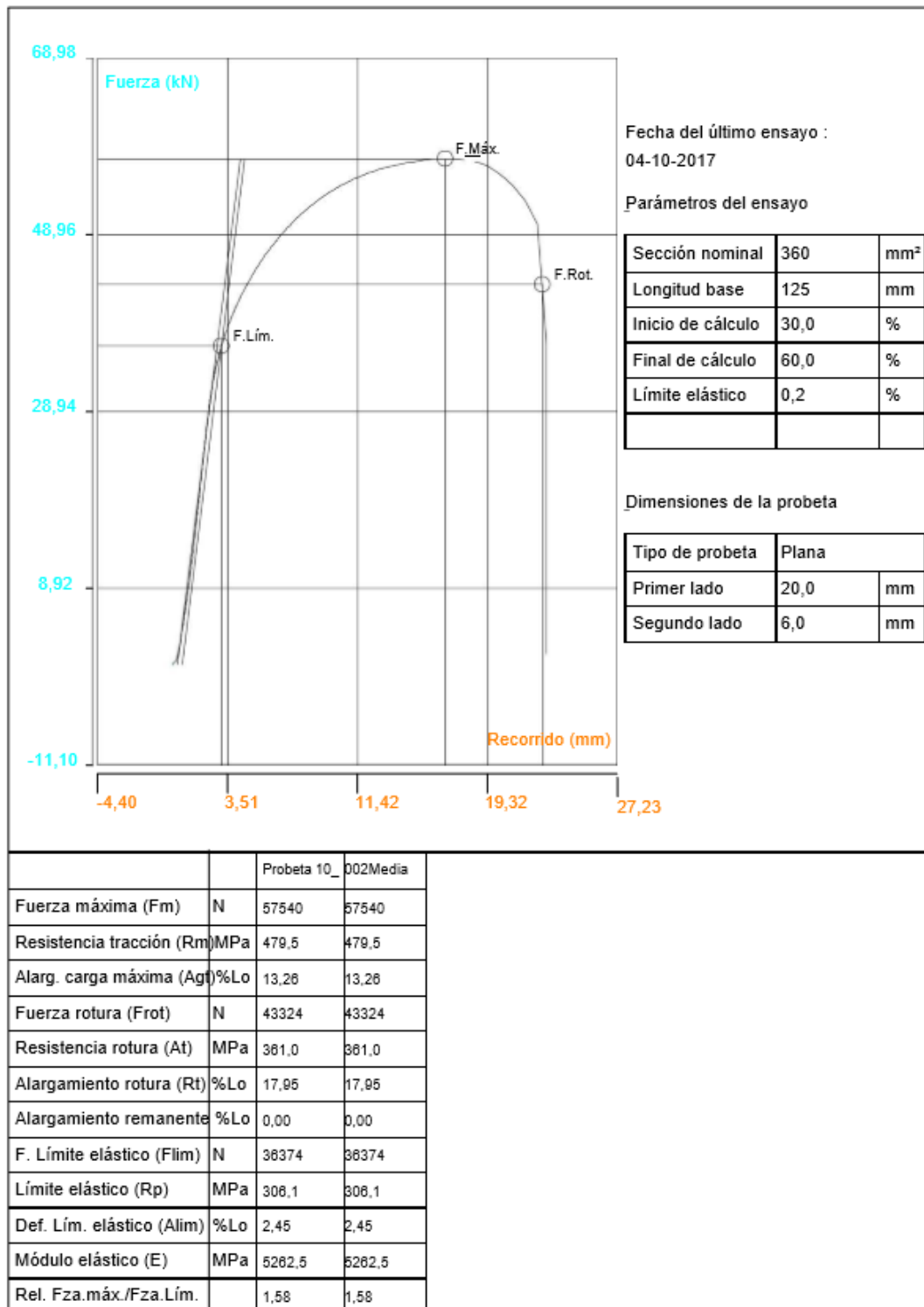
Fuente: TREXA C.A,



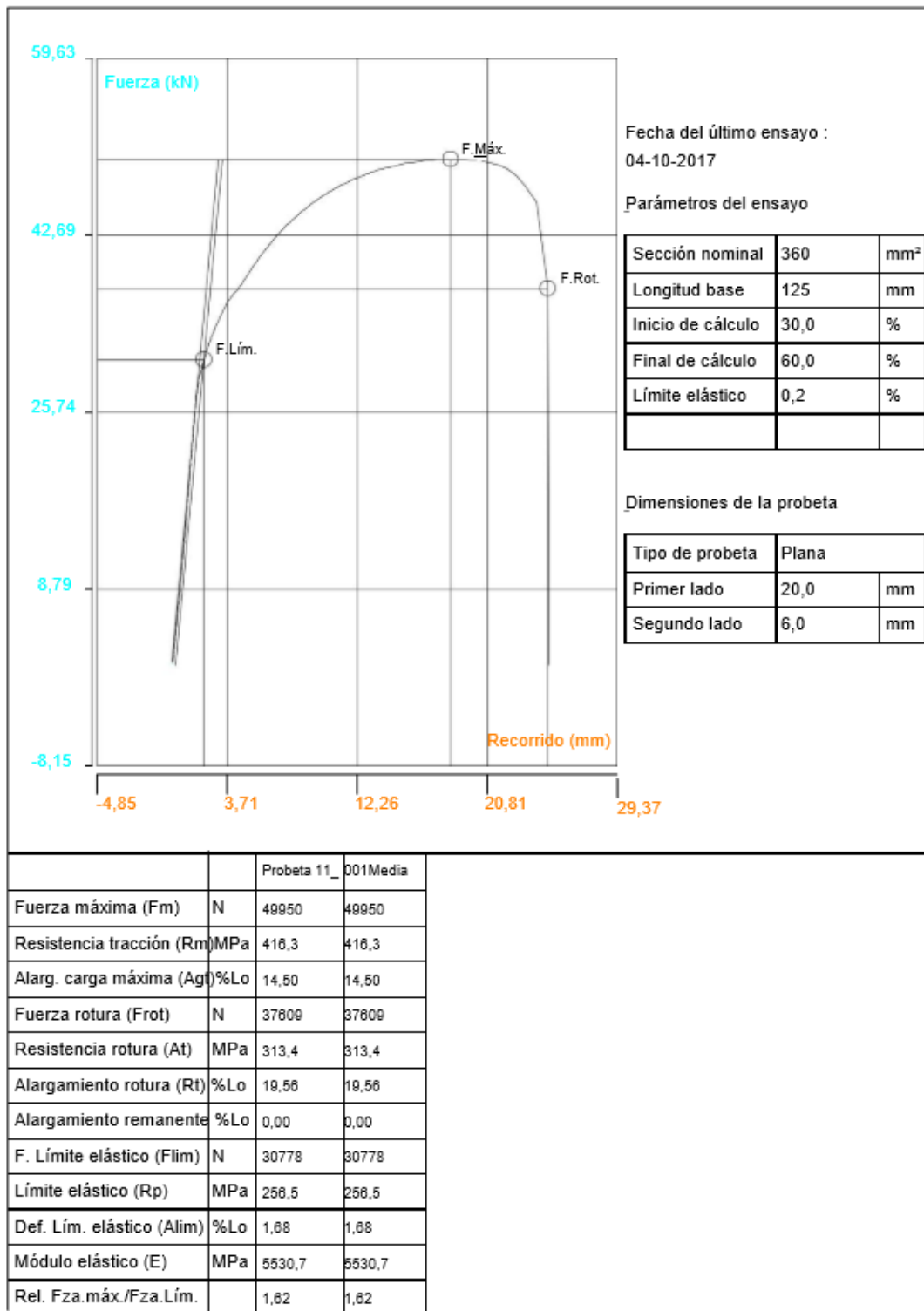
| | | Probeta 9_003Media | |
|---------------------------|-----|--------------------|--------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 57540 | 57540 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 479,5 | 479,5 |
| Alarg. carga máxima (Agt) | %Lo | 12,44 | 12,44 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 43324 | 43324 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 381,0 | 381,0 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 13,28 | 13,28 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0,00 | 0,00 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 36488 | 36488 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 307,1 | 307,1 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 2,14 | 2,14 |
| Módulo elástico (E) | MPa | 5730,5 | 5730,5 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | | 1,58 | 1,58 |

