



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE QUITO**

**CARRERA DE MECÁNICA**

**ANÁLISIS DE SOLDABILIDAD DE LAS VARILLAS DE ACERO CORRUGADO  
ASTM A706 PARA USO ESTRUCTURAL BAJO LA NORMA NTE-INEN 2167**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de: **INGENIEROS MECÁNICOS**

**AUTORES: MICHAEL ANDRES SAFLA TENORIO**

**WILSON PAÚL TERCERO CONTERÓN**

**TUTOR: CRISTIAN ANDRÉS LEIVA GONZÁLEZ**

**QUITO - ECUADOR**

**2022**

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Michael Andrés Safla Tenorio con documento de identificación N° 1725128779 y Wilson Paúl Tercero Conterón con documento de identificación N° 1751053875 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo y autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 05 de septiembre del año 2022.

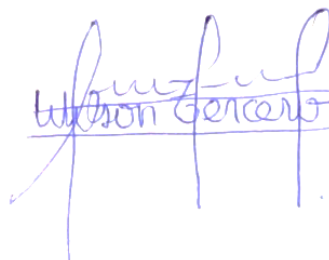
Atentamente



---

Michael Andrés Safla Tenorio

1725128779



---

Wilson Paúl Tercero Conterón

1751053875

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros Michael Andrés Safla Tenorio con documento de identificación N° 1725128779 y Wilson Paúl Tercero Conterón con documento de identificación N° 1751053875; expresé mi voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores de la propuesta tecnológica: “Análisis de soldabilidad de las varillas de acero corrugado ASTM A706 para uso estructural bajo la norma NTE INEN-2167”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 05 de septiembre del año 2022

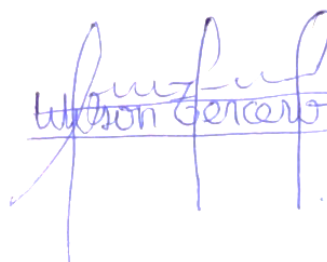
Atentamente



---

Michael Andrés Safla Tenorio

1725128779



---

Wilson Paúl Tercero Conterón

1751053875

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Cristian Andrés Leiva González con documento de identificación N° 1716424476, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE SOLDABILIDAD DE LAS VARILLAS DE ACERO CORRUGADO ASTM A706 PARA USO ESTRUCTURAL BAJO LA NORMA NTE INEN-2167, realizado por Michael Andrés Safla Tenorio con documento de identificación N° 1725128779 y por Wilson Paúl Tercero Conterón con documento de identificación N°1751053875, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Propuestas Tecnológicas que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 05 de septiembre del año 2022

Atentamente,



---

Ing. Cristian Andrés Leiva González, MSc.

1716424476

## **DEDICATORIA**

Dedico con todo mi corazón mi propuesta tecnológica a mi madre, pues sin su gran apoyo y constancia no hubiese llegado a este paso tan importante y tan anhelado que es el título de Ingeniería Mecánica. Tu sabiduría y cariño constante diario ha hecho que seas el pilar fundamental para todos los logros que he tenido y tendré; además tu bendición es la que me protege a lo largo de mis proyectos que me propongo. Por eso te ofrendo por todo tu cariño, paciencia y dedicación que siempre me has brindado madre mía.

*Michael*

Lleno de amor y alegría, dedico este trabajo de titulación a todos aquellos que me han acompañado a lo largo de mi carrera universitaria a mis amigos y familiares.

A mi mamá Hortencia le agradezco infinitamente por su paciencia y cariño, su bendición me ayuda a salir adelante por ellos te doy mi trabajo en ofrenda por el cariño que tú me das, a mi padre Gabriel le doy gracias por sus consejos cada uno de ellos impactó de manera positiva en mí y me ayudó a corregir mi camino para lograr los objetivos planteados.

A mis hermanos Jorge y Christian por apoyarme a lo largo de mi carrera con su compañía y consejos, a mis hermanas Nancy y Patty por cuidarme y apoyarme cuando más necesité de ellas.

A todos mis amigos y compañeros que me apoyaron con sus conocimientos y me compartieron de su sabiduría gracias infinitas.

*Wilson*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi familia por haber creído siempre en mí, dándome valores de respeto, humildad y sacrificio; enseñándome a valorar todo apoyo que me han brindado. A mi madre por guiarme en todo momento, siendo tan indispensable para cada paso que he dado.

Agradezco finalmente a mis tutores Ing. Cristian Leiva, Ing. Esteban Ramírez e Ing. Fernando Toapanta los cuales me guiaron en el proceso de titulación y a pesar de los tropiezos estuvieron ahí guiándonos con su sabiduría y conocimiento.

Gracias por este tan grande logro.

**Michael**

En primer lugar, doy gracias a Dios por permitirme vivir esta experiencia dentro de la Universidad Politécnica Salesiana, a mis maestros que me compartieron sus conocimientos con paciencia y dedicación para convertirme en un profesional exitoso.

Agradezco también a mi tutor de tesis Ingeniero Cristian Leiva por guiarme en la creación de mi trabajo de titulación y sacar adelante este proyecto a pesar de las adversidades.

Agradezco finalmente a todos mis amigos y compañeros, por los momentos agradables que pasamos y me permitieron sentirme a gusto en el lugar de estudio.

Gracias infinitas

**Wilson**

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	5
AGRADECIMIENTO.....	6
INTRODUCCIÓN .....	1
PROBLEMA .....	1
IMPORTANCIA Y ALCANCE.....	2
OBJETIVOS .....	3
OBJETIVO GENERAL: .....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....	3
CAPÍTULO I.....	4
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	4
1.1 Historia del acero.....	4
1.2 Acero estructural.....	6
1.2.1 Características del acero estructural .....	7
1.2.2 Clasificación de los aceros estructurales .....	7
1.2.3 Aceros al carbono.....	7
1.2.4 Aceros aleados.....	8
1.3 Varilla de acero corrugado.....	8
1.3.1 Características de las barras de acero ASTM A706 .....	9
1.3.2 Procesos de fabricación .....	9
1.3.3 Varillas de acero microaleadas.....	10
1.3.4 Varillas de acero termotratadas .....	10
1.4 Soldabilidad de los aceros .....	10
1.5 Procesos de soldadura.....	11
1.5.1 Soldadura Smaw.....	11
1.5.2 Soldadura Gmaw .....	12
1.5.3 Soldadura Fcaw .....	13
1.6 Tipos de juntas soldadas .....	15
1.6.1 Uniones a tope con soldadura de penetración completa.....	15
1.6.2 Uniones con soldadura traslapada .....	16
1.7 Detalles de juntas soldadas .....	18
1.7.1 Detalles para soldadura a tope .....	18
1.7.2 Detalle para soldadura traslapada.....	19

CAPÍTULO II .....	22
METODOLOGÍA .....	22
2.1 Procedimiento para la ejecución de soldadura .....	22
2.2 Especificaciones del proceso de soldadura.....	22
2.2.1 Material base .....	22
2.2.2 Material de aporte.....	23
2.2.3 Diseño de la junta .....	24
2.2.4 Posición de soldadura.....	25
2.3 Ensayos para evaluar la soldabilidad del acero .....	26
2.3.1 Ensayo resistencia a la tracción.....	27
2.3.1.1 Probetas utilizadas en tracción.....	27
2.3.1.2 Equipo ensayo de tracción.....	28
2.3.1.3 Procedimiento ensayo de tracción .....	29
2.3.1.4 Zona elástica .....	31
2.3.1.5 Zona plástica.....	31
2.3.1.6 Zona de estricción.....	32
2.3.2 Ensayo Metalográfico.....	32
2.3.2.1 Probetas utilizadas en el ensayo metalográfico .....	32
2.3.2.2 Procedimiento ensayo metalográfico.....	32
2.3.2.3 Montaje por compresión .....	32
2.3.2.4 Desbaste.....	33
2.3.2.5 Pulido.....	34
2.3.2.6 Análisis de la microestructura. ....	34
2.3.2.7 Ataque químico.....	34
2.3.3 Ensayo de dureza.....	35
2.3.3.1 Probetas utilizadas en el ensayo de dureza .....	35
CAPÍTULO III .....	36
RESULTADOS .....	36
3.1 Resultados ensayo de espectrometría.....	36
3.2 Resultados ensayo de tracción.....	38
3.2.1 Adelca.....	40
3.2.2 Andec .....	43
3.2.3 Novacero .....	46
3.2.4 Resultado propiedades mecánicas probetas material base .....	49



3.3	Análisis metalográfico metal base .....	51
3.3.1.1	Adelca probeta material base.....	54
3.3.2	Influencia del tamaño de grano material base .....	55
3.3.3	Análisis metalográfico soldadura. ....	56
3.3.3.1	Cálculo del tamaño de grano en la soldadura. ....	59
3.3.3.2	Adelca probeta soldada.....	59
3.3.4	Influencia del tamaño de grano en la soldadura .....	61
3.4	Resultados ensayo de dureza .....	63
3.4.1	Ensayo de dureza Adelca .....	63
3.4.2	Ensayo de dureza Andec .....	64
3.4.3	Ensayo de dureza Novacero .....	65
	CONCLUSIONES .....	67
	RECOMENDACIONES .....	69
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	70
	ANEXOS.....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	<i>Tratamiento térmico del hierro.</i>	5
<b>Figura 2.</b>	<i>Horno Alemán Stuckofen.</i>	5
<b>Figura 3.</b>	<i>Soldabilidad de un mismo acero</i>	11
<b>Figura 4.</b>	<i>Nomenclatura electrodo.</i>	12
<b>Figura 5.</b>	<i>Soldadura de ranura V simple en posición 1G</i>	16
<b>Figura 6.</b>	<i>Soldadura de ranura de bisel simple en posición 3G</i>	16
<b>Figura 7.</b>	<i>Soldadura de filete por medio de traslape</i>	17
<b>Figura 8.</b>	<i>Soldadura de filetes indirectas</i>	17
<b>Figura 9.</b>	<i>Detalle geométrico para soldadura en posición 1G</i>	18
<b>Figura 10.</b>	<i>Detalle geométrico para soldadura en posición 3G</i>	19
<b>Figura 11.</b>	<i>Empalme con barras en contacto</i>	19
<b>Figura 12.</b>	<i>Longitud de empalme para soldadura por ambos lados.</i>	20
<b>Figura 13.</b>	<i>Empalme con material adicional.</i>	20
<b>Figura 14.</b>	<i>Longitud de empalme para soldadura traslapada.</i>	21
<b>Figura 15.</b>	<i>Traslape directo con barras en contacto.</i>	25
<b>Figura 16.</b>	<i>Posiciones de soldadura.</i>	26
<b>Figura 17.</b>	<i>Barras en contacto soldadas por traslape directo.</i>	27
<b>Figura 18.</b>	<i>Material base sin aplicación de soldadura.</i>	28
<b>Figura 19.</b>	<i>Máquina test resources</i>	28
<b>Figura 20.</b>	<i>Diagrama de Esfuerzo vs Deformación.</i>	30
<b>Figura 21.</b>	<i>Maquina encapsuladora SimpliMet 4000.</i>	33
<b>Figura 22.</b>	<i>Pulidora semiautomática EcoMet 30.</i>	33
<b>Figura 23.</b>	<i>Metalografía Material base (a) Novacero, (b) Andec, (c) Adelca. Metalografía Soldadura(d) Novacero, (e) Andec y (f) Adelca.</i>	34
<b>Figura 24.</b>	<i>Probetas para ensayo de dureza.</i>	35
<b>Figura 25.</b>	<i>Sujeción probeta soldada.</i>	39
<b>Figura 26.</b>	<i>Esfuerzo vs Deformación Adelca Soldada.</i>	40
<b>Figura 27.</b>	<i>Esfuerzo vs Deformación Adelca Material Base.</i>	41
<b>Figura 28.</b>	<i>Resultados probeta Adelca.</i>	42
<b>Figura 29.</b>	<i>Esfuerzo vs Deformación Andec Soldada.</i>	43
<b>Figura 30.</b>	<i>Esfuerzo vs Deformación Andec material base.</i>	44
<b>Figura 31.</b>	<i>Resultado varilla corrugada Andec.</i>	45

<b>Figura 32.</b>	<i>Esfuerzo vs Deformación Novacero soldadas.</i> .....	46
<b>Figura 33.</b>	<i>Esfuerzo vs Deformación Novacero Material Base.</i> .....	47
<b>Figura 34.</b>	<i>Resultados probeta Novacero.</i> .....	48
<b>Figura 35.</b>	<i>Material base fabricantes.</i> .....	49
<b>Figura 36.</b>	<i>Soldadas tres fabricantes.</i> .....	50
<b>Figura 37.</b>	<i>Material base – Soldadas propiedades mecánicas.</i> .....	51
<b>Figura 38.</b>	<i>Microestructura material base a) Adelca, b) Andec y c) Novacero.</i> .....	52
<b>Figura 39.</b>	<i>Tamaño de Grano Adelca material base.</i> .....	54
<b>Figura 40.</b>	<i>Tamaño de grano vs límite de fluencia material base.</i> .....	55
<b>Figura 41.</b>	<i>Tamaño de grano vs resistencia a la tracción material base.</i> .....	56
<b>Figura 42.</b>	<i>Microestructura de soldadura a) Adelca, b) Andec y c) Novacero.</i> .....	57
<b>Figura 43.</b>	<i>Tamaño de grano Adelca soldada.</i> .....	59
<b>Figura 44.</b>	<i>Tamaño de grano vs límite de fluencia soldadura.</i> .....	61
<b>Figura 45.</b>	<i>Tamaño de grano vs resistencia a la tracción soldadura.</i> .....	62
<b>Figura 46.</b>	<i>Tracción vs Tamaño de grano.</i> .....	63
<b>Figura 47.</b>	<i>Mapeo de dureza Adelca</i> .....	64
<b>Figura 48.</b>	<i>Mapeo de dureza Adelca</i> .....	65
<b>Figura 49.</b>	<i>Mapeo de dureza Novacero.</i> .....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	<i>Porcentajes máximos permitidos en la mezcla de un acero al carbono.</i> .....	8
<b>Tabla 2.</b>	<i>Características tipos de soldadura.</i> .....	14
<b>Tabla 3.</b>	<i>Selección de un proceso de soldadura de acuerdo con diferentes parámetros.</i> ....	15
<b>Tabla 4.</b>	<i>Requerimientos de metal de aporte para acero ASTM A706.</i> .....	24
<b>Tabla 5.</b>	<i>Promedio de elementos químicos de los tres fabricantes</i> .....	36
<b>Tabla 6.</b>	<i>Datos de Carbono Equivalente.</i> .....	38
<b>Tabla 7.</b>	<i>Ensayo de tracción.</i> .....	38
<b>Tabla 8.</b>	<i>Especificaciones Máquina de Tracción.</i> .....	39
<b>Tabla 9.</b>	<i>Promedio probetas Adelca.</i> .....	40
<b>Tabla 10.</b>	<i>Promedio probetas Andec.</i> .....	41
<b>Tabla 11.</b>	<i>Resultados Adelca.</i> .....	42
<b>Tabla 12.</b>	<i>Promedio probetas Andec soldadas.</i> .....	43
<b>Tabla 13.</b>	<i>Promedio probetas Adelca material base.</i> .....	44
<b>Tabla 14.</b>	<i>Resultados Andec.</i> .....	45
<b>Tabla 15.</b>	<i>Promedio probetas Novacero soldadas.</i> .....	46
<b>Tabla 16.</b>	<i>Promedio probetas Novacero Material base.</i> .....	47
<b>Tabla 17.</b>	<i>Resultados Novacero.</i> .....	48
<b>Tabla 18.</b>	<i>Propiedades mecánicas material base.</i> .....	49
<b>Tabla 19.</b>	<i>Propiedades mecánicas soldadas.</i> .....	50
<b>Tabla 20.</b>	<i>Análisis metalográfico Material Base.</i> .....	53
<b>Tabla 21.</b>	<i>Valores de tamaño de grano y límite de fluencia para material base.</i> .....	55
<b>Tabla 22.</b>	<i>Valores de tamaño de grano y resistencia a la tracción material base.</i> .....	56
<b>Tabla 23.</b>	<i>Análisis metalográfico de soldadura.</i> .....	58
<b>Tabla 24.</b>	<i>Tamaño de grano probetas material base y probetas soldadas.</i> .....	60
<b>Tabla 25.</b>	<i>Valores de tamaño de grano y límite de fluencia para soldadura.</i> .....	61
<b>Tabla 26.</b>	<i>Valores de tamaño de grano y resistencia a la tracción para soldadura.</i> .....	62

## RESUMEN

La presente investigación tiene como finalidad el estudio de soldabilidad de las varillas de acero corrugado ASTM A706 [1] se ha tomado en consideración la norma NTE-INEN 2167 [2] donde se detalla los requerimientos que se debe cumplir al momento de soldar varillas lisas y corrugadas de acero al carbono termotratadas o microaleadas.

El siguiente estudio utilizará varillas de acero corrugadas de tres diferentes fabricantes Adelca, Andec y Novacero esta elección se la tomó para obtener una comparación de lo que sucede antes y después de aplicar un proceso de soldadura en los materiales, pues su proceso de fabricación difiere el uno del otro, las empresas Adelca y Andec utilizan un proceso de termo tratamiento para la obtención de su producto final, mientras las varillas de Novacero son realizadas en un proceso de laminación en caliente para posteriormente a la cual le deja enfriar a temperatura ambiente.

Mediante la aplicación de un proceso de soldadura por arco eléctrico SMAW se obtendrá probetas para el análisis de los ensayos que dicta la norma NTE-INEN 2167 [2] y posteriormente analizar las propiedades mecánicas como la resistencia a la tensión, resistencia a la tracción, la dureza, entre otros.

Finalmente se efectuará una comparación mediante el estudio de los valores obtenidos durante la aplicación de los ensayos para conocer cómo se comportan los materiales mencionados después del proceso de soldadura al aplicar correctamente las tareas que dicta la norma NTE-INEN 2167 [2] y los códigos enlazados con ella.

## **ABSTRACT**

The purpose of this research is to study the weldability of ASTM A706 [1] corrugated steel rods, taking into consideration the NTE-INEN 2167 [2] standard, which details the requirements that must be met when welding smooth and corrugated carbon steel rods, thermo-treated or micro-alloyed.

The following study will use corrugated steel rods from three different manufacturers Adelca, Andec and Novacero, this choice was made to obtain a comparison of what happens before and after applying a welding process on the materials, since their manufacturing process differs from each other, the companies Adelca and Andec use a heat treatment process to obtain their final product, while Novacero rods are made in a hot rolling process and then left to cool to room temperature.