Anexo A. 9 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 9

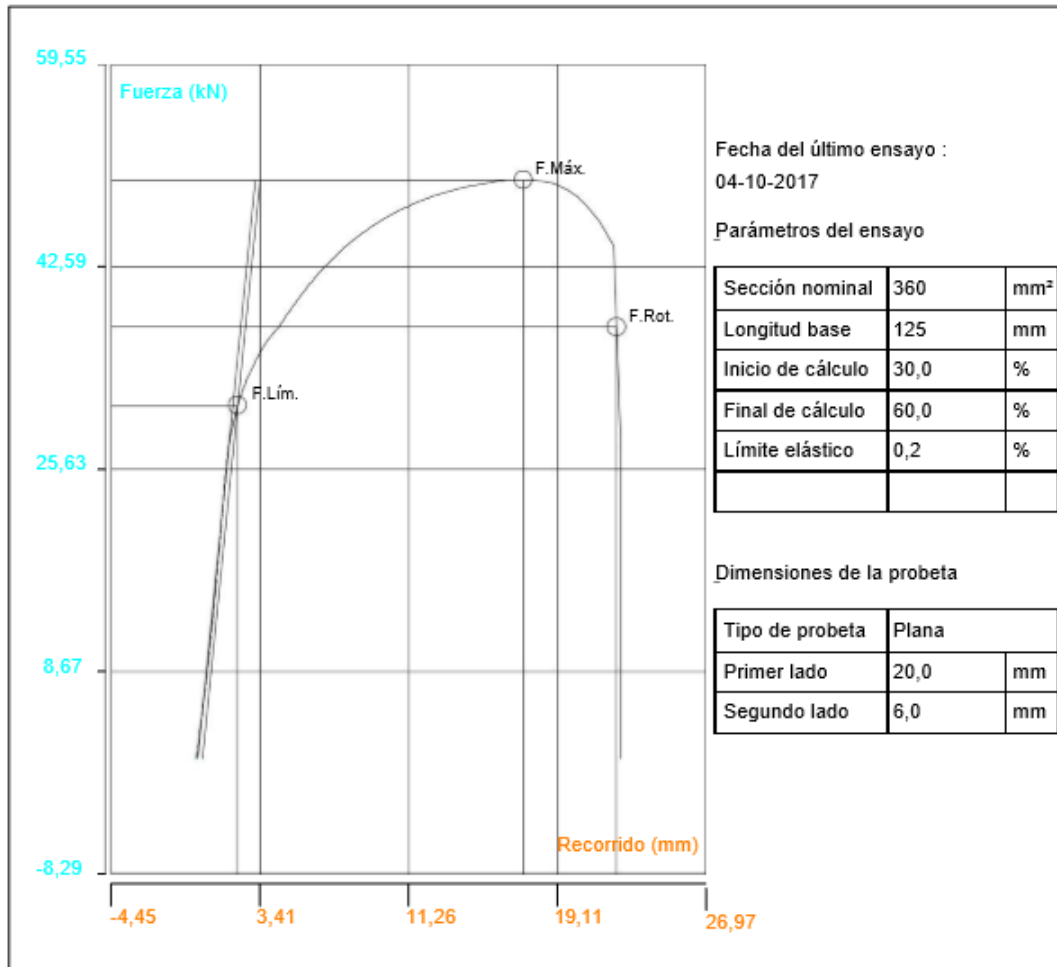
Fuente: TREXA C.A,



Anexo A. 10 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 10
Fuente: TREXA C.A,

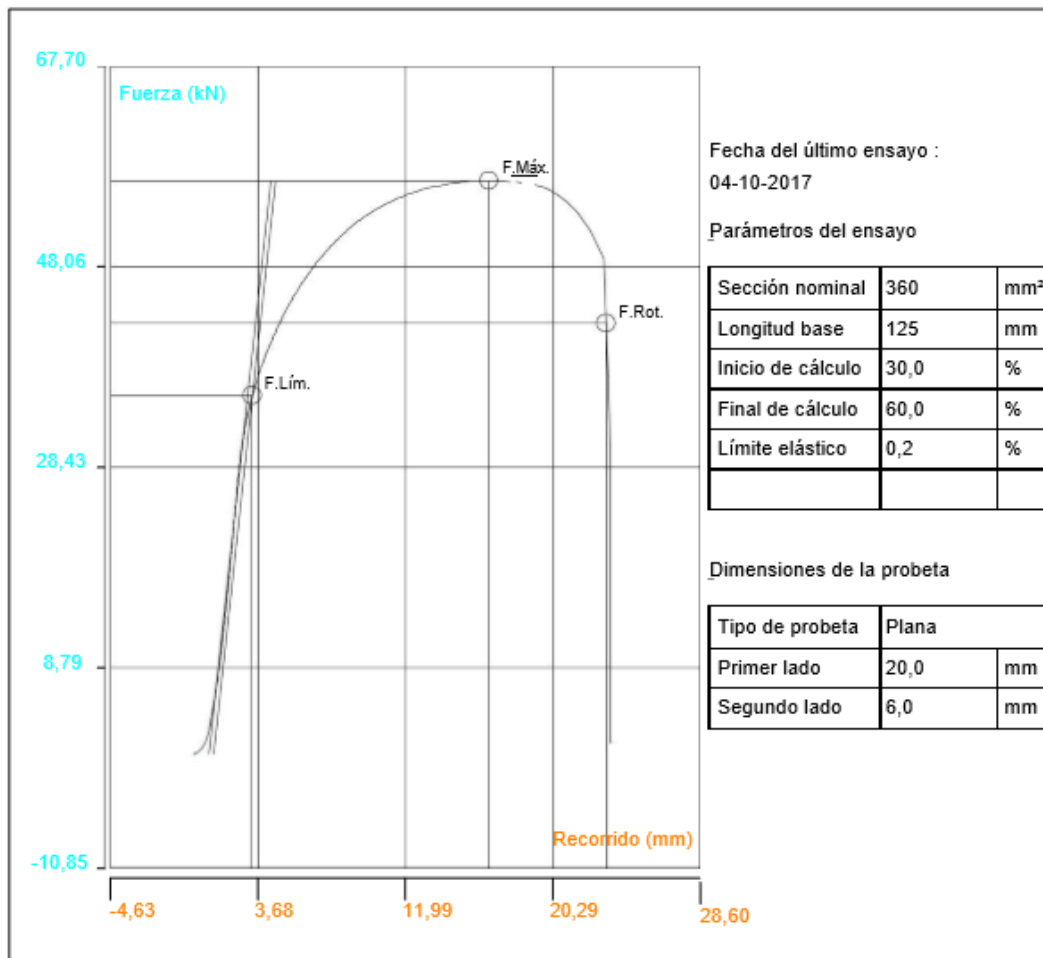


Anexo A. 11 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 11
Fuente: TREXA C.A,



| | | Probeta12_ | 001Media |
|---------------------------|-----|------------|----------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 49860 | 49860 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 415,5 | 415,5 |
| Alarg. carga máxima (Agt) | %Lo | 13,86 | 13,86 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 37542 | 37542 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 312,9 | 312,9 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 17,80 | 17,80 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0,00 | 0,00 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 30996 | 30996 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 258,3 | 258,3 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 1,79 | 1,79 |
| Módulo elástico (E) | MPa | 5545,1 | 5545,1 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | | 1,61 | 1,61 |

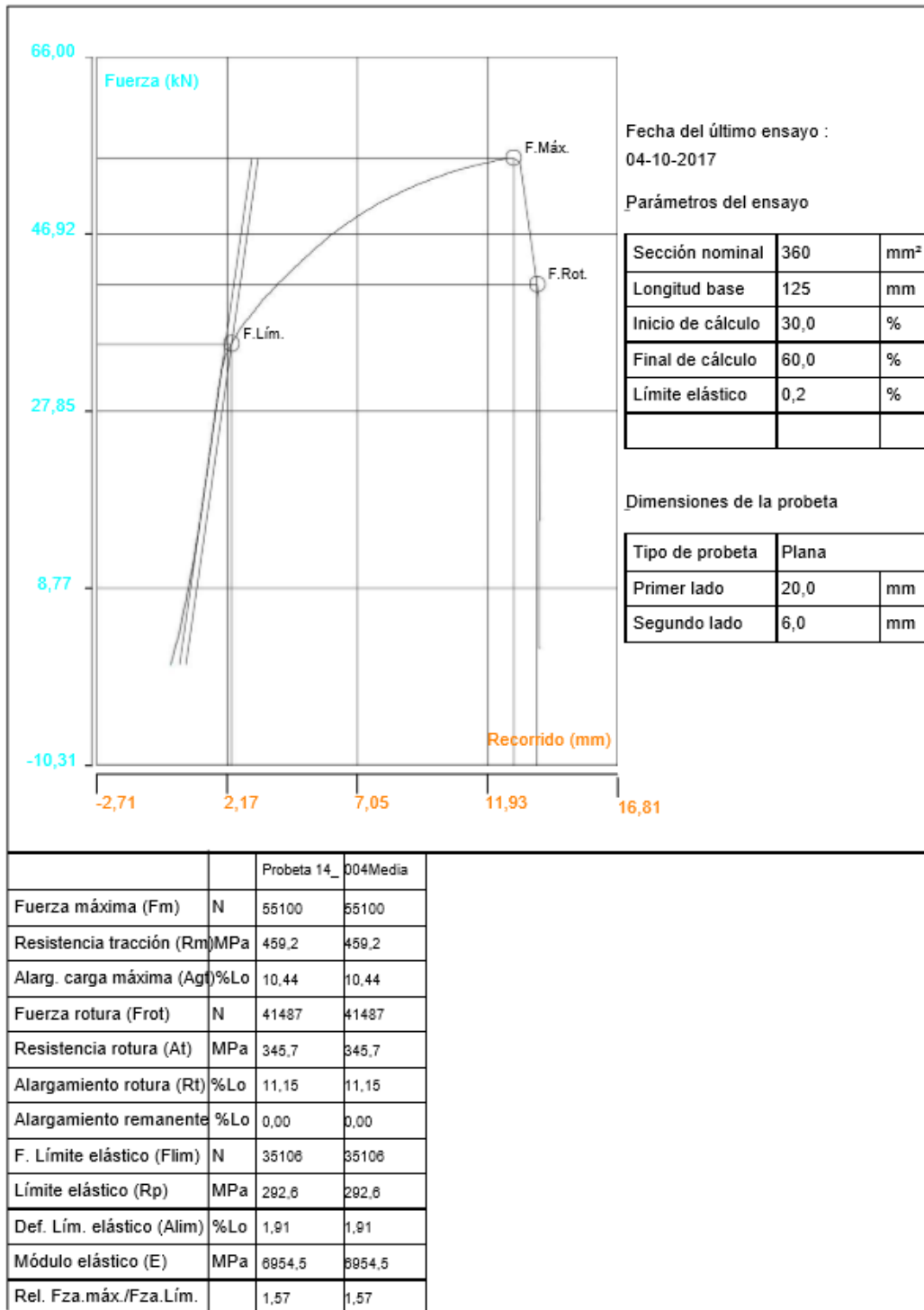
Anexo A. 12 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 12
Fuente: TREXA C.A,