Through the application of an electric arc welding process SMAW, specimens will be obtained for the analysis of the tests dictated by the NTE-INEN 2167 standard [2] and subsequently analyze the mechanical properties such as tensile strength, tensile strength, hardness, among others.

Finally, a comparison will be made by studying the values obtained during the application of the tests in order to know how the mentioned materials behave after the welding process when correctly applying the tasks dictated by the NTE-INEN 2167 [2] standard and the codes linked to it.

## **INTRODUCCIÓN**

Existen varios factores para determinar la calidad de soldabilidad de un acero estructural. Uno de los más importantes es el diseño de la junta de soldadura. Los aceros estructurales en la actualidad se han convertido en un material necesario para la construcción a causa de su alta resistencia, tenacidad y ductilidad, por ello es importante controlar la calidad de soldadura en los aceros pues sus cargas se transmiten de una parte hacia la otra a través de la junta de soldadura. El modelo de junta y de soldadura vienen especificados por normas y dependerán del material a ser utilizado.

Mediante la soldadura se logra la unión de un material mediante la aplicación de calor, durante este proceso el material y electrodo se funden logrando la conexión de las dos partes. Este proceso es de gran importancia en la industria metálica pues permite vincular dos piezas de un material y formar una sola. En ocasiones la unión de soldadura puede llegar a tener propiedades y características iguales o mejores que las del material original, esto se conseguirá dependiendo del material de aporte (electrodo, varilla, alambre macizo, entre otros) que se utilice durante el proceso de soldabilidad [3].

Los estándares utilizados comúnmente para la elaboración de estructuras metálicas mediante la utilización de las varillas ASTM A706 [3] se basa en la norma establecida, aquí se detallan los parámetros y condiciones para una óptima soldadura mediante el uso de este material y garantizan mediante su cumplimiento calidad y seguridad en la unión de soldadura.

Esta investigación tiene como finalidad evaluar la calidad de una junta soldada bajo la norma especificada para las varillas de uso estructural, para ello se han seleccionado tres principales fabricantes de este material Adelca, Andec y Novacero, debido a que su proceso de fabricación es diferente, Adelca y Andec realizan un proceso de termo tratamiento para la obtención final del material, mientras que el fabricante Novacero son de material microaleado [2].

## **PROBLEMA**

La soldabilidad es un proceso de la unión de dos o más partes de un material. Durante su ejecución un área muy pequeña del lugar de soldadura llega a transformarse en estado líquido, a causa del ciclo térmico que se produce al crear el arco eléctrico que permite que se funda, alcanzando temperaturas aproximadas 3500 °C [4]. Esto ocasiona un cambio en las propiedades

del material, los cuales pueden ser detectados mediante la aplicación de ensayos no destructivos y mecánicos al material soldado.

Existe una gran cantidad de metales que pueden ser unidos mediante el proceso de soldadura, sin embargo, no todos pueden ser soldados bajo las mismas condiciones. Para ello existe una serie de normas publicadas para certificar la calidad y el proceso de soldadura. La norma NTE-INEN-2167 [2] establece los parámetros para la soldadura de las varillas de acero corrugado para uso estructural, la correcta ejecución de esta norma durante el proceso nos garantiza seguridad y tranquilidad durante el uso de la estructura metálica que fue soldada.

Las varillas ASTM A706 [1] son muy utilizadas en la elaboración de estructuras de hormigón o concreto, al presentar una alta resistencia y gran ductilidad este material es utilizado para completar la falta de resistencia a tracción presente en materiales como el hormigón a la vez que trabajan como mecanismo de tensión en la estructura.

Debido a la utilización de las varillas de acero corrugado en estructuras que demandan alta calidad en el proceso de soldadura, para brindar seguridad y tranquilidad durante el uso de la estructura soldada. Es necesario estudiar que ocurre con las propiedades del material durante y después del proceso de soldabilidad [5].

La varilla corrugada ASTM A706 [1] es fabricada por tres empresas importantes en el Ecuador las cuales son Andec, Adelca, Novacero las cuales se hará un estudio comparativo ya que las dos entidades nombradas primero utilizan una varilla termo tratada y Novacero utiliza varilla microaleada la cual se observará antes y después que se modifique la soldabilidad en el material.

## **IMPORTANCIA Y ALCANCE**

Durante el proceso de soldabilidad se deben tener en cuenta varios aspectos que se da en la soldadura de estructuras de acero, para así reducir y precautelar la vida que utilizan esta estructura y cualquiera que sea su fin.

El estudio de la soldabilidad de metales es muy importante para muchas ramas de la ingeniería que trabajan con diferentes tipos de metales, se vuelve necesario conocer los materiales, procedimientos y procesos para obtener una buena calidad en la junta soldada.

Los estudiantes y profesionales de las carreras como Ingeniería Mecánica, Civil entre otras relacionadas con el estudio de estructuras encontrarán en esta propuesta tecnológica



información muy importante relacionada con la soldabilidad de las varillas de acero corrugado ASTM A706 [6].

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL:**

- Analizar la soldabilidad de las varillas de acero corrugado ASTM A706 para uso estructural bajo la norma INEN 2167.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Analizar la composición y microestructura de las varillas disponibles en el mercado para la caracterización de sus propiedades.
- Establecer los parámetros y condiciones de soldabilidad de las varillas de acero corrugado de uso estructural para la validación del proceso de soldadura mediante la norma INEN 2167.
- Verificar los cambios microestructurales de una junta soldada para el análisis de su comportamiento mediante ensayos destructivos.
- Constatar los resultados obtenidos con la norma INEN 2167.

## CAPÍTULO I

### FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En el siguiente capítulo se detalla conceptos importantes acerca de la soldabilidad de los aceros, los cuales son de gran importancia pues permiten conocer las características y propiedades de los materiales que se va a utilizar, así como los procedimientos que se pueden aplicar para soldar estos materiales. Esto ayudará a evaluar e interpretar los resultados que se obtendrán durante el estudio.

#### 1.1 Historia del acero

Comenzando con la historia del acero, es útil saber que el material es la mezcla de hierro y carbono, sin embargo, existen varios elementos como azufre, vanadio, fósforo y cromo que se pueden agregar, mezclando esto para obtener un acero de calidad.

El hierro es un mineral, en su mayoría se lo puede encontrar en forma de óxidos, esto puede explicar en parte el desarrollo posterior de la metalurgia del hierro en relación con otros materiales.

Se sabe que el hierro se fabricó desde tiempos prehistóricos, para la elaboración de herramientas, pues el utensilio más antiguo elaborado mediante la utilización de hierro fue descubierto alrededor del año 4000 a.C., más sin embargo su uso era muy poco frecuente, puesto que en ocasiones el hierro se originaba a partir de meteoritos, lo cual hacía que su valor superará al del oro en algunas regiones de América Andina [7].

A partir del año 1700 a.C., el hierro comienza a ser utilizado con intensidad para la fabricación de armamento, puntas de flechas, ruedas, anillos, entre otros elementos muy útiles, lo cual indica que en aquella época ya se conocía mucho acerca de la manufactura del hierro. Sin embargo, su desarrollo aún era muy escaso debido a su producción en simples hornos abiertos al aire libre lo cual permitía la obtención apenas de una masa pastosa que tomaba forma a través del golpe de pesados martillos, lo cual lo transformaba en un hierro forjado con alto contenido de carbono y muy poca dureza, que, en comparación con las herramientas obtenidas a partir de bronce, este era de muy baja calidad.

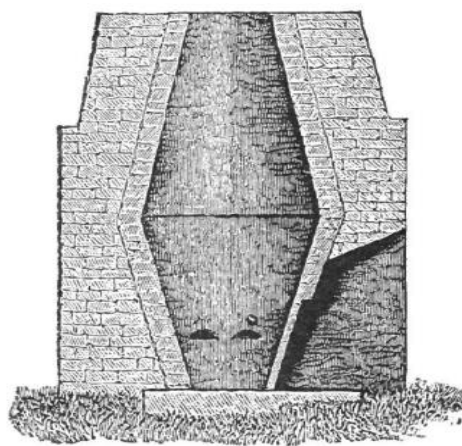
El desarrollo pequeño y escaso del hierro se mantuvo hasta el descubrimiento de los griegos para obtener un metal de mayor dureza, el cual consistía en calentar el metal al rojo vivo mientras se le iba añadiendo carbón encendido. A partir de este descubrimiento empezó

una era industrial para el hierro ya que este procedimiento aplicado al metal permitía la aplicación de tratamientos térmicos como el templeado que se indica en la figura 1. Lo que dio paso para la creación de sociedades metalúrgicas crecientes, que tiempo después y debido a la guerra se dedicarían a la producción de cascos y armaduras para soldados de la época.



**Figura 1.** Tratamiento térmico del hierro [8].

Se obtuvo beneficios abismales en el siglo XV con la invención de los hornos alemanes mostrados en la figura 2 conocidos como “Stückofen”, gracias a la tecnología y capacidad de estos hornos se permitía por primera vez la licuefacción del metal. Estos hornos se convirtieron en piezas fundamentales en Europa para el trabajo con metales, lo cual dio lugar a raíz del descubrimiento de la pólvora para que se empezará con la fundición de cañones y la producción de armas de fuego [8].



**Figura 2.** Horno Alemán Stückofen [9].

En Suecia en el siglo XVII, se admite un tipo de metal nombrado como acero Blíster, este metal no era plenamente un acero con las características y cualidades que se conoce hoy en día, sino más bien era hierro forjado carbonizado lo cual permitía la obtención de un metal de alta dureza. Al finalizar este siglo comienza en Europa la producción más importante de hierro forjado maleable, también mediante la utilización de la tecnología alemana el más tenaz acero alemán.

Un siglo más tarde la fabricación de acero se intensifica a la par que su tecnología va mejorando. Uno de los principales cambios aportados durante este proceso fue el paso de utilizar carbón vegetal a utilizar carbón como combustible para la fundición de este metal. Este aporte se dio gracias a A. Darby [9] fue de gran beneficio para la construcción del puente que atravesaba el río Severn. Esta serie de acontecimientos junto con otros hechos y descubrimientos científicos dio lugar a la llamada revolución industrial, la cual se ve representada principalmente por un cambio en la fabricación artesanal y las formas de vida tradicionales dando paso a la producción industrial y mecanización. Este proceso de transformación en la sociedad se debe en gran parte gracias al desarrollo y evolución del hierro y el acero este efecto se refleja en muchos aspectos como la generación de energía gracias a la maquina a vapor, la producción de textiles en la industria, los medios de transporte y otros muchos inventos de la época y otros actuales que sin duda hace pensar que el desarrollo de la humanidad se debe en gran parte a la producción y desarrollo de la industria del acero [9].

## **1.2 Acero estructural**

El hierro es utilizado como material propio para la fabricación de estructuras hasta inicios del siglo VXII. Antes de ello era un material adicional en la construcción de estructuras de madera (herrajes elaborados a mano, clavos) de la misma forma fue utilizado para la construcción de algunas herramientas y máquinas que hacían mucho más fácil el trabajo en las construcciones.

El hierro fundido era utilizado en la arquitectura debido a su gran capacidad de resistencia a la compresión, sin embargo, una de sus mayores desventajas era su limitada capacidad de resistir esfuerzos de flexión a causa de su alta fragilidad.

En la actualidad existen cientos de elementos elaborados a partir del acero, por esta razón existen numerables clases de chapas de acero. Específicamente el acero estructural esta ideado para ser utilizado en la elaboración de estructuras, puentes, edificios, componentes para maquinaria, entre otros.

Su elaboración se da a través de un proceso de laminado en caliente, el cual consta de tres importantes fases:

1. El mineral de hierro es pulverizado y clasificado para después ser sometido a procesos de refinación que permiten obtener una pureza de aproximadamente 60%.
2. El mineral obtenido es colocado en altos hornos para ser calentado a temperaturas muy elevadas, con lo cual se logra eliminar impurezas del material.
3. Finalmente, el hierro fundido se extrae y pasa nuevamente por un proceso de calentamiento que permitirá la entrada de elementos importantes que le aportan considerables propiedades al acabado del acero como es el caso del magnesio. Estos elementos proveerán al acero de fuerza, ductilidad, resistencia, entre otros [10].

### *1.2.1 Características del acero estructural*

**Resistencia:** Esta característica del acero le permite soportar grandes cargas y brindar mayor seguridad a las estructuras, pues su forma original no resultará afectada y tampoco modificada.

**Ductilidad:** El acero estructural es capaz de ser sometido a grandes deformaciones sin que este llegue a romperse, sin embargo, no quiere decir que, por ser un material dúctil, la estructura fabricada también lo sea.

**Soldadura:** Una de las grandes ventajas del acero estructural, es que permite realizar uniones mediante soldadura, lo cual permite unir partes del material.

**Tenacidad:** Presenta una gran resistencia para romperse, ser molido o doblado.

**Corrosión:** Dependerá principalmente de las condiciones climáticas a las que este expuesto el material, sin embargo, no es muy común que este material se deteriore con facilidad [11].

### *1.2.2 Clasificación de los aceros estructurales*

De acuerdo con su composición existe dos grandes grupos para la clasificación del acero estructural.

#### *1.2.3 Aceros al carbono*

Estos aceros se caracterizan principalmente por la composición química, formada en su mayoría por hierro y carbono. De existir otros elementos en su estructura, existe un porcentaje máximo

que se indica en la tabla 1, el mismo no se debe sobrepasar para ser considerado como acero al carbón.

**Tabla 1.** Porcentajes máximos permitidos en la mezcla de un acero al carbono.

<b>Componente</b>	<b>Simbología</b>	<b>% máximo</b>
Titanio	Ti	0.3 %
Cobalto	Co	0.3 %
Wolframio	W	0.3 %
Vanadio	V	0.05 %
Molibdeno	Mo	0.1 %
Cromo	Cr	0.25 %
Níquel	Ni	0.5 %
Silicio	Si	1.0 %
Manganeso	Mn	1.2 %

#### **1.2.4 Aceros aleados**

Son conocidos como aceros aleados ya que tienen en su estructura como: níquel, cromo, manganeso, vanadio, aluminio, cobalto, silicio, tungsteno, entre otros. Esto permite mejorar sus características tales como resistencia, límite elástico, dureza y resistencia a la corrosión. Mismas que se son elevadas en comparación con los aceros al carbono [12].

### **1.3 Varilla de acero corrugado**

Este material es el resultado de la fundición del hierro a temperaturas muy elevadas, alcanzando durante este proceso la fusión del material, ya en su estado líquido es moldeado con la ayuda de lingotes para finalmente tensar o aplastar y conseguir la forma del material deseado. Se puede encontrar dos tipos de varillas lisas y corrugadas, esta última es la más utilizada en el sector de la construcción pues gracias a su forma la adherencia del concreto es mucho mayor que en una varilla lisa.

Se puede encontrar varillas de acero de diferentes diámetros, su uso dependerá de acuerdo con el fin que se le vaya a dar a la misma, pues un diámetro mayor servirá para proyectos que demanden gran resistencia como espacios viales, carreteras, puentes, aeropuertos. Por otra parte, existe varillas de menor diámetro que pueden ser utilizadas en residencias, inmuebles,

casas pequeñas. Su principal objetivo es soportar esfuerzos de flexión y compresión causados por los elementos que sostienen o por eventualidades naturales tales como movimientos o sismos.

Es importante observar al momento de utilizar una varilla que los sobresalientes tengan la misma forma y tamaño pues esto será muy útil para que el concreto se adhiera con mayor facilidad a la estructura, de la misma manera tener una uniformidad en las corrugaciones esto permitirá doblar y cortar la varilla de acero con mayor facilidad [13].

El tipo de acero empleado para la elaboración de este producto es un acero laminado de gran resistencia formado por una aleación de hierro-carbono para su composición. Su elaboración es controlada por normas que garantizan la calidad de este producto entre las cuales se encuentra las normas ASTM-A615 [14] y ASTM-A706 [3].

De igual forma es muy importante la composición química. Este factor es muy importante pues de ello dependerá que la varilla se pueda soldar aplicando parámetros establecidos. El reglamento regula de igual forma la masa nominal de la varilla el cual es un dato importante para posteriores cálculos como el perímetro de la zona deformada y dimensiones del radio de la varilla [15].

### ***1.3.1 Características de las barras de acero ASTM A706***

En la construcción no representa una gran inversión pues es un material considerablemente barato que aporta un gran beneficio mediante su utilización. Sus residuos pueden ser reutilizados por lo que las varillas de acero corrugado se considera un producto reciclable. Presenta una gran flexibilidad lo que lo convierte en un material de gran ayuda ante eventualidades naturales como los movimientos telúricos.

Es un material propenso a soportar grandes cargas esto es muy importante para brindar confianza y seguridad en la construcción. Gracias a su composición química es un material muy fácil de soldar y manipular [16].

### ***1.3.2 Procesos de fabricación***

De acuerdo con el procedimiento que se emplea para la fabricación de acero corrugado para uso estructural, este se clasifica en dos principales procesos

- Barras laminadas en caliente microaleadas
- Barras laminadas en caliente termotratadas

### ***1.3.3 Varillas de acero microaleadas***

Es una barra de acero obtenida mediante un proceso de laminado en caliente o de baja aleación, presenta un área circular corrugada misma que logra obtener las propiedades químicas exigidas por la norma NTE INEN 2167 [2] mediante sus compuestos químicos entre los cuales están presentes componentes de aleación tales como molibdeno, cromo, níquel, cobre, zirconio, titanio, niobio y vanadio en cantidades reducidas.

La empresa ecuatoriana Novacero [17] utiliza la varilla de acero corrugado para uso estructural agregando componentes de aleación específicamente seleccionados al acero y en cantidades definidas. Su objetivo principal es acrecentar las características mecánicas del acero concediéndole un desempeño mucho mejor que el material de acero utilizado tradicionalmente [18].

### ***1.3.4 Varillas de acero termotratadas***

Es una varilla de baja y media aleación de carbono termotratadas, pues su proceso de termo tratamiento en el que el material consiga las características mecánicas pretendidas por la norma NTE INEN 2167 [2] mediante tratamientos de revenido y temple.

Las empresas ecuatorianas Andec y Adelca consiguen la fabricación de sus varillas de acero corrugado para uso estructural a través de este proceso y mediante la aplicación de las normativas internacionales consiguen de esta forma tensiones de adherencia establecidas, así también resistencia y tracción en la barra de acero corrugado.

Andec emplea una tecnología de termo tratamiento que consiste en el enfriamiento repentino de dicho material inspeccionado mediante la utilización de agua, misma que fluye a distintas velocidades a medida que transita por la línea de laminación. Este proceso de enfriamiento aporta al material propiedades mecánicas precisas en su núcleo y en su superficie lo que permite aumentar sus propiedades de ductilidad, adherencia desgaste y resistencia [19].

## **1.4 Soldabilidad de los aceros**

Es un aspecto muy importante para tomar en cuenta pues su correcta ejecución genera elementos seguros y fiables. Por ello es muy importante tomar a consideración ciertos aspectos



como el porcentaje de carbono presente en el material que va a ser utilizado, pues de ello dependerá que material de aporte es de gran utilidad.

Durante la soldabilidad es muy importante intentar mantener las propiedades del material, pues debido al calor que aporta el proceso de soldadura, muchas veces se ve afectado una pequeña parte del material. Esto se debe principalmente a los cambios en su microestructura y a la creación de estructuras que no se encuentran equilibradas. Esto aparece como consecuencia del ciclo térmico que se produce durante el procedimiento de soldadura. En este desarrollo intervienen factores importantes como la composición química del material, las dimensiones del material a soldar, su geometría, entre otros factores [20].



**Figura 3.** Soldabilidad de un mismo acero [20].

## **1.5 Procesos de soldadura**

De acuerdo con el código AWS D1.4 [1] existen tres principales procesos que pueden utilizarse al momento de soldar varillas de acero corrugado. Estos pueden ser por SMAW o soldadura por arco eléctrico, GMAW o soldadura MIG y FCAW también conocida como soldadura por arco con núcleo. También pueden ser utilizados otros procedimientos no mencionados aquí, siempre que el ingeniero los apruebe y estos cumplan con pruebas de calificación.

### **1.5.1 Soldadura Smaw**

El procedimiento de soldadura identificado como SMAW de sus siglas (Shield Metal Arc Welding) [21] se desarrolla mediante dos factores importantes, material de aporte y material base, durante este proceso es por arco eléctrico puede alcanzar temperaturas de 3500 °C aproximadamente en el pico del electrodo. Mediante la aplicación de calor el metal base y el

electrodo se funden formando un charco el cual se hace sólido a medida que el electrodo va avanzando a través de la junta soldada.

Este modelo de soldadura requiere la utilización de la máquina con cierto amperaje el mismo está definido por el electrodo, tipo de revestimiento y la tensión eléctrica por la longitud de arco.

El electrodo aporta grandes beneficios para el proceso de soldadura. Su revestimiento es el encargado de proteger el metal fundido mediante la producción de gas, genera escoria misma que se encarga de proteger el cordón de soldadura y agregar elementos de aleación a la junta cómo la densidad y otros factores [22].



**Figura 4.** Nomenclatura electrodo [22].

### **1.5.2 Soldadura Gmaw**

Particularmente se hace referencia a este proceso de soldadura como soldadura MIG, esto debido a que en sus inicios únicamente se utilizaba gases inertes, para cumplir con el proceso de soldadura, sin embargo, debido a la alta demanda del acero y al alto costo de los gases mencionados los soldadores empezaron a utilizar el proceso conocido como MAG en el cual el gas utilizado es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) pues mediante este se consigue una mejor proliferación del acero.

Debido a estas dos formas de aplicación, el proceso GMAW es una técnica de soldabilidad muy conocida para soldar espesores utilizados para fines estructurales, además son muy finos a partir de los 0,3 mm hasta espesores mucho más pronunciados.

Este proceso se utiliza para soldar piezas delgadas de aluminio, magnesio, cobre, titanio, entre otros mientras el proceso MAG es utilizado idealmente para unir piezas de acero, hierro al carbono y bajo carbono sin importar su espesor o dimensiones.

### **1.5.3 Soldadura Fcaw**

Es también conocida como soldadura por arco, consiste en utilizar un arco causado por un electrodo continuo como material de aporte, consiguiendo de esta manera unir metales, además un proceso muy similar al de la soldadura GMAW su principal diferencia se basa en el alambre usado pues este presenta un flux interno el cual desempeña tareas muy similares al revestimiento de un electrodo es decir, el fundente interno estabiliza el arco, corrige la química de la soldadura al introducir elementos de aleación y protege por medio del humo y la escoria, entre otras diferencias como la presencia de una fuente de mayor potencia o una pistola con mayor capacidad de corriente.

Este proceso es muy utilizado en acero al carbono, acero inoxidable y algunas aleaciones, no es adecuado para metales no ferrosos, está ganando popularidad como una alternativa muy eficiente en el proceso de fabricación debido a que su tasa de fusión es relativamente alta y no requiere de una superficie extremadamente limpia como su contraparte GMAW.

Se puede concluir que este proceso es ideal para placas muy gruesas ya que tiene un arco térmico de flujo profundo positivo que reduce los problemas de soldadura como la falta de fusión. Además, las soldaduras de filete FCAW tienen una soldadura más angosta y profunda que las soldaduras SMAW [23].

La elección de un proceso de soldadura se da por diferentes procesos en la cual se debe analizar cuál es su finalidad como son:

- Corriente eléctrica disponible.
- Disponibilidad de consumibles (material de aporte).
- Cantidad de metal a ser depositado durante el proceso de soldadura.
- Las condiciones locales (nivel con respecto al piso) y ambientales (Corrientes de aire, ambiente húmedo o seco, etc.).
- Tiempo para terminar el trabajo.
- Disponibilidad de soldadores para ejecutar el proceso.

Tomando en cuenta estos factores y otras características importantes en el proceso de soldabilidad se manifiesta en la tabla 2, una comparación de las características más importantes a tomar en consideración para los diferentes tipos de soldadura.

**Tabla 2.** Características tipos de soldadura [24].

<b>SMAW</b>	<b>GMAW</b>	<b>FCAW</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máquina de trabajo</li> <li>• Utilizable para una amplia gama de metales, electrodos y posiciones para soldar.</li> <li>• Velocidad de deposición del metal de soldadura relativamente altas.</li> <li>• Aplicación muy recomendada al aire libre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máquina de trabajo</li> <li>• Utilizable para la soldabilidad de metales ferrosos y no ferrosos.</li> <li>• Velocidad de deposición del metal mayores que SMAW y GTAW.</li> <li>• Aplicación al ambiente limitada se debe proteger el arco de corrientes de aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máquina de trabajo</li> <li>• Limitado para la soldabilidad de aleaciones base níquel y aleaciones ferrosas.</li> <li>• Velocidad de deposición hasta el cuádruple que en SMAW.</li> <li>• Su aplicación al ambiente es muy limitada en FCAW-G las corrientes de aire pueden afectar el arco.</li> </ul>

Tomando en cuenta las características descritas en la tabla 2 se ha realizado un estudio que permita elegir el proceso que mejor se adapta a las condiciones con los cuales se cuenta para la realización de este estudio por ello se presenta en la tabla 3 una puntuación, donde cinco califica la situación como muy favorable y uno poco favorable.

**Tabla 3.** Selección de un proceso de soldadura de acuerdo con diferentes parámetros.

	<b>SMAW</b>	<b>GMAW</b>	<b>FCAW</b>
<b>CARACTERÍSTICA/PROCESO</b>			
Equipo	5	3	2
Trabajo con metales	4	5	3
Velocidad de deposición	4	5	5
Aplicación al ambiente	5	2	1
<b>TOTAL</b>	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>11</b>

Se elige finalmente y de acuerdo con la valoración obtenida la soldabilidad por arco eléctrico SMAW, sin embargo, es importante mencionar que cada proceso de soldadura por arco tiene sus propias propiedades. Su elección dependerá de varios factores que dependiendo del caso se puede presentar como una ventaja o una limitación en el proceso.

## **1.6 Tipos de juntas soldadas**

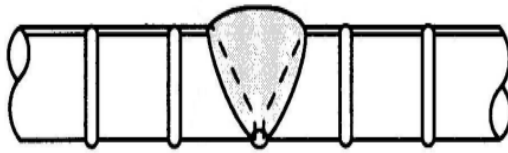
El código AWS D1.4 [1] establece diferentes métodos para la unión del acero corrugado para refuerzo por medio de soldadura, de los cuales dos principales tipos de soldadura son utilizados con frecuencia en la industria, como soldadura traslapada y la soldadura a tope con penetración completa.

### **1.6.1 Uniones a tope con soldadura de penetración completa**

Este tipo de unión es muy utilizada para la soldadura de varillas de acero corrugado para refuerzo, sin embargo, se debe tomar muy en cuenta el diámetro con el que se está trabajando, es recomendable cuando la varilla presenta un diámetro igual o mayor a 8 cm y en todos los casos que se presente dificultades para la utilización de uniones por traslape.

Tomando en cuenta las especificaciones del código ANSI/AWS D1.4 [1] y las recomendaciones dadas por el fabricante de las varillas de acero corrugado para uso estructural ASTM A706 [2] se tomará en consideración la soldadura en dos posiciones.

En la posición 1G, se deposita la soldadura en posición plana como se indica en la figura 5 pues los elementos a soldar se encuentran apoyados sobre la superficie en un plano horizontal.



**Figura 5.** Soldadura de ranura V simple en posición 1G [2].

La figura 6 indica la posición sobre plano 3G, en la cual el eje de la junta soldada se encuentra horizontalmente, para su ejecución se debe colocar los elementos a soldar en posición horizontal es decir sobre un plano vertical.



**Figura 6.** Soldadura de ranura de bisel simple en posición 3G [2].

Las posiciones mostradas serán utilizadas en base a recomendaciones de profesionales pues se tiene un mejor panorama con respecto al eje de soldadura, esto facilitará la aplicación del conocimiento por parte del soldador para la ejecución del trabajo [25].

### **1.6.2 Uniones con soldadura traslapada**

La manera más frecuente de realizar este tipo de uniones consiste en traslapar los dos elementos a ser unidos y soldados entre sí o colocando una varilla frente a la otra para unir las por medio de un material adicional que permitirá la transmisión de esfuerzos.

Si se realiza la unión por medio de traslape, la soldadura debe ser depositada por ambos costados como se muestra en la figura 7, asimismo, es aceptado las uniones con soldadura de un solo lado siempre que el otro borde no sea accesible. Este tipo de uniones es recomendado para varilla de diámetro pequeño no mayores de 5 cm.

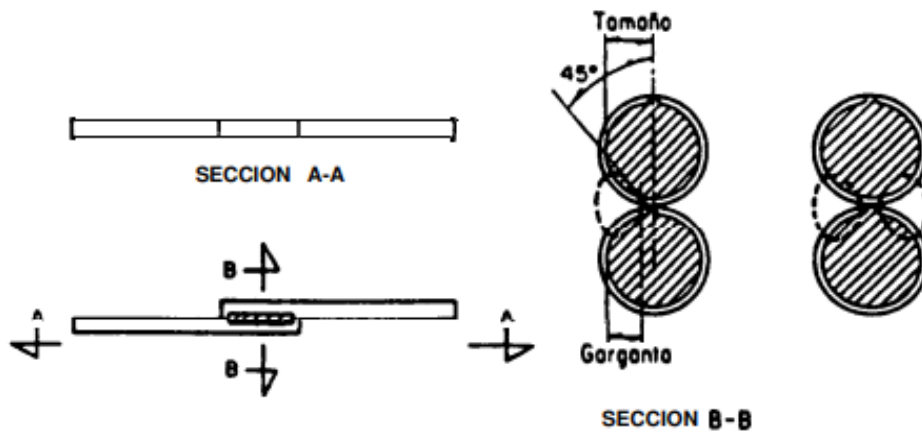


Figura 7. Soldadura de filete por medio de traslape [2].

Al utilizar un material adicional para realizar la soldadura traslapada como se indica en la figura 8, el material auxiliar deberá presentar una resistencia igual o mayor que las varillas que se están empalmando. Para unir varillas mediante este procedimiento, es recomendable la utilización de otra varilla o un par de varillas, una placa o un ángulo [26].

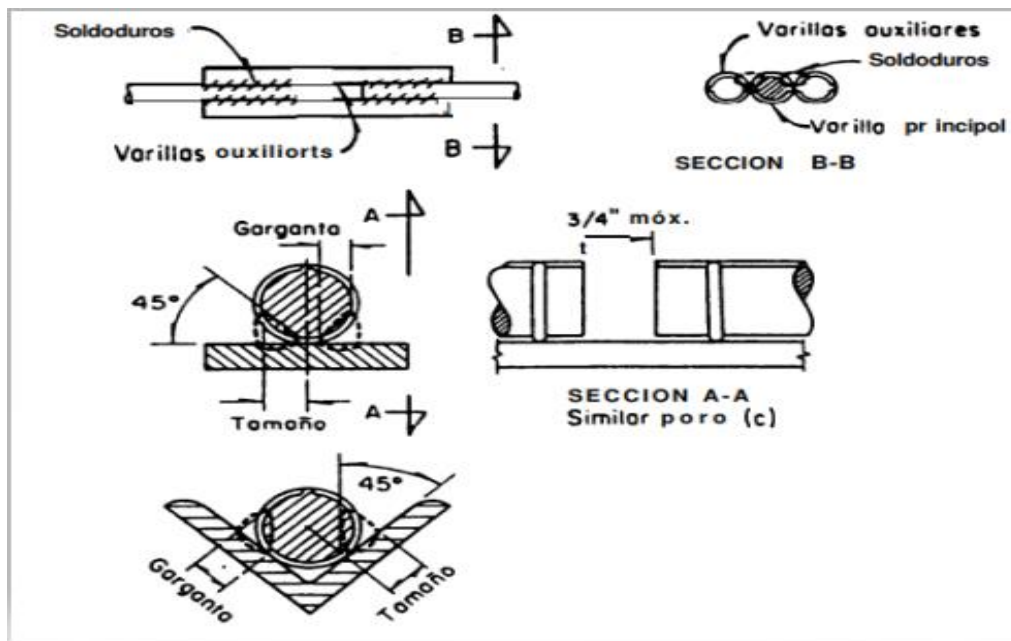


Figura 8. Soldadura de filetes indirectas [2].

Para las juntas excéntricas que han sido soldadas por un solo borde, se debe prevenir su uso de ser posible y dependiendo lo que se requiera su utilización deberá ser tomado en cuenta en su diseño la característica desfavorable de la excentricidad. Su uso está totalmente prohibido en estructuras en las cuales la falla por fatiga este presente.

Si se desea empalmar dos varillas de diámetros iguales mediante la utilización de uniones mostradas en la figura 8, el tamaño nominal de la soldabilidad quedará definido por el radio de la varilla, sin embargo, si el diámetro de las varillas a ser soldadas es diferente, el tamaño nominal de la soldadura estará representado por el radio de la varilla menor.

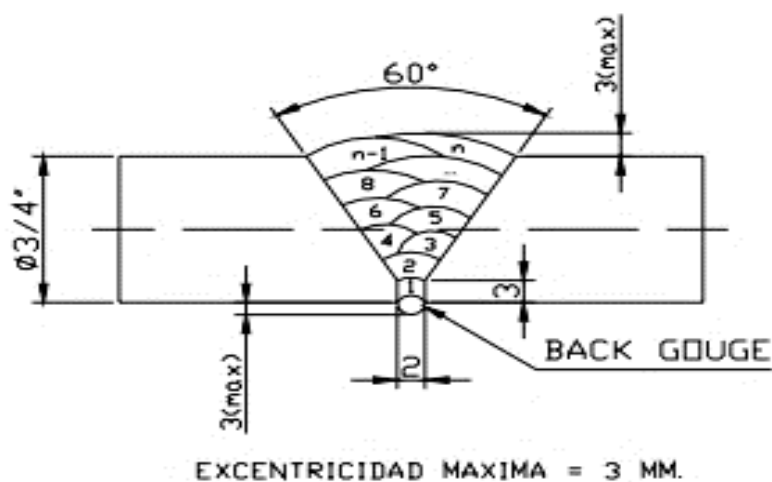
Para cualquiera de los procedimientos mencionados anteriormente la dimensión efectiva de la garganta del filete de soldadura será mayor o igual que  $\frac{3}{4}$  del tamaño nominal.

## 1.7 Detalles de juntas soldadas

Conocer el procedimiento para realizar un cordón de soldadura es muy importante, pues de ello dependerá la seguridad, durabilidad y resistencia de la estructura, por ello se detalla a continuación los detalles a tomar en cuenta para soldar de manera correcta juntas a tope y traslapadas.

### 1.7.1 Detalles para soldadura a tope

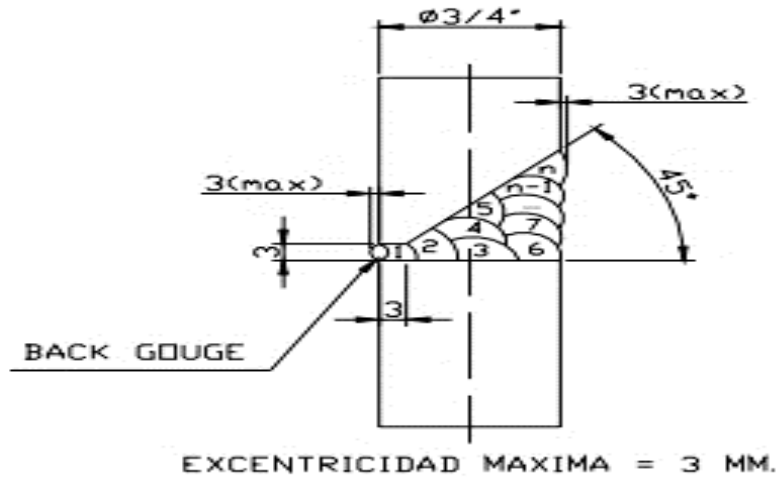
Cada tipo de unión tiene una serie de pros y contras que el diseñador debe tener en cuenta, ya que la calidad final de la soldadura depende no solo de la destreza y habilidad del operario, sino también del tipo de unión que se va a realizar. Para la soldadura horizontal en posición 1G se debe formar en lo posible un ángulo de  $60^\circ$  entre los elementos que se desea soldar como se indica en la figura 9. Posteriormente se deposita el material de aporte por capas alcanzando una excentricidad máxima de 3 mm [11].



**Figura 9.** Detalle geométrico para soldadura en posición 1G [2].



La figura 10 muestra la soldadura vertical en posición 3G, en ella es importante formar un ángulo de  $45^\circ$  entre los elementos que van a ser soldados, el material de aporte se debe aplicar por capas y la excentricidad máxima permitida será de 3 mm.