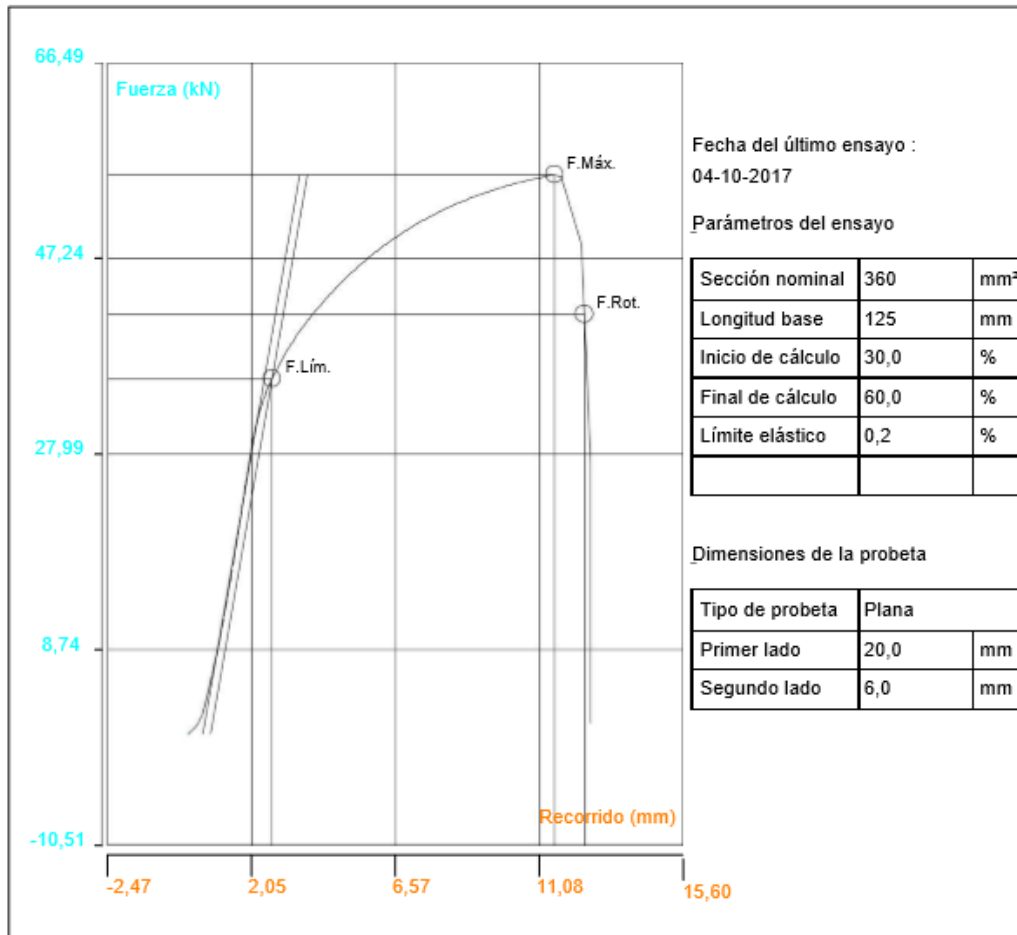
| | | Probeta 13_005Media | |
|---------------------------|-----|---------------------|--------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 56480 | 56480 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 470,7 | 470,7 |
| Alarg. carga máxima (Ag) | %Lo | 13,54 | 13,54 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 42526 | 42526 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 354,4 | 354,4 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 18,88 | 18,88 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0,00 | 0,00 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 35471 | 35471 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 295,6 | 295,6 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 2,75 | 2,75 |
| Módulo elástico (E) | MPa | 5535,6 | 5535,6 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | | 1,59 | 1,59 |