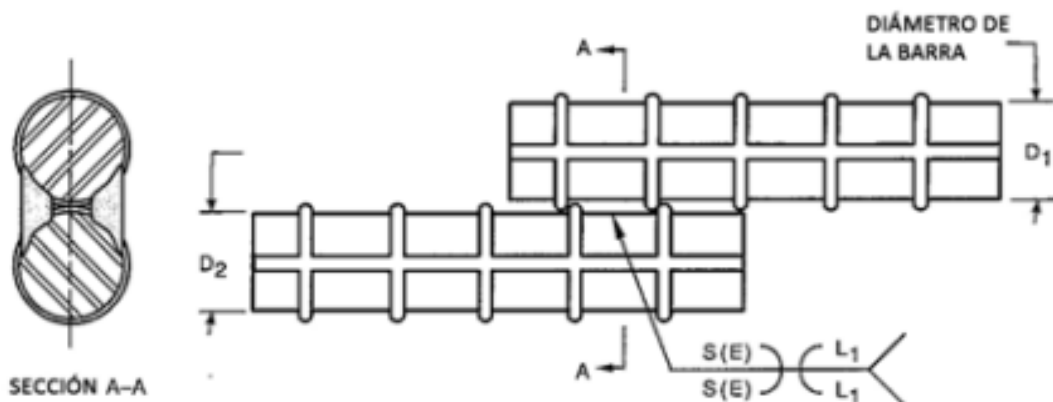


**Figura 10.** Detalle geométrico para soldadura en posición 3G [2].

### 1.7.2 Detalle para soldadura traslapada

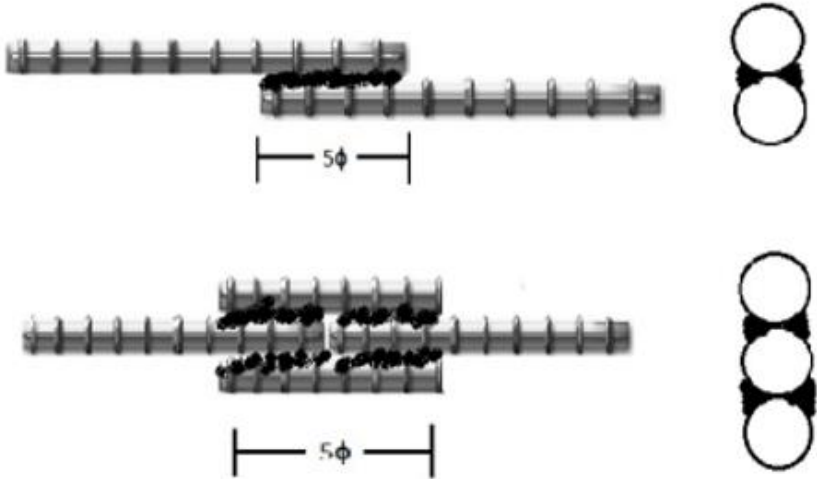
La longitud utilizada para este ensayo y que está recomendada por las normas europeas y avalado por el Comité Europeo del Hormigón, donde se muestra a continuación.

La figura 11 muestra cual es la manera adecuada de traslapar barras en contacto cuando se deposita el material de aporte por ambos lados del traslape.



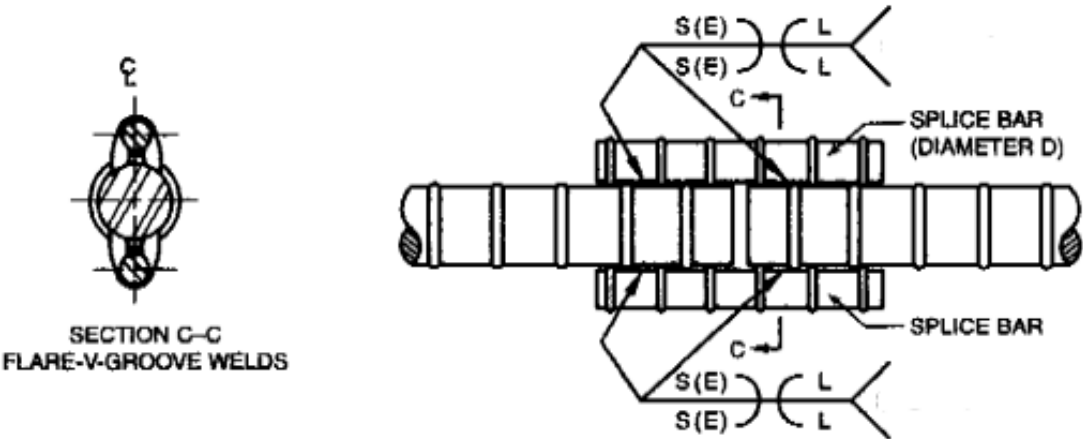
**Figura 11.** Empalme con barras en contacto [2].

Los detalles que se muestra en la figura 12 se deben considerar cuando el material de aporte va a ser depositado por ambos lados de la junta, al considerar un traslape de longitud igual a 5 diámetros, se asegura un agarre adecuado en la soldadura y que no altere las propiedades del material.



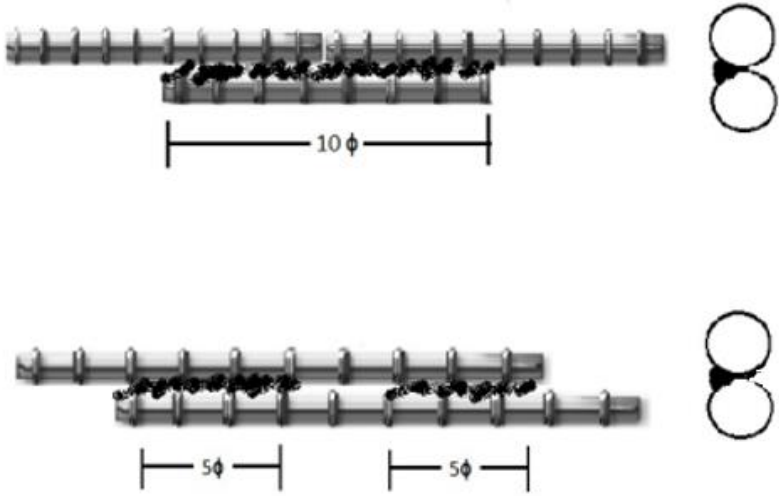
**Figura 12.** Longitud de empalme para soldadura por ambos lados [2].

La figura 13 detalla la soldadura por traslape mediante la utilización de un componente auxiliar. Es recomendable la utilización de un material con una resistencia igual o mayor al del material base, lo recomendable es utilizar un pedazo del mismo material que se está soldando.



**Figura 13.** Empalme con material adicional [2].

Cuando el procedimiento realizado dificulta depositar el material de aporte por ambos lados de la junta. Como en la figura 14, la longitud de traslape deber ser aumentada, a una medida igual a 10 diámetros.



**Figura 14.** Longitud de empalme para soldadura traslapada [2].

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA**

En este capítulo se detalla como iniciar con el proceso de soldadura de los aceros de media y baja aleación microaleadas y termotratadas usando como referencia la norma NTE-INEN 2167 [2] y el código AWS D1.4 [1] los cuales serán utilizados para el desarrollo de probetas, ensayos, parámetros de validación, procesos importantes antes y después de la soldadura y la calificación final del procedimiento [27].

Para realizar el diagnóstico de soldabilidad de un material es importante conocer su composición y como este actúa ante un proceso de soldadura, para ello se realizará un estudio de la metalografía del material antes y después de ejecutar el proceso de soldadura, además los ensayos que dicta la norma utilizada permitirá conocer si se cumplen los parámetros establecidos para resistencia última, módulo de elasticidad, fluencia, entre otros.

#### **2.1 Procedimiento para la ejecución de soldadura**

Para efectuar este estudio experimental se realizarán probetas de soldadura con las varillas de acero corrugado ASTM A706 [3].

#### **2.2 Especificaciones del proceso de soldadura**

La inspección de los elementos que intervienen en la soldabilidad es muy importante, para conseguir resultados óptimos en los ensayos de un material y generalmente para la correcta ejecución del proceso, por ello se detallará los materiales y el procedimiento empleado para la obtención de las probetas utilizadas en el estudio experimental.

##### **2.2.1 *Material base***

En la sección 1.3 del código AWS D1.4[1] se enumera los materiales de acero de refuerzo, y detalla los requisitos que deben cumplir de acuerdo con la delimitación de ASTM para materiales soldables. En el numeral 9 de la misma sección se encuentra el acero ASTM A706/A706 [3] el mismo se describe como un acero de baja aleación.

El porcentaje de carbono es muy importante para fijar la soldabilidad de un material pues a medida que su porcentaje crece, la dureza y la resistencia a la tracción del material también aumentará por ello es importante conocer estos detalles acerca del material base.

A diferencia de otras barras de acero utilizadas bajo este código para el material ASTM A706 [3] el porcentaje de carbono equivalente se calcula utilizando la ecuación 1 [28].

$$C.E. = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cu}{40} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} - \frac{\%Mo}{50} - \frac{\%V}{10} \quad (1)$$

Donde:

C.E: Carbono equivalente, [%]

V: Vanadio, [%]

Ni: Níquel, [%]

Mo: Molibdeno, [%]

C: %Carbono, [%]

Cr: Cromo, [%]

Mn: Manganeso, [%]

Cu: Cobre, [%]

El porcentaje químico y los esfuerzos permisibles del material base están en la norma INEN para las varillas al carbono tanto laminadas, soldables, microaleadas o termotratadas, para hormigón armado [2].

### **2.2.2 Material de aporte**

Este es quizás uno de los factores críticos en la soldabilidad, puesto que los soldadores sin experiencia utilizan un electrodo E6011 [1] comercializado comúnmente para trabajos de soldadura, sin embargo, la selección arbitraria del material de aporte puede traer problemas posteriores, pues su elección se debe realizar de acuerdo con el material base que se va a trabajar. La tabla 4 indica los requerimientos del material base establecidos por el código AWS D1.4 [1] para el acero ASTM A706 grado 42.

**Tabla 4.** Requerimientos de metal de aporte para acero ASTM A706 [2].

REQUERIMIENTO DE METAL DE APORTE CORRESPONDIENTES			
Especificaciones del acero	Proceso de Soldadura	Especificación	Clasificación de electrodos
		del electrodo AWS AS	
ASTM A706	SMAW	A5.5/A5.5M	E8015-X; E8016-X; E8018-X
Grado 60	GMAW	A5.28/A5.28M	ER80S-XXX; E80C-XXX
ASTM A706	FCAW	A5.29/A5.29M	E8XTX-X; E8XTX-XC; E8XTX-XM
Grado 42			

El diseño de la junta que se va a realizar es muy importante para seleccionar un electrodo. El código AWS D1.4 señala que se podrá utilizar un electrodo con un nivel de resistencia igual o mayor que la del electrodo establecido, para alcanzar la tensión admisible en la soldadura de filete. Se presenta en el anexo 11 la composición química y las características mecánicas del electrodo E8018-C1 [1] asignado para ser utilizado como material de aporte para el acero ASTM A706 [3], La composición química y las características mecánicas del electrodo E7018-RH [1] a ser utilizado como reemplazo del material de aporte establecido son mostradas en el anexo 12.

Al comparar el electrodo E8018-C1 [1] asignado para soldar el material ASTM A706 [3] grado 42 y el electrodo a ser utilizado E7018-RH [1]. Se observa que el electrodo E7018-RH presenta una resistencia a la tracción más baja que la del electrodo asignado.

En vista que el electrodo establecido en el código AWS D1.4 para soldar aceros ASTM A706 es un electrodo especial que se consigue únicamente bajo pedido y la resistencia del electrodo E7018-RH no difiere significativamente del anterior. Se utilizará este último para la soldabilidad del acero en este estudio

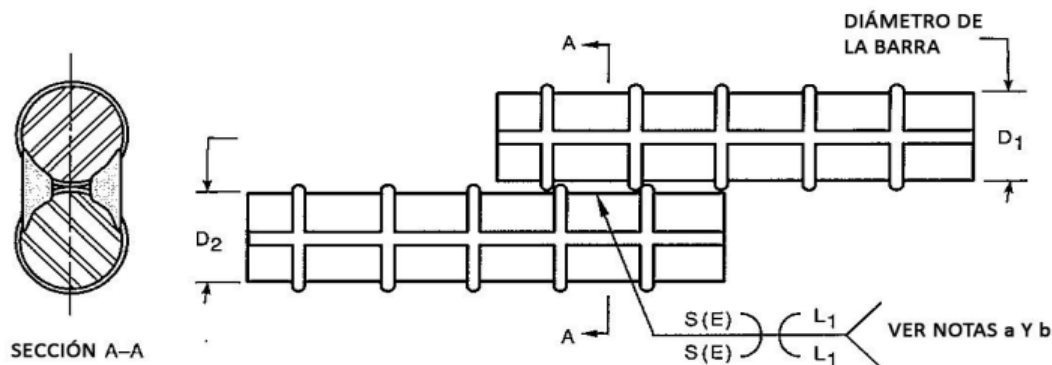
### 2.2.3 *Diseño de la junta*

El código AWS D1.4 [1] implanta que las barras de acero corrugado pueden ser soldadas mediante dos tipos de juntas las cuales fueron mencionadas en el numeral 1.6.

Se ha decidido utilizar la soldadura traslapada directa con barras en contacto, debido al diámetro utilizado para la realización de las probetas, pues este tipo de junta es recomendable cuando se

trabaja con diámetros pequeños. Para llevar a cabo este diseño, la figura 15 ejemplifica la colocación de las varillas de acero de manera que sus ejes queden paralelos. se procede a depositar el material de aporte creando un cordón de ranura en V a los dos lados de la junta.

Una vez que se haya soldado por un lado de la junta, se debe esperar que este se enfríe naturalmente para depositar el material de aporte en la otra zona del traslape. Esto evitará que el área afectada por la soldadura sufra un sobrecalentamiento provocando así que el material depositado pierda resistencia.



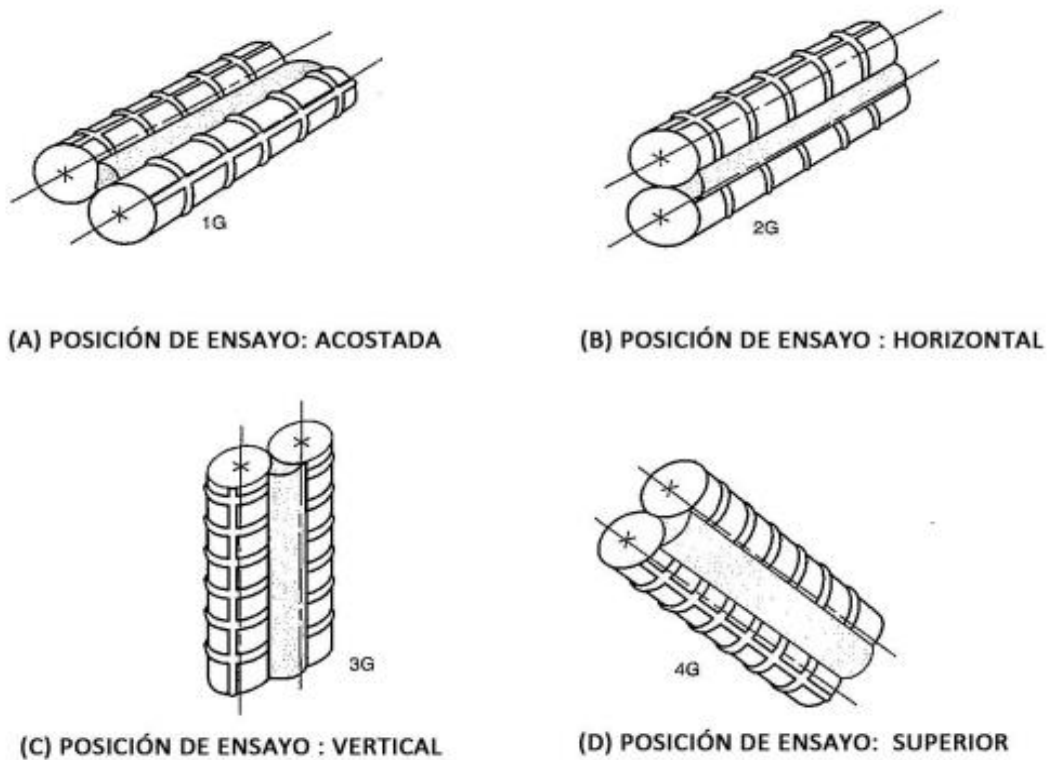
**Figura 15.** Traslape directo con barras en contacto [2].

#### 2.2.4 Posición de soldadura

Para la unión de barras de acero corrugado por soldadura de traslape directa, el código AWS D1.4 [1] señala 4 posiciones indicadas en la figura 16. La posición utilizada dependerá de la persona experta encargada de llevar a cabo el proceso, siempre tomando en cuenta la comodidad del soldador, pues una posición inadecuada puede generar cansancio causando por movimientos no coordinados por parte del soldador, que pueden llevar a que se pierda la precisión y regularidad del arco eléctrico y con ello dar origen a un cordón de soldadura irregular lo que se convierte en un peligro para su utilización [29].

La unión de las barras de acero para la creación de probetas en este estudio se ha logrado mediante la posición de ensayo acostada 1G. Se utilizó una posición plana sobremesa para conseguir una correcta manipulación del electrodo al depositar el material de aporte sobre la probeta, pues es recomendable mantener en lo posible un ángulo de  $60^\circ$  con respecto al plano de soldadura. Esto garantiza el correcto desplazamiento del electrodo a lo largo del área a soldar

evitando así soldar por encima de cúmulos que se han formado por la escoria depositada al momento de ejecutar la operación de soldadura.



**Figura 16.** Posiciones de soldadura [30].

### 2.3 Ensayos para evaluar la soldabilidad del acero

El personal encargado de diseñar y proyectar una estructura metálica, herramienta o máquina se encarga también de definir las propiedades y características que debe poseer el material que constituye aquella estructura.

Dado que existe una gran cantidad de tipos de acero y por tanto sus propiedades difieren de un acero a otro, se realizan una serie de pruebas mecánicas para comprobar sus propiedades como la dureza, la resistencia a diversos esfuerzos que se le apliquen, el nivel de acabado que se obtuvo durante el proceso, la aparición de fisuras en la geometría del material y otros defectos que pueden aparecer durante la ejecución del proceso de soldadura. Lo que puede derivarse en afecciones al material como cortes, fracturas, entre otros.



### 2.3.1 Ensayo resistencia a la tracción

Este ensayo tiene la finalidad de medir la fuerza y amplitud de la probeta mediante la aplicación de un esfuerzo axial hasta que esta llegue a romperse, para ello se debe aplicar una velocidad de deformación muy baja, así los resultados no se verán afectados.

Se utiliza para determinar características como la resistencia a la tracción, las propiedades de endurecimiento, la ductilidad, límite elástico, entre otros. De esta manera el ensayo de tracción proporciona información detallada sobre las características mecánicas del material pues es una de las pruebas que mejores resultados arrojan acerca del comportamiento de los metales [30].

#### 2.3.1.1 Probetas utilizadas en tracción

En el ensayo de tracción se utilizaron 6 probetas por cada fabricante Adelca, Andec y Novacero. La norma NTE INEN ISO 6892-1 establece el uso de al menos 3 probetas, sin embargo, se aumentó el número de probetas con el objetivo de disminuir el margen de error. La figura 17 indica las probetas soldadas en base a la normativa europea en cuanto a la longitud del traslape. Es importante mencionar que estos reglamentos están avalados por el Comité Europeo del Hormigón cuando se trabaja con materiales para refuerzo como el caso de las barras de acero corrugado ATM A706 [5].



**Figura 17.** Barras en contacto soldadas por traslape directo.

Como se señala en la figura 18, se aplicó el ensayo para 5 probetas del material base sin soldar por cada fabricante, el número de probetas se aumentó de 3 como establece la norma NTE

INEN ISO 6892-1 a 5 probetas, para reducir el margen de error. Estas tienen una distancia total igual al de las probetas de material soldado.



**Figura 18.** Material base sin aplicación de soldadura.

Estas probetas fueron utilizadas con el fin de conocer la variación de las características mecánicas del material antes y después de cumplir con la soldabilidad, para posteriormente realizar un análisis comparativo y observar cómo influye este proceso en sus propiedades.

### ***2.3.1.2 Equipo ensayo de tracción***

La máquina universal de ensayos que se muestra en la figura 19, pertenece al laboratorio de materiales de la UPS y se utilizó para ejecutar los diferentes ensayos en las varillas de acero.



**Figura 19.** Máquina test resources

Una carga de tracción 150 N fue aplicada sobre las probetas a una velocidad de avance de 5 mm/min, especificando un diámetro de las probetas igual a 12 mm, en base con lo establecido por la norma NTE INEN ISO 6892-1 [5].

Durante la aplicación de este ensayo la máquina de ensayos universal test resources proporciona valores tales como resistencia última, resistencia máxima, carga máxima a la rotura, entre otros.

### **2.3.1.3 Procedimiento ensayo de tracción**

Mediante los datos de fuerza y estiramiento de la probeta, se puede trazar la gráfica “carga vs posición”. Otro dato importante se lo puede obtener luego de haber concluido el ensayo, midiendo la longitud final que alcanzó la probeta y comparándola con la longitud inicial, para conseguir la elongación, misma que se puede calcular mediante la ecuación 2 [28].

$$El = L_f - L_0 \quad (2)$$

Donde:

El: Elongación, [mm]

L<sub>0</sub>: Longitud inicial de probeta, [mm]

L<sub>f</sub>: Longitud final de probeta, [mm]

La medida original de la sección transversal es comparada con el valor final de la sección transversal mediante la ecuación 3 [28], obteniéndose como resultado la reducción del área.

$$Ar = \frac{A_o - A_f}{A_o} \quad (3)$$

Donde:

A<sub>r</sub>: Reducción de área, [mm<sup>2</sup>]

A<sub>0</sub>: Área inicial, [mm<sup>2</sup>]

A<sub>f</sub>: Área final, [mm<sup>2</sup>]

La tensión, también conocida como esfuerzo de ingeniería se obtiene dividiendo la fuerza ejercida entre la sección transversal original mediante la ecuación 4 [28].

$$\sigma_e = \frac{F}{A_0} \quad (4)$$

Donde:

$\sigma_e$ : Esfuerzo de tensión, [MPa]

F: Carga aplicada, [N]

$A_0$ : Área inicial, [mm<sup>2</sup>]

El alargamiento o deformación unitaria es la cantidad en la que ha aumentado la longitud de la muestra, es decir, si la longitud original es  $L_0$  y en un punto cualquiera de la prueba es  $L$ , la unidad de elongación o deformación será calculada mediante la ecuación 5 [28].

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (5)$$

Donde:

$e$ : Alargamiento o deformación unitaria, [mm]

L: Longitud original de la probeta, [mm]

$L_0$ : Longitud en un tiempo determinado, [mm]

Tomando como base el ensayo de tracción, se construye el diagrama “Esfuerzo vs Deformación” que se indica en la figura 20 la cual se desarrolla los siguientes cálculos.

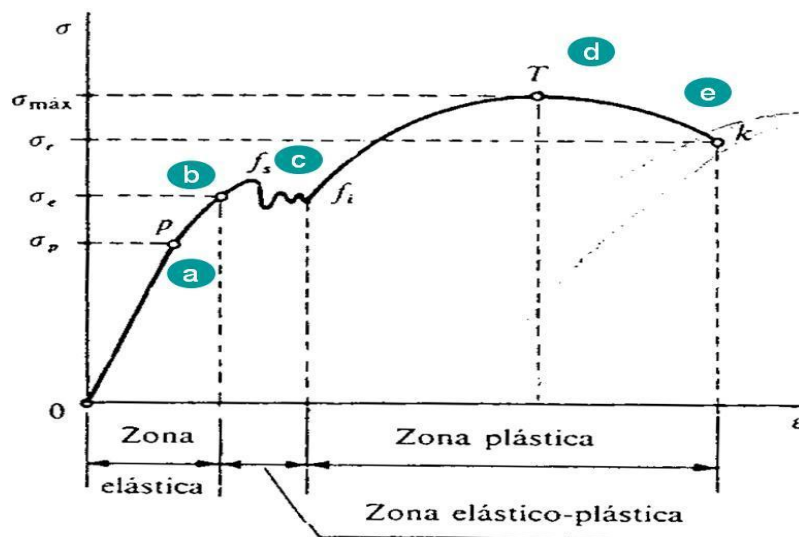


Figura 20. Diagrama de Esfuerzo vs Deformación [30].

#### 2.3.1.4 Zona elástica

Existe un área en el diagrama esfuerzo vs deformación donde el vínculo entre la deformación y la tensión es lineal, pues se crea correspondencia con la deformación adquirida por el material y la tensión aplicada [31].

Solamente en esta área del ensayo se cumple con la ley de Hooke, pues se aplica esta ley únicamente para el límite elástico.

Mediante la ecuación 6 [28] podemos calcular el esfuerzo en la zona elástica del material, dada por la multiplicación entre el módulo de Young, y la deformación unitaria [31].

$$\sigma_e = E \cdot e \quad (6)$$

Donde:

$e$ : Alargamiento o deformación unitaria, [mm]

$\sigma_e$ : Esfuerzo zona elástica, [MPa]

$E$ : Módulo de Young, [Pa]

#### 2.3.1.5 Zona plástica

En esta área del diagrama, los alargamientos producidos son irreversibles. La curvatura en esta región presenta una pendiente menor que en la zona elástica, porque no se necesita gran aumento de carga para conseguir grandes alargamientos.

Esta fuerza o carga máxima aplicada para conseguir el alargamiento, dividida entre el área original de la muestra da origen a la resistencia del metal, y se puede calcular mediante la ecuación 7 [31].

$$\sigma_R = T_S = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_o} \quad (7)$$

Donde:

$\sigma_R$ : Resistencia a la tracción, [MPa]

$T_s$ : Resistencia a la tracción, [MPa]

$A_0$ : Área inicial, [mm<sup>2</sup>]

$F_{m\acute{a}x}$ : Carga máxima, [N]

### ***2.3.1.6 Zona de estricción***

Desde el punto denominado esfuerzo último, la deformación se encuentra dentro de cierta parte de la muestra y no a lo largo de toda su longitud. Debido a esto se genera una estricción en dicha zona a la par que la muestra se alarga cada vez más, esto ocasiona que la tensión disminuya y la muestra se termine fragmentando en la zona de ruptura.

### ***2.3.2 Ensayo Metalográfico***

El objetivo de este ensayo es observar a detalle la superficie de una probeta, para observar la alteración en la microestructura en relación con la del metal base ASTM A706 [3] debido a la aplicación de calor producto del proceso de soldadura. [32].

#### ***2.3.2.1 Probetas utilizadas en el ensayo metalográfico***

Se ha utilizado para este ensayo una probeta del material base sin soldar por cada fabricante de varilla ASTM A706 Adelca, Andec y Novacero. De la misma manera 1 probeta soldada por cada fabricante a la cual se le ha realizado un corte en el área afectada por la soldadura de manera que se pueda observar los cambios presentes en la superficie

#### ***2.3.2.2 Procedimiento ensayo metalográfico***

La preparación del material para llevar a cabo este proceso consiste en varias etapas. Empezando por la preparación de las probetas, estas fueron utilizadas en posición vertical para observar la microestructura antes y después del proceso de soldadura en la superficie de corte.

#### ***2.3.2.3 Montaje por compresión***

El montaje por compresión es un proceso que consiste en encapsular la probeta de ensayo mediante la utilización de un compuesto termoestable fenólico (PhenoCure) el cual por medio de la presión y el calor ejercido por la máquina encapsuladora representada en la figura 21 del laboratorio de metalografía de la UPS SimpliMet 4000. La presión y temperatura ejercidas dependerán del compuesto fenólico que se utilice durante el proceso, puesto que estos parámetros que se ingresan en la máquina encapsuladora son establecidos por el fabricante del producto.

De esta manera se consigue una mejor manipulación de la probeta, además que los montajes con dimensiones estandarizadas permiten la utilización de máquinas semiautomáticas para realizar el pulido de la probeta y posterior análisis metalográfico.



**Figura 21.** Máquina encapsuladora SimpliMet 4000 [33].

#### **2.3.2.4 Desbaste**

El proceso de desbaste del material consiste en lijar la superficie de la probeta a ser analizada, de manera que las marcas presentes en la superficie desaparezcan totalmente. Esto se consigue mediante la utilización de abrasivos también conocidos como papel de lija. Para conseguir un acabado superficial sobresaliente en la probeta, es importante mantener una presión y giro constante del material sobre el papel de lija, por ello se ha utilizado la pulidora semiautomática EcoMet 30 del laboratorio de metalografía de la UPS mostrada en la figura 22. Las probetas encapsuladas durante el montaje por compresión tienen un diámetro de 25 mm que encaja perfectamente en esta máquina. Durante la ejecución de este proceso se han utilizado para el desbaste grueso papel lija de número 400, 600 y 800 y para el desbaste fino papel lija número 1200.



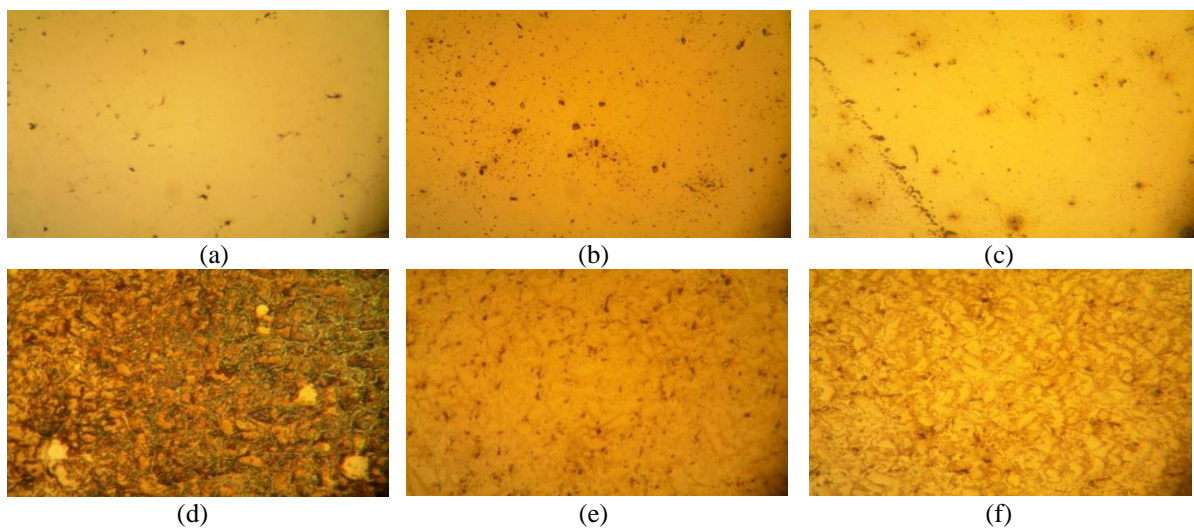
**Figura 22.** Pulidora semiautomática EcoMet 30 [33].

### 2.3.2.5 Pulido

La probeta de análisis debe presentar un buen acabado superficial (tipo espejo) para ello se ha utilizado un abrasivo fino denominado alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), este abrasivo se ha utilizado en conjunto con un paño colocado en una máquina rotatoria, de manera que ejerciendo una presión constante entre la probeta y el paño colocado en el disco de la máquina rotatoria se logre el acabado superficial deseado.

### 2.3.2.6 Análisis de la microestructura.

Una vez realizado el procedimiento, se observa las características de la microestructura del material, tales como el tamaño de grano, red cristalina del material, fallas en la junta soldada, entre otros como se muestra en la figura 23. Para esto es importante la utilización de una máquina que amplie la imagen del área de estudio como es el microscopio.



**Figura 23.** Metalografía Material base (a) Novacero, (b) Andec, (c) Adelca.  
Metalografía Soldadura(d) Novacero, (e) Andec y (f) Adelca.

### 2.3.2.7 Ataque químico

Consiste en colocar un agente químico en la superficie trabajada, de manera que al realizar este proceso se mejore el contraste, pues se crea una fina película que no permite que el área atacada refleje perfectamente la luz y de esta manera poder observar de manera más precisa la microestructura. Existe un tipo de agente químico para cada tipo de material dependiendo de sus características, por ello es muy importante conocer que agente químico a utilizar, pues si este no es el adecuado, no se podrá observar de manera clara las características de la microestructura.



### 2.3.3 Ensayo de dureza

Un material al ser rayado se determina mediante un ensayo de dureza. También se utiliza como método para determinar el esfuerzo de tracción final en el área bajo prueba. En los aceros aleados, una dureza alta puede indicar la presencia de martensita en la región de la soldadura afectada por el calor, mientras que una dureza baja puede indicar una calidad de sobre templado [34].

#### 2.3.3.1 Probetas utilizadas en el ensayo de dureza

En este ensayo fueron utilizadas 5 probetas de material base por cada fabricante, la norma NTE INEN-ISO 6508-1 recomienda el uso de al menos 3 probetas, sin embargo, se aumentó el número de probetas para reducir el margen de error. Se ha realizado cortes a lo largo de la varilla de acero con una longitud aproximada de 20 mm por cada probeta como muestra en la figura 24. Una vez realizado el corte es necesario desbastar las superficies de manera que estas queden completamente planas, pues de lo contrario la luz emitida por la máquina de ensayo puede fugarse ocasionando la obtención de resultados erróneos.



**Figura 24.** Probetas para ensayo de dureza.

Las probetas soldadas de los tres fabricantes fueron utilizadas para la aplicación del ensayo de dureza para lo cual se realizó un corte en el área de soldadura teniendo precaución de no ocasionar calor excesivo al momento del corte y de esta manera ocasionar cambios en la estructura del material.

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS

En el siguiente capítulo se expone los ensayos realizados conseguidos a partir de los ensayos mecánicos practicados en las probetas de tres fabricantes Adelca, Andec y Novacero antes y después de la soldadura, además se realiza un análisis comparativo entre los fabricantes mencionados y como se relaciona con las propiedades químicas y mecánicas del acero corrugado para uso estructural ASTM A706.

#### 3.1 Resultados ensayo de espectrometría

La superficie de las probetas analizadas de los tres fabricantes debe estar completamente limpias al ser colocadas en la máquina, para obtener un resultado óptimo de la composición química del material mismo que viene representado por medio del porcentaje presente de cada elemento.

Para llevar a cabo el ensayo de espectrometría, la revista mexicana de física 58 [35] recomienda al menos 3 quemas en la superficie de análisis, de esta manera se obtendrá conjuntos de datos distintos lo que permitirá la obtención de resultados con un menor margen de error durante el análisis. Por ello para este estudio se han realizado 5 quemas para cada fabricante del material, cuyos resultados se muestran en los anexos 1 al 4, posteriormente se realizó un valor promedio de los componentes químicos. El resultado obtenido se detalla seguidamente en la tabla 5 [36].

**Tabla 5.** Promedio de elementos químicos de los tres fabricantes

<b>Elemento (Promedio)</b>	<b>% Adelca</b>	<b>% Andec</b>	<b>% Novacero</b>
C	0.28	0.27	0.30
Mn	1.35	1.37	1.32
Cu	0.06	0.06	0.24
Ni	0.03	0.03	0.08
Cr	0.07	0.07	0.18
Mo	0.06	0.06	0.01
V	0.001	0.005	0.01

El porcentaje máximo de carbono, manganeso, fósforo, azufre, silicio para las varillas de acero corrugado termotratadas y microaleadas ASTM A706 [3] está establecido por la norma INEN 2167 [2]. Se debe cumplir con el porcentaje de carbono equivalente dado por la norma NTE INEN 2167 la cual establece un porcentaje máximo de CE igual a 0.55 %. Para el cálculo se ha utilizado la ecuación 1.

$$C.E. = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cu}{40} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} - \frac{\%Mo}{50} - \frac{\%V}{10}$$

- **Adelca:**

$$C.E. = 0.286 + \frac{1.35}{6} + \frac{0.0637}{40} + \frac{0.0390}{20} + \frac{0.0730}{10} - \frac{0.0061}{50} - \frac{0.0011}{10}$$

$$C.E. = 0.286 + 0.225 + 0.0015925 + 0.00195 + 0.0073 - 0.000122 - 0.00011$$

$$C.E. = 0.52$$

- **Andec:**

$$C.E. = 0.275 + \frac{1.37}{6} + \frac{0.0651}{40} + \frac{0.0388}{20} + \frac{0.0736}{10} - \frac{0.0060}{50} - \frac{0.0005}{10}$$

$$C.E. = 0.275 + 0.228 + 0.0016275 + 0.00194 + 0.00736 - 0.00012 - 0.033689$$

$$C.E. = 0.48$$

- **Novacero:**

$$C.E. = 0.300 + \frac{1.32}{6} + \frac{0.249}{40} + \frac{0.0845}{20} + \frac{0.187}{10} - \frac{0.0122}{50} - \frac{0.0163}{10}$$

$$C.E. = 0.300 + 0.22 + 0.006225 + 0.004225 + 0.0187 - 0.000244 - 0.00163$$

$$C.E. = 0.5$$

Para analizar los resultados de los tres fabricantes por medio del carbono equivalente que se realizó en el ensayo de espectrometría, se debe conocer la diferencia entre el carbono equivalente y el contenido de carbono, este último es el principal elemento que determina resistencia y soldabilidad en los aceros. Al tener un aumento en la presencia de carbono, aumenta la tendencia a enfriarse y se decrece la plasticidad, esto ocasiona que se produzcan

grietas en la soldadura. Entonces si contenido de carbono es alto, la soldabilidad del acero es mala. La tabla 6 detalla el contenido de carbono equivalente calculado para los tres fabricantes.