Anexo A. 13 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 13

Fuente: TREXA C.A,

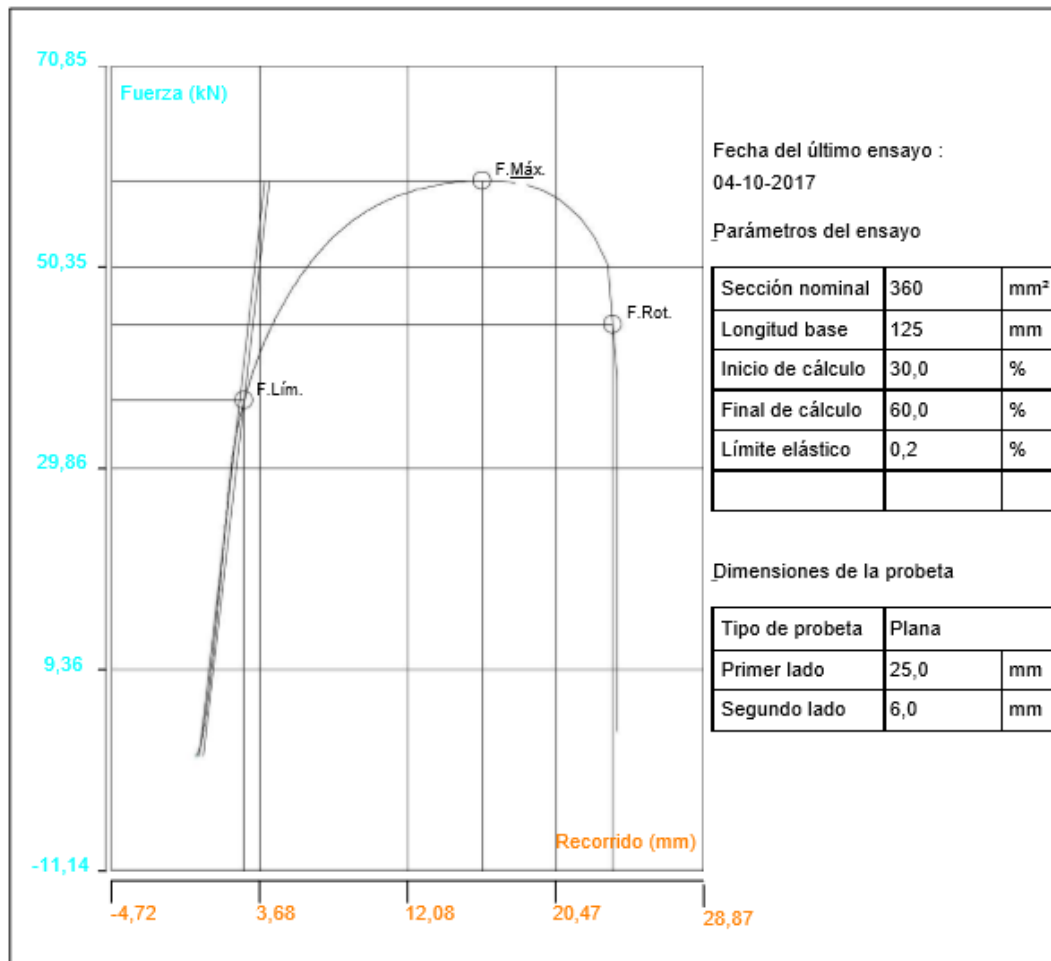


Anexo A. 14 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 14
Fuente: TREXA C.A,