Datos:

**Tabla 6.** Datos de Carbono Equivalente.

<b>Fabricante</b>	<b>Carbono Equivalente</b>
Adelca	0.52
Andec	0.48
Novacero	0.54

Mediante los datos obtenidos, se evalúa que Adelca tiene 0.5216 el cual en la tabla establecida en la norma da que tiene una soldabilidad mala, en Andec tiene 0.4801 el cual está en un rango promedio y por último el fabricante Novacero tiene 0.5472 el cual está en un rango malo, esto se da por el aumento de contenido de carbono al soldar el material de aporte, el cual no tuvo una correcta penetración. El fabricante que destaca es Andec por su contenido de carbono equivalente, el cual se recomienda que es una varilla corrugada de excelente calidad.

### 3.2 Resultados ensayo de tracción

Es un ensayo general utilizado con la finalidad de especificar las características mecánicas de un material de acero, el cual esta normalizado, en este caso se ejecutará el ensayo a una temperatura ambiente bajo la norma INEN 2167.

Las probetas utilizadas para este ensayo cuentan con las características para el diámetro y longitud establecidas en la tabla 7. La distancia de la probeta es de 200 mm, y debe estar distribuida de manera adecuada entre las mordazas de sujeción del equipo.

**Tabla 7.** Ensayo de tracción.

<b>Ensayo de Tracción</b>			
	<b>Diámetro</b>	<b># Probetas soldadas</b>	<b># Probetas material base</b>
Adelca Andec	12. mm	6	5
	12.1 mm	6	5
Novacero	12.2 mm	6	5

Los valores de fuerza y velocidad utilizados para este ensayo se detallan en la tabla 8, y fueron establecidos por la norma NTE INEN ISO 6892-1.

**Tabla 8.** Especificaciones Máquina de Tracción.

<b>Máquina TEST RESOURCES</b>	
<b>Fuerza mínima</b>	50 Klbf
<b>Velocidad</b>	5 mm/min
<b>Dirección</b>	Vertical
<b>Distancia entre mordazas</b>	115 mm
<b>Longitud probeta</b>	200 mm

La separación de agarre es la distancia que existe entre las mordazas de sujeción del modo que se indica en la figura 25, la cual es una distancia fija igual a 115 mm, esta medida se utilizó para el ensayo de probetas soldadas y de material base.



**Figura 25.** Sujeción probeta soldada.

En la norma INEN 2167 se establece los valores mínimos y máximos para las propiedades mecánicas que se debe alcanzar en el ensayo de tracción, para barras de acero ASTM A706 grado 42.

Una vez realizado el ensayo la máquina de ensayos proporciona una gráfica de carga vs posición, en ella no se aprecia algunas propiedades por lo cual es necesario trabajar en los datos que proporciona esta curva como se indica en los anexos 5 al 7, tales como carga máxima, carga

mínima y esfuerzo máximo para convertirla en una gráfica de esfuerzo vs deformación que permita observar cómo es afectada la probeta ensayada.

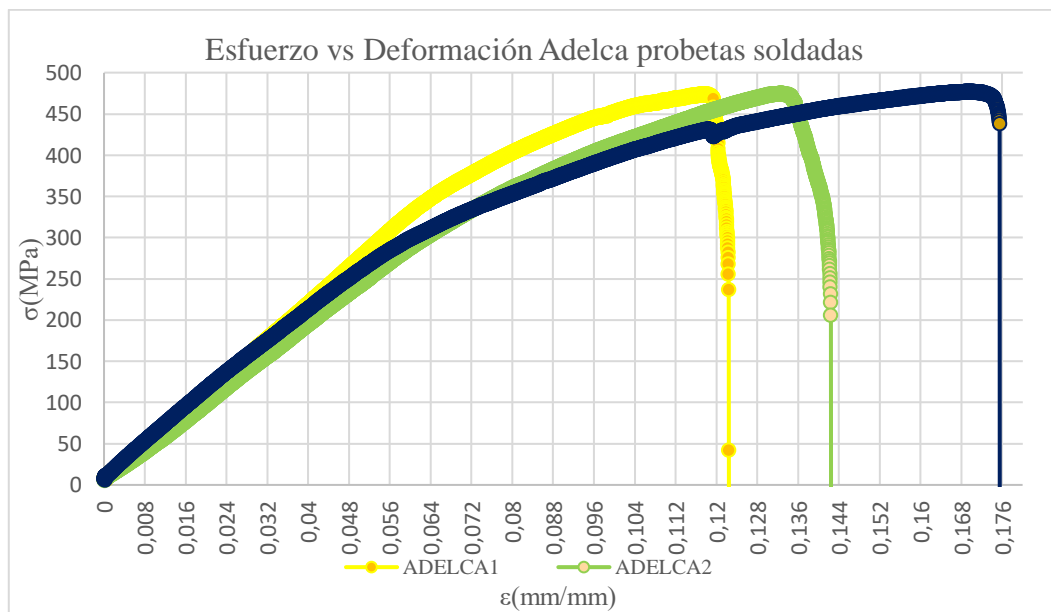
### 3.2.1 Adelca

En la tabla 9 se muestra los límites de fluencia máxima, mínima y tracción para las probetas soldadas.

**Tabla 9.** Promedio probetas Adelca.

ADELCA			
PROBETAS SOLDADAS			
# Probetas	Fluencia máxima MPa	Fluencia mínima MPa	Tracción mínima MPa
1	392.30	391.77	472.06
2	401.01	400.72	473.73
3	430.80	430.68	477.18
<b>Promedio</b>	408.06	407.72	474.32

La gráfica esfuerzo vs deformación que presenta la figura 26 fue realizada en base al ensayo de tracción practicado en las probetas soldadas de Adelca.



**Figura 26.** Esfuerzo vs Deformación Adelca Soldada.

Con los resultados conseguidos mediante la aplicación del ensayo de tracción en las varillas soldadas de Adelca, se aprecia la variación en la fluencia máxima de 392.30 MPa a 430.86 MPa, la variación en la fluencia mínima de 391.77 MPa a 430.68 MPa y la resistencia a la tracción que varía de 472.06 MPa a 477.18 MPa. Estos valores serán comparados con los

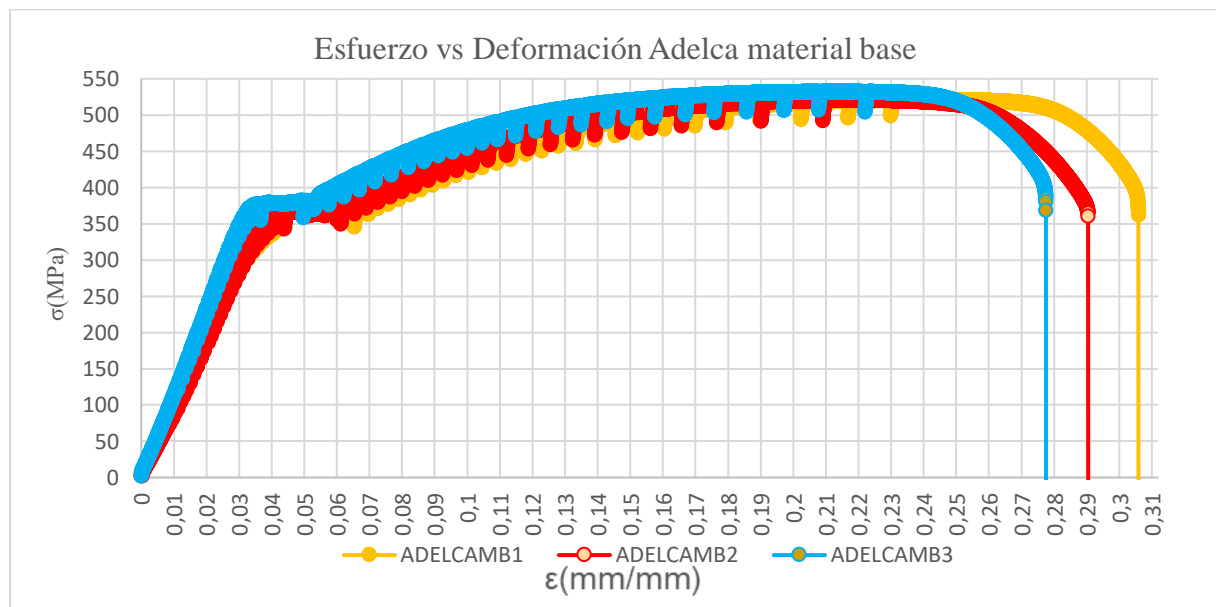
conseguidos en la ejecución del ensayo en el material sin soldar, para observar los cambios en las propiedades mecánicas.

Se utilizaron 5 probetas de material base para el ensayo, sin embargo, existieron valores utópicos que fueron descartados, por ello se indica en la tabla 10 el resultado de 3 probetas las cuales cuentan con valores cercanos a los establecidos en la norma para las varillas de acero corrugado A706 grado 42.

**Tabla 10.** Promedio probetas Andec.

<b>ADELCA</b>			
<b>PROBETAS MATERIAL BASE</b>			
# Probetas	Fluencia máxima Mpa	Fluencia mínima MPa	Tracción mínima MPa
<b>1</b>	364.21	364.19	516.03
<b>2</b>	351.78	351.62	516.81
<b>3</b>	360.31	359.81	529.04
<b>Promedio</b>	358.77	358.54	520.63

La gráfica esfuerzo vs deformación conseguida a partir del ensayo practicado en las probetas sin soldar de Adelca, se presenta en la figura 27.



**Figura 27.** Esfuerzo vs Deformación Adelca Material Base.

Con los resultados conseguidos mediante la aplicación del ensayo de tracción en las varillas sin soldar de Adelca se aprecia la variación en la fluencia máxima de 351.78 MPa a 360.31 MPa,

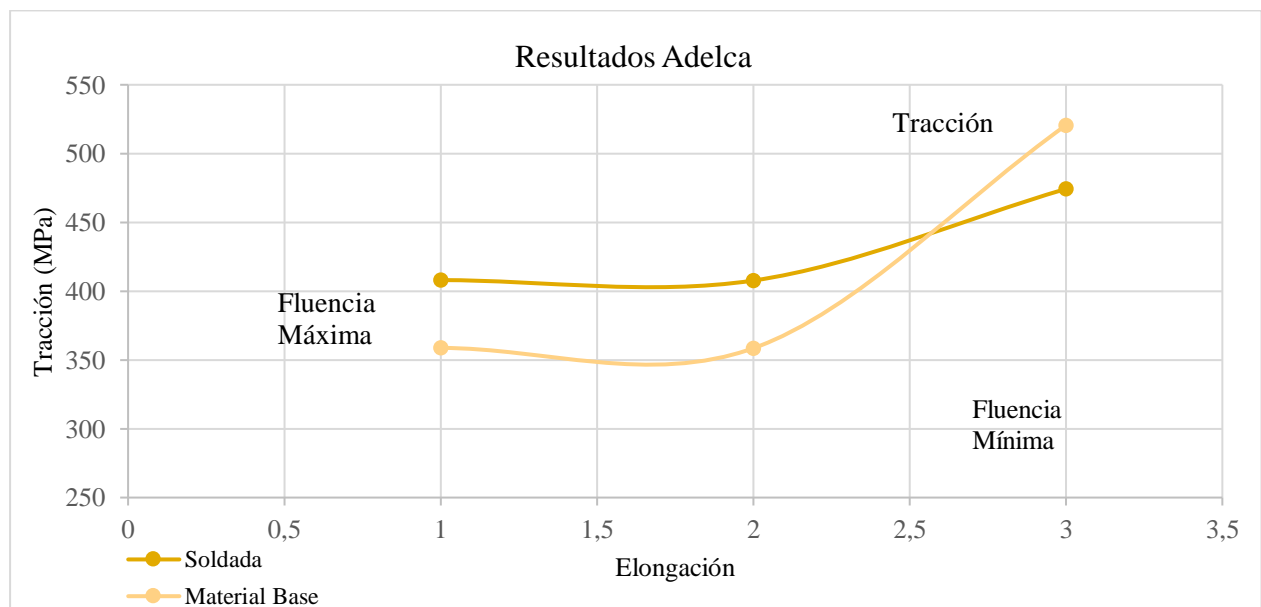
la variación en la fluencia mínima de 351.62 MPa a 364.19 MPa y la resistencia a la tracción que varía de 516.81 MPa a 529.04 MPa. Estos valores serán comparados con los conseguidos en la ejecución del ensayo en el material sin soldadura, para observar la variación en las propiedades mecánicas.

Se obtuvo un valor medio para las propiedades mecánicas de las barras de acero ASTM A706 de Adelca los cuales se presentan en la tabla 11.

**Tabla 11.** Resultados Adelca.

<b>ADELCA</b>			
	<b>Fluencia máxima MPa</b>	<b>Fluencia mínima MPa</b>	<b>Tracción mínima MPa</b>
<b>Soldada</b>	408.06	407.72	474.32
<b>Material Base</b>	358.71	358.54	520.63

La gráfica que se expone en la figura 28, indica como afecta la soldadura en las propiedades mecánicas del material en relación con las varillas de acero de Adelca sin soldar.



**Figura 28.** Resultados probeta Adelca.

En la figura 28 se representa la gráfica obtenida a partir del promedio alcanzado en la resistencia a la tracción, fluencia mínima y fluencia máxima para las probetas soldadas y sin soldar de Adelca. Se observa que el valor de límite de fluencia mínimo y máximo aumenta para las probetas soldadas esto se debe a la presencia de un tamaño de grano fino, cuando el tamaño de grano es pequeño, mayor es el límite de fluencia. La resistencia a la tracción aumenta para el



material sin soldar esto a pesar de la existencia de un tamaño de grano fino en la soldadura lo que indica que existen otros factores que afectan la resistencia a la tracción.

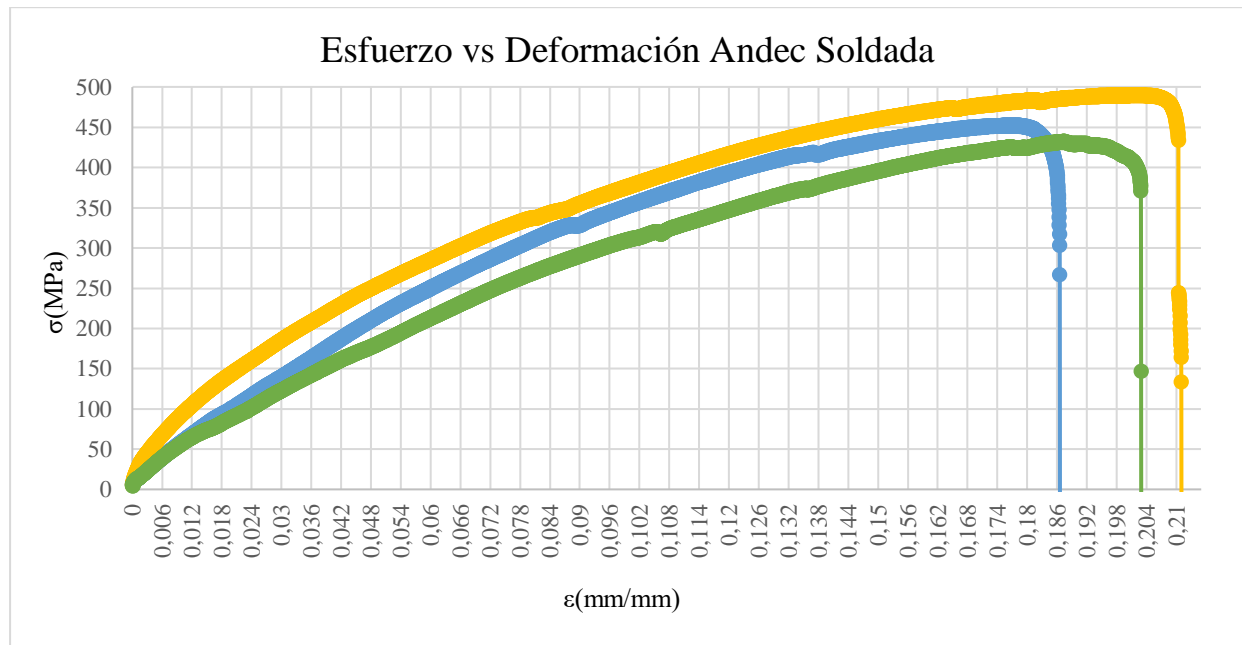
### 3.2.2 Andec

En la tabla 12 se muestra los límites de fluencia máxima, mínima y tracción para las probetas soldadas.

**Tabla 12.** Promedio probetas Andec soldadas.

ANDEC			
PROBETAS SOLDADAS			
Probetas	Fluencia máximo MPa	Fluencia mínimo MPa	Tracción mínima MPa
1	327.98	327.39	451.53
2	333.02	332.52	488.70
3	318.35	318.15	431.00
<b>Promedio</b>	326.45	326.02	457.07

La gráfica esfuerzo vs deformación que presenta la figura 29, fue realizada en base al ensayo de tracción practicado en las probetas soldadas de Andec.



**Figura 29.** Esfuerzo vs Deformación Andec Soldada.

Con los resultados conseguidos mediante la aplicación del ensayo de tracción en las varillas soldadas de Andec, se aprecia la variación en la fluencia máxima de 318.35 MPa a 333.02 MPa,

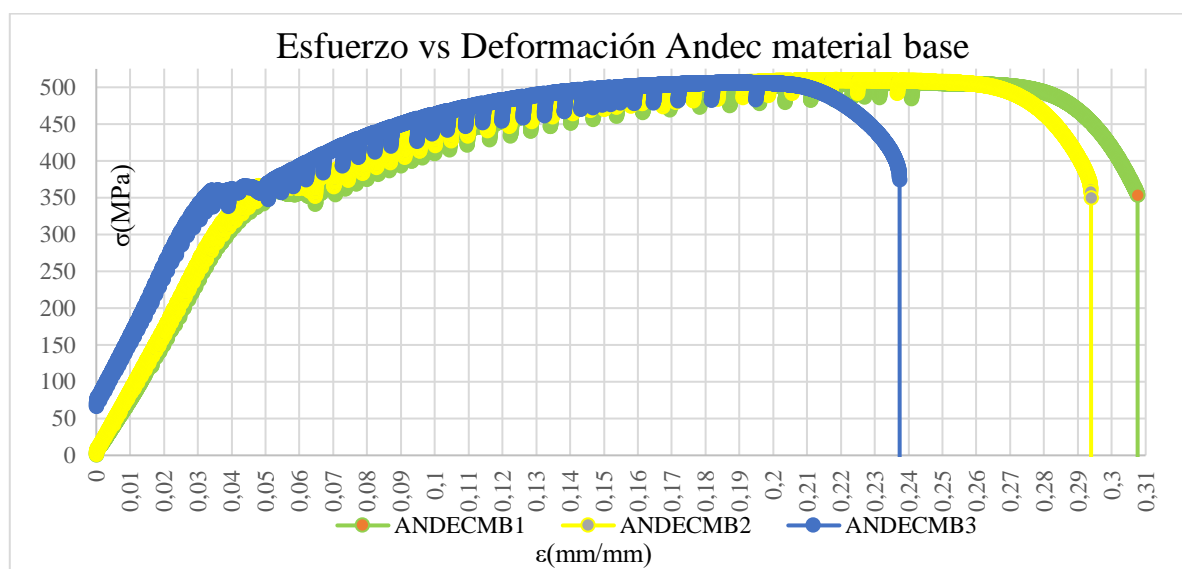
la variación de la fluencia mínima de 318.15 MPa a 332.52 MPa y la resistencia a la tracción que varía de 431.00 MPa a 488.70 MPa. Estos valores serán comparados con los conseguidos en la ejecución del ensayo en el material sin soldar, para observar los cambios en las propiedades mecánicas.

Se utilizaron 5 probetas de material base para el ensayo, sin embargo, existieron valores utópicos que fueron descartados, tomando finalmente el resultado de 3 probetas que se muestran en la tabla 13, las cuales cuentan con valores cercanos a los establecidos en la norma para las varillas de acero corrugado A706 grado 42.

**Tabla 13.** Promedio probetas Adelca material base.

<b>ANDEC</b>			
<b>PROBETAS MATERIAL BASE</b>			
<b>Probetas</b>	<b>Fluencia máxima Mpa</b>	<b>Fluencia mínimo MPa</b>	<b>Tracción mínima MPa</b>
<b>1</b>	359.97	359.67	502.20
<b>2</b>	350.09	349.91	507.18
<b>3</b>	348.45	348.45	504.76
<b>Promedio</b>	352.83	352.67	504.72

La gráfica esfuerzo vs deformación conseguida a partir del ensayo practicado en las probetas sin soldar de Andec, se presenta en la figura 30.



**Figura 30.** Esfuerzo vs Deformación Andec material base.

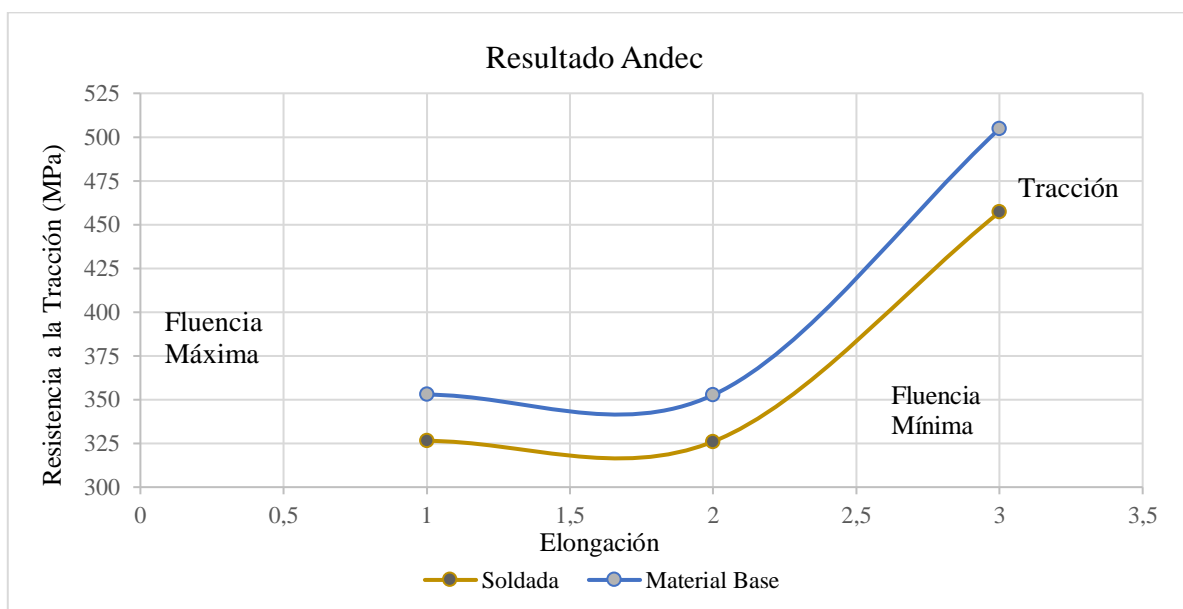
Con los resultados conseguidos mediante la aplicación del ensayo de tracción en las varillas sin soldar de Andec se aprecia la variación en la fluencia máxima de 350.09 MPa a 359.97 MPa, la variación en la fluencia mínima de 348.45 MPa a 359.67 MPa y la resistencia a la tracción que varía de 502.23 MPa a 507.18 MPa. Estos valores serán comparados con los conseguidos en la ejecución del ensayo en el material sin soldar, para observar la variación en las propiedades mecánicas.

Se obtuvo un valor medio para las propiedades mecánicas de las barras de acero ASTM A706 de Andec los cuales se presentan en la tabla 14.

**Tabla 14.** Resultados Andec.

ANDEC			
	Fluencia máximo MPa	Fluencia mínima MPa	Tracción mínima MPa
<b>Soldada</b>	326.45	326.02	457.07
<b>Material Base</b>	358.77	358.54	520.63

La gráfica que se expone en la figura 31, indica como afecta la soldadura en las propiedades mecánicas del material en relación con las varillas de acero de sin soldar de Andec.



**Figura 31.** Resultado varilla corrugada Andec.

En la figura 31 se representa la gráfica obtenida a partir del promedio alcanzado en la resistencia a la tracción, fluencia mínima y fluencia máxima para las probetas soldadas y sin soldar de Andec. Se observa valores más altos para las propiedades mecánicas del material sin soldar en virtud de la presencia de un tamaño de grano fino, el límite de fluencia y la resistencia a la

tracción aumentan. Las propiedades mecánicas de la soldadura en las varillas de acero de Andec presentan valores menores a los del material sin soldar.

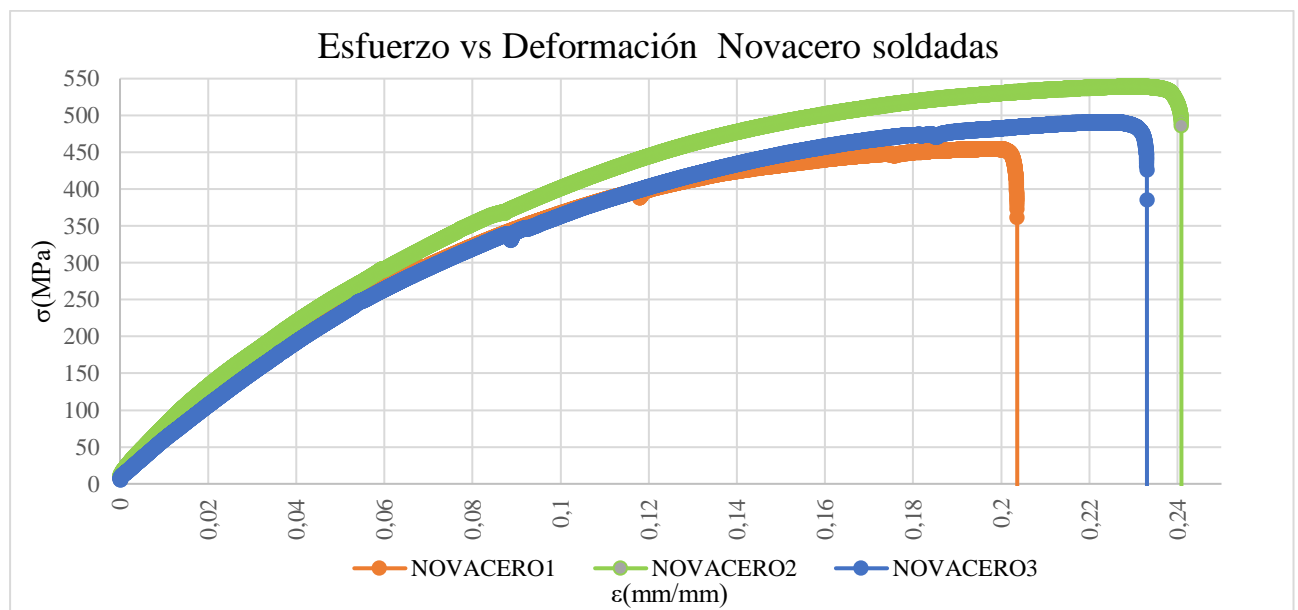
### 3.2.3 Novacero

En la tabla 15 se detalla los valores de fluencia máxima, mínima y tracción para las probetas soldadas de Novacero.

**Tabla 15.** Promedio probetas Novacero soldadas.

<b>NOVACERO</b>			
<b>PROBETAS SOLDADAS</b>			
<b>Probetas</b>	<b>Fluencia máxima MPa</b>	<b>Fluencia mínima MPa</b>	<b>Tracción mínima MPa</b>
<b>1</b>	396.98	396.43	454.45
<b>2</b>	366.13	365.56	539.01
<b>3</b>	337.90	337.33	490.80
<b>Promedio</b>	367.00	366.44	494.75

La gráfica esfuerzo vs deformación que presenta la figura 32, fue realizada en base al ensayo de tracción practicado en las probetas soldadas de Novacero.



**Figura 32.** Esfuerzo vs Deformación Novacero soldadas.

Con los resultados conseguidos mediante la aplicación del ensayo de tracción en las varillas soldadas de Novacero, se aprecia la variación en la fluencia máxima de 337.90 MPa a 396.98 MPa, la variación en la fluencia mínima de 337.33 MPa a 396.43 MPa y la resistencia a la tracción que varía de 454.45 MPa a 539.01 MPa. Estos valores serán comparados con los

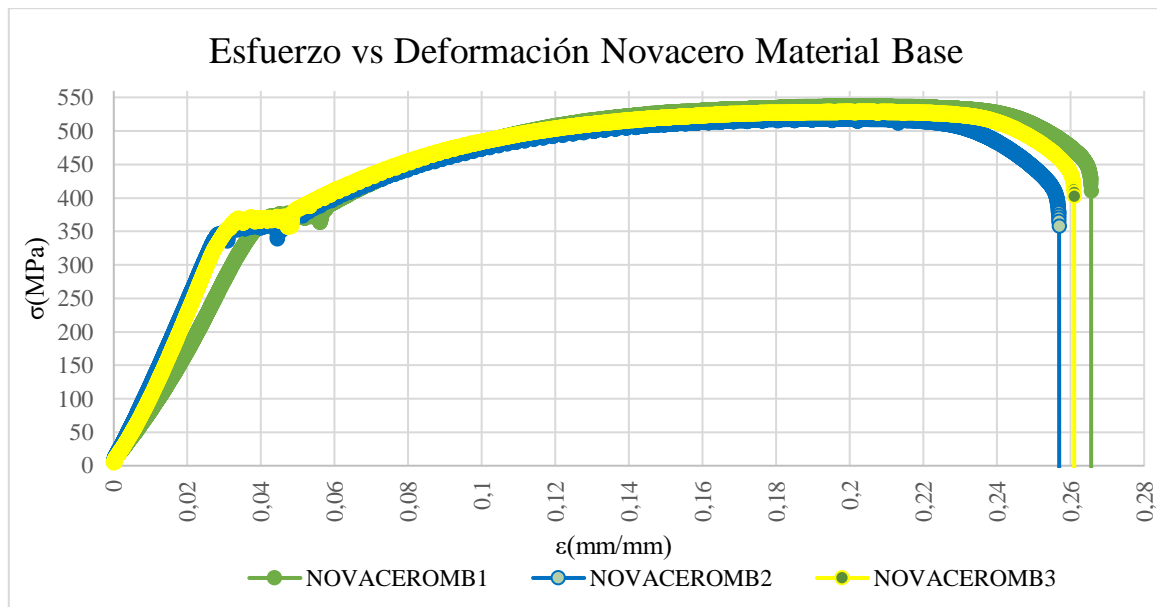
conseguidos en la ejecución del ensayo en el material sin soldar, para observar los cambios en las propiedades mecánicas.

Se utilizaron 5 probetas de material para el ensayo, sin embargo, existieron valores utópicos que fueron descartados, tomando finalmente el resultado de 3 probetas que se detallan en la tabla 16, las cuales cuentan con valores cercanos a los establecidos en la norma para las varillas de acero corrugado A706 grado 42.

**Tabla 16.** Promedio probetas Novacero Material base.

<b>NOVACERO</b>			
<b>PROBETAS MATERIAL BASE</b>			
<b>Probeta</b>	<b>Fluencia máxima Mpa</b>	<b>Fluencia mínima MPa</b>	<b>Tracción mínima MPa</b>
<b>1</b>	372.59	372.43	535.08
<b>2</b>	349.02	348.67	515.07
<b>3</b>	359.85	359.53	527.39
<b>Promedio</b>	360.49	360.21	525.85

La gráfica esfuerzo vs deformación conseguida a partir del ensayo practicado en las varillas sin soldar de Novacero, se muestra en la figura 33.



**Figura 33.** Esfuerzo vs Deformación Novacero Material Base.

Con los resultados conseguidos mediante la aplicación del ensayo de tracción en las varillas sin soldar de Novacero se aprecia la variación en la fluencia máxima de 349.02 MPa a 372.59 MPa, la variación en la fluencia mínima de 348.67 MPa a 372.43 MPa y la resistencia a la tracción

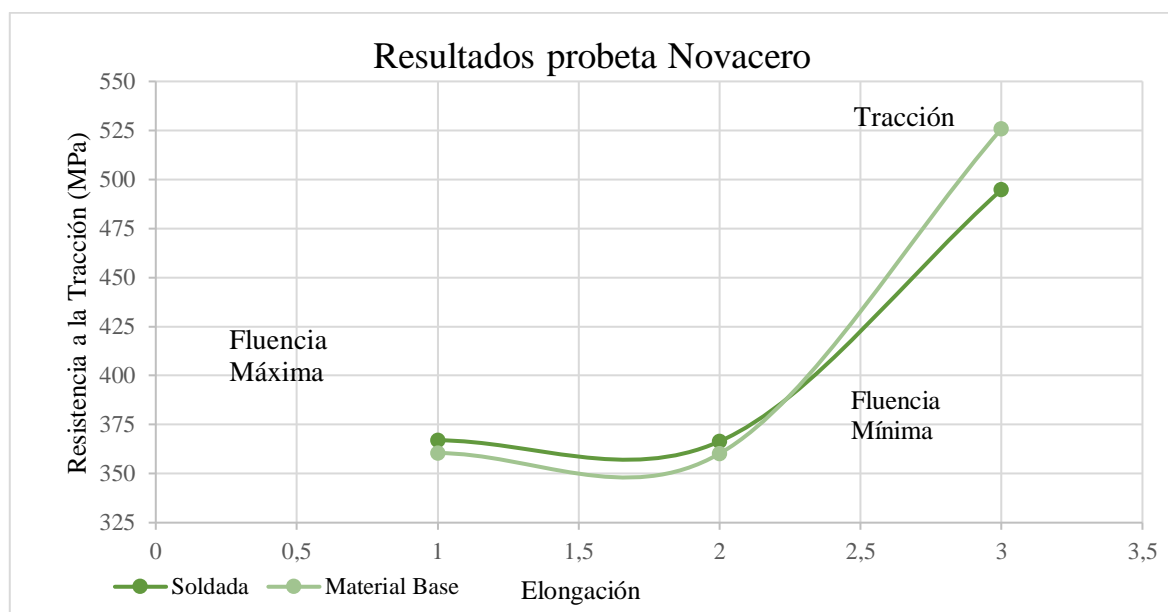
que varía de 515.07 MPa a 535.08 MPa. Estos valores serán comparados con los conseguidos en la ejecución del ensayo en el material sin soldar, para observar la variación en las propiedades mecánicas.

Se obtuvo un valor medio para las propiedades mecánicas de las barras de acero ASTM A706 de Novacero los cuales se presentan en la tabla 17.

**Tabla 17.** Resultados Novacero.

<b>NOVACERO</b>			
	<b>Fluencia máxima MPa</b>	<b>Fluencia mínima MPa</b>	<b>Tracción mínima MPa</b>
<b>Soldada</b>	367.00	366.44	494.75
<b>Material Base</b>	360.49	360.21	525.85

La gráfica que se expone en la figura 34, indica como afecta la soldadura en las propiedades mecánicas en relación con las varillas de acero de sin soldar de Novacero.



**Figura 34.** Resultados probeta Novacero.

La gráfica obtenida a partir del promedio obtenido para la fluencia mínima, fluencia máxima y la resistencia a la tracción para los tubos ensayados soldados y de material base de Novacero se muestra en la figura 36, se puede obtener que el valor de fluencia mínima y máxima aumenta para las probetas soldadas esto se debe a la modificación en el tamaño de grano de la probeta, ya que para tamaño de grano fino el límite de fluencia es alto. La resistencia a la tracción aumenta para el material base esto a pesar de que la medida de grano es menor para la soldadura por lo que se presume existen otros factores que afectan la resistencia a la tracción.

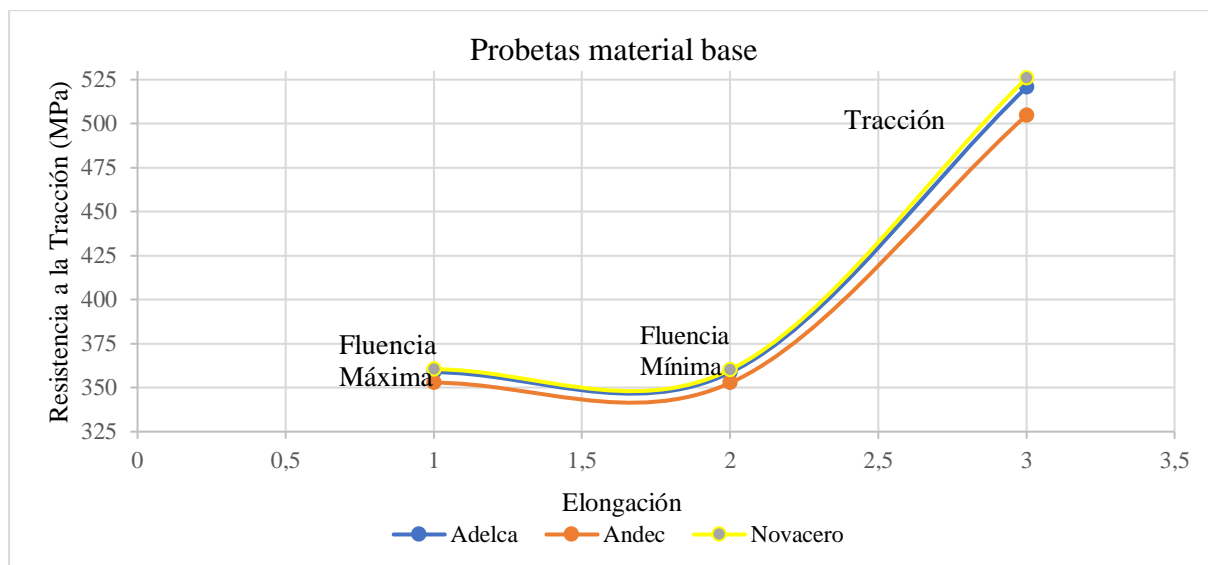
### 3.2.4 Resultado propiedades mecánicas probetas material base

En la tabla 18 se detalla la comparación entre las cualidades mecánicas de fluencia máxima, mínima y tracción mínima de los tres fabricantes.