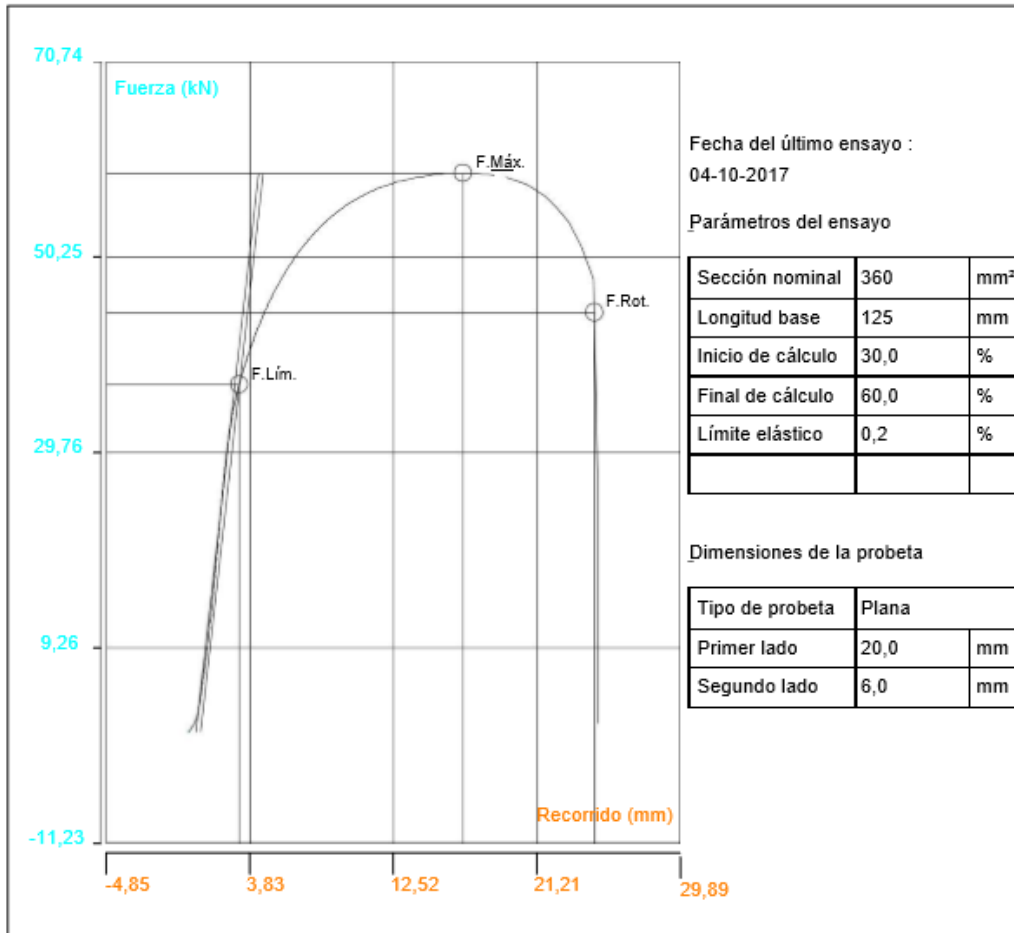
| | | Probeta 15_003Media | |
|---------------------------|-----|---------------------|--------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 55490 | 55490 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 482,4 | 482,4 |
| Alarg. carga máxima (Agf) | %Lo | 9,49 | 9,49 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 41781 | 41781 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 348,9 | 348,9 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 10,25 | 10,25 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0,00 | 0,00 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 35431 | 35431 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 295,3 | 295,3 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 2,24 | 2,24 |
| Módulo elástico (E) | MPa | 8153,7 | 8153,7 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | | 1,57 | 1,57 |

Anexo A. 15 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 15
Fuente: TREXA C.A,



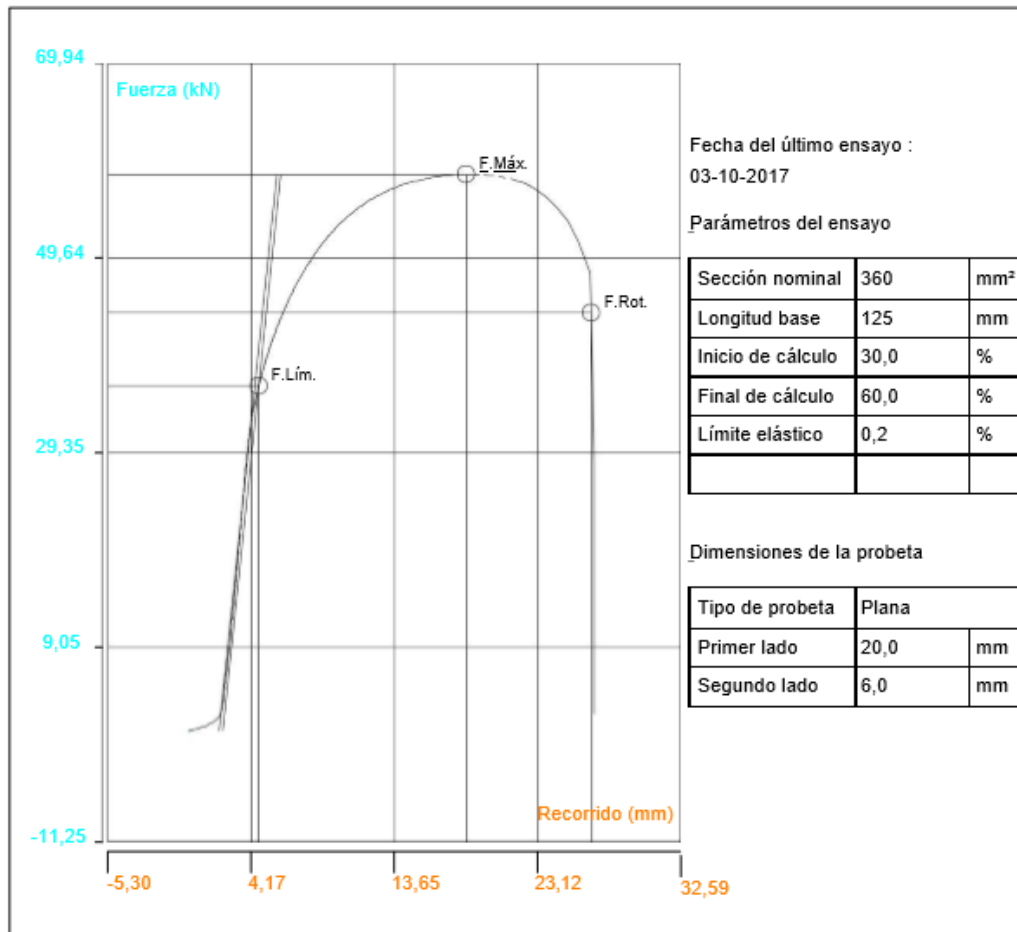
| | | Probeta 16_002Media | |
|---------------------------|-----|---------------------|--------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 59140 | 59140 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 492,8 | 492,8 |
| Alarg. carga máxima (Agf) | %Lo | 13,10 | 13,10 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 44529 | 44529 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 371,1 | 371,1 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 19,03 | 19,03 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0,00 | 0,00 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 36818 | 36818 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 306,8 | 306,8 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 2,26 | 2,26 |
| Módulo elástico (E) | MPa | 5480,7 | 5480,7 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | | 1,61 | 1,61 |

Anexo A. 16 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 16
Fuente: TREXA C.A,



| | | Probeta 17_001Media | |
|---------------------------|-----|---------------------|--------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 59030 | 59030 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 491,9 | 491,9 |
| Alarg. carga máxima (Ag) | %Lo | 13,42 | 13,42 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 44446 | 44446 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 370,4 | 370,4 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 19,80 | 19,80 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0,00 | 0,00 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 36897 | 36897 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 307,5 | 307,5 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 2,56 | 2,56 |
| Módulo elástico (E) | MPa | 5358,4 | 5358,4 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | | 1,60 | 1,60 |

Anexo A. 17 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 17
Fuente: TREXA C.A,



| | | Probeta 18_001Media | |
|---------------------------|-----|---------------------|--------|
| Fuerza máxima (Fm) | N | 58340 | 58340 |
| Resistencia tracción (Rm) | MPa | 488,2 | 488,2 |
| Alarg. carga máxima (Ag) | %Lo | 14,90 | 14,90 |
| Fuerza rotura (Frot) | N | 43927 | 43927 |
| Resistencia rotura (At) | MPa | 388,1 | 388,1 |
| Alargamiento rotura (Rt) | %Lo | 21,58 | 21,58 |
| Alargamiento remanente | %Lo | 0,00 | 0,00 |
| F. Límite elástico (Flim) | N | 38294 | 38294 |
| Límite elástico (Rp) | MPa | 302,5 | 302,5 |
| Def. Lím. elástico (Alim) | %Lo | 3,81 | 3,81 |
| Módulo elástico (E) | MPa | 5199,3 | 5199,3 |
| Rel. Fza.máx./Fza.Lím. | | 1,81 | 1,81 |

Anexo A. 18 Resultados del ensayo de tracción de la probeta 18
Fuente: TREXA C.A,