**Tabla 18.** Propiedades mecánicas material base.

MATERIAL BASE			
	Fluencia máxima MPa	Fluencia mínima MPa	Tracción mínima MPa
<b>Adelca</b>	358.77	358.54	520.63
<b>Andec</b>	352.83	352.67	504.72
<b>Novacero</b>	360.49	360.21	525.85

La figura 35 muestra la gráfica creada a partir de la media de los valores conseguidos en las propiedades del material de los tres fabricantes de varilla de acero corrugado Adelca, Andec y Novacero. La grafica indica que la varilla microaleada de Novacero presenta propiedades mecánicas más altas en relación con las varillas termotratadas de Adelca y Andec, sin embargo, los valores obtenidos en las cualidades mecánicas para los tres fabricantes durante el ensayo de tracción no difieren de manera significativa y se encuentran en el rango fijado por la norma INEN 2167.



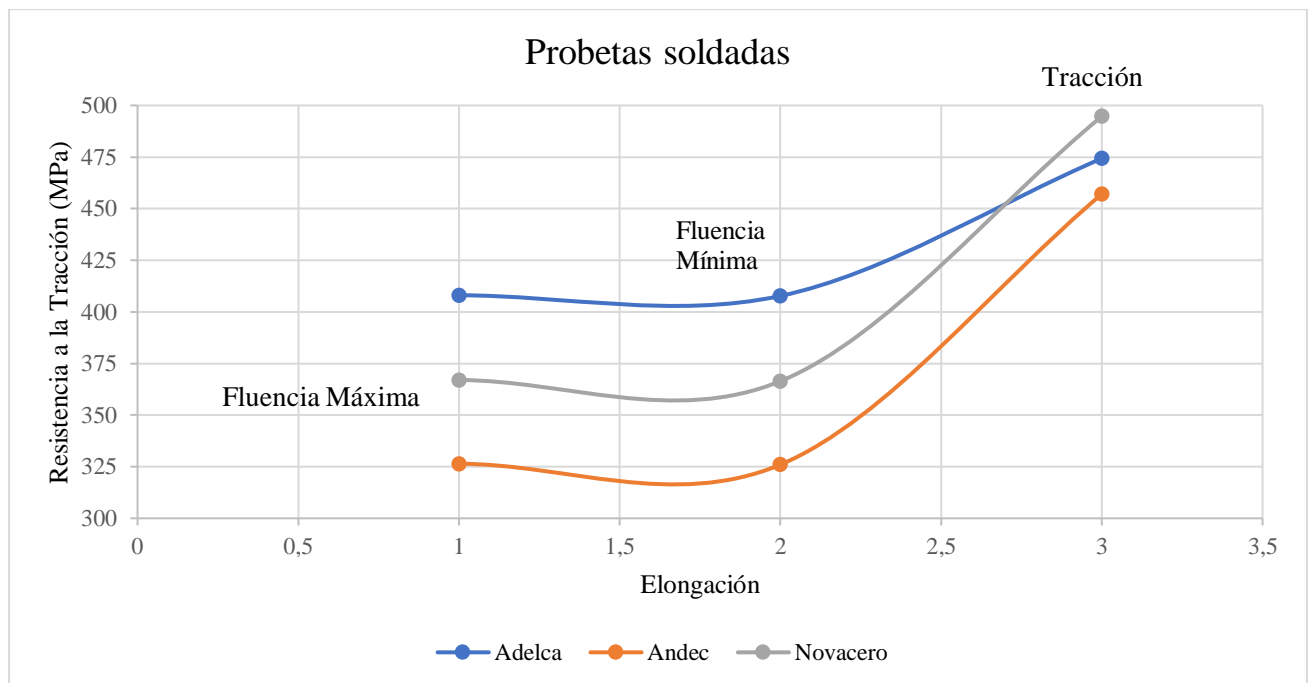
**Figura 35.** Material base fabricantes.

En la tabla 19 se muestra el promedio obtenido en las características mecánicas de las probetas soldadas de los tres fabricantes.

**Tabla 19.** Propiedades mecánicas soldadas.

<b>SOLDADAS</b>			
	<b>Fluencia máxima MPa</b>	<b>Fluencia mínima MPa</b>	<b>Tracción mínima MPa</b>
<b>Adelca</b>	408.06	407.72	474.32
<b>Andec</b>	326.45	326.02	457.07
<b>Novacero</b>	367.00	366.45	494.75

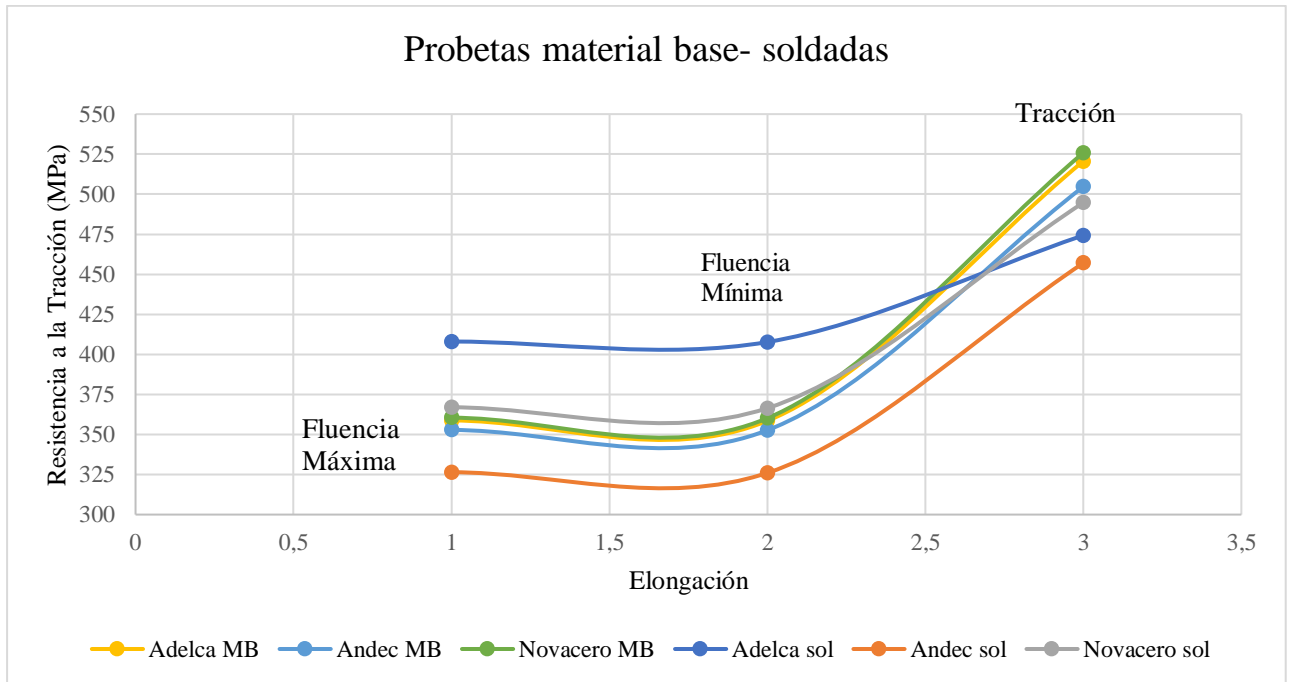
Las propiedades mecánicas cambian significativamente en las varillas de los tres fabricantes después del proceso de soldadura, esto se puede apreciar en la figura 36. Se aprecia que la varilla termotratada de Adelca posee propiedades mecánicas mejores para la fluencia mínima y máxima, seguida de la varilla microaleada de Novacero. Para la resistencia a la tracción Adelca presenta un decrecimiento y es superada en esta propiedad por las probetas del fabricante Novacero. Se observa finalmente que la varilla termotratada de Andec presenta valores más bajos para las tres propiedades analizadas.



**Figura 36.** Soldadas tres fabricantes.

En la figura 37 se observa como fueron afectadas por la soldabilidad las probetas soldadas las cuales se comparó con las probetas de material base.





**Figura 37.** Material base – Soldadas propiedades mecánicas.

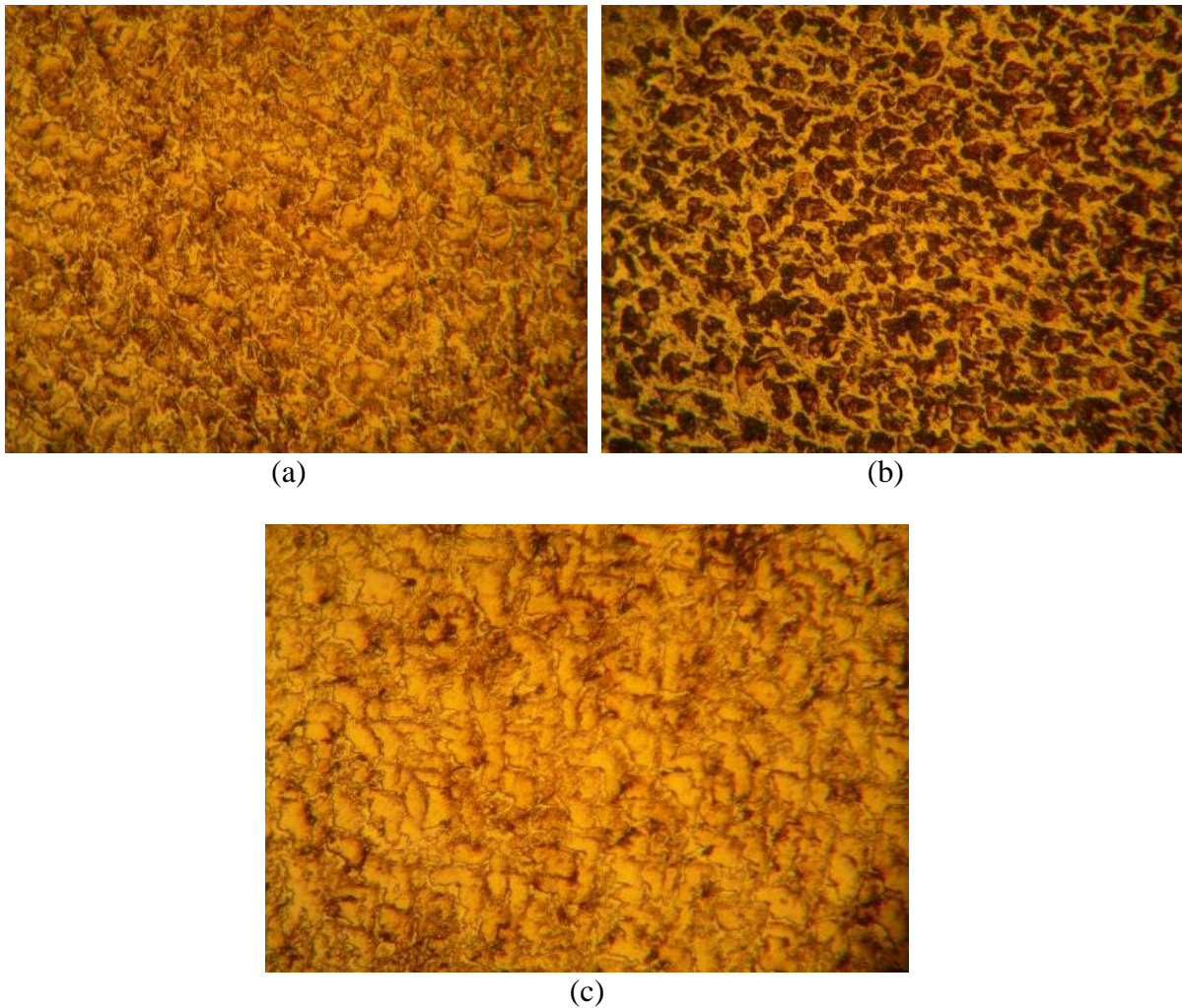
La figura 37 muestra la comparación de las propiedades mecánicas para las probetas de los tres fabricantes Adelca, Andec y Novacero antes y después de la soldadura. Las curvas de color azul y anaranjado representan a las varillas termotratadas de Adelca y Andec soldadas respectivamente las cuales difieren notablemente con las propiedades obtenidas en el material base. Adelca tiene un aumento de 13.7 % en las propiedades de fluencia y una disminución de 8.9 % en la resistencia a la tracción con relación al material sin soldar. En Andec se ven afectadas sus propiedades mecánicas después del proceso de soldadura presentando un valor de 7.5 % menor que el límite de fluencia del material base y un valor de 9.4 % menos en la resistencia a la tracción.

La varilla microaleada de Novacero presenta mejores características en comparación con las del material sin soldar, esto se refleja al calcular el error pues de obtuvo un aumento de 1.8 % en el límite de fluencia, y una disminución de 5.9 % en la resistencia a la tracción con respecto a las propiedades del material sin soldar.

### 3.3 Análisis metalográfico metal base

Las imágenes obtenidas por medio de microscopía óptica del material sin soldabilidad son mostradas en la figura 38. Las figuras (a), (b) y (c) corresponden a la microestructura de las barras de acero corrugado ASTM A706 de las empresas Adelca, Andec y Novacero

respectivamente, prosiguiendo se dará las características de cada microestructura, el cálculo del tamaño de grano y un análisis final entre las varillas cuyo proceso de fabricación se basa en tratamientos térmicos Andec y Adelca con las varillas microaleadas de Novacero.



**Figura 38.** Microestructura material base a) Adelca, b) Andec y c) Novacero.

Las fases y el tamaño de grano calculado de las varillas de acero corrugado para uso estructural ASTM A706 de Adelca, Andec y Novacero, se presentan a continuación en la tabla 20.

**Tabla 20.** Análisis metalográfico Material Base.

<b>Análisis metalográfico del material base ASTM A706 (Material base)</b>		
Microscopio		Aumento: x40
Material	Tamaño de grano	Descripción
Adelca	$n = Q + n_a$ $n = -2.6 + 5$ $n = 2.7$	<p>La figura 38 (a) muestra una microestructura perlítica de las varillas de acero corrugado de Adelca donde se puede observar una superficie de color amarillo en la cual se distingue capas de color claro que se tratan de fase ferrita y capas de color oscuro representando la fase cementita.</p>
Andec	$n = Q + n_a$ $n = -2.6 + 5$ $n = 2$	<p>La microestructura del fabricante Andec se ilustra en la figura 38 (b) se puede observar con mayor claridad láminas de color oscuro, esto se debe al número tan elevado de límite de grano que existe entre la matriz ferrita y las láminas de cementita.</p>
Novacero	$n = Q + n_a$ $n = -2.6 + 5.3$ $n = 2.6$	<p>La figura 38 (c) representa a la varilla de Novacero, se da un cambio muy notable con respecto a las anteriores, el color oscuro no es tan notorio esto se debe a su forma laminar lo que permite acortar espacios entre el límite de grano de la ferrita y la cementita, causando de esta forma que presente una mayor dureza.</p>

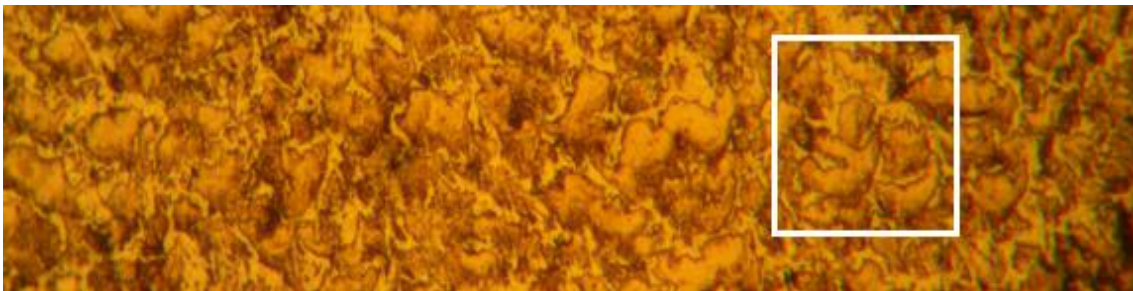
Las varillas termotratadas de Andec y Adelca presentan una estructura perlítica globular en la cual se permite la creación de grandes espacios entre el límite de grano de la matriz ferrita y las

láminas de cementita, por ello el color oscuro en estas microestructuras prevalece, a diferencia de la microestructura de la varilla microaleada de Novacero la cual presenta una estructura perlítica laminar cuya característica le atribuye mayor dureza que las anteriores.

El valor de tamaño de grano calculado para las varillas de los tres fabricantes es muy fino lo que se traduce como una resistencia al flujo plástico muy alta para este material.

### 3.3.1.1 Adelca probeta material base

Para la obtención del tamaño de grano en el material sin soldar se ha utilizado el método planimétrico establecido por la norma ASTM E112 el cual consiste en determinar el número de granos existente por unidad de área. En la figura 39 se ejemplifica este método para el cual se ha considerado los granos intersecados por la frontera como  $\frac{1}{2}$  sin importar su tamaño.



**Figura 39.** Tamaño de Grano Adelca material base.

$$N = 12 + \frac{15}{2}$$

$$N = 19.5 \frac{\text{granos}}{\text{pulg}^2}$$

$$N = 2^{n_a - 1}$$

$$\ln(19.5) = (n_a - 1)\ln(2)$$

$$n_a = 5.3$$

$$M = 40x$$

$$Q = 2\log_2\left(\frac{M}{100}\right)$$

$$Q = 2\log_2\left(\frac{40}{100}\right)$$

$$Q = 2.6$$

$$n = Q + n_a$$

$$n = -2.6 + 5.3$$

$$n = 2.7$$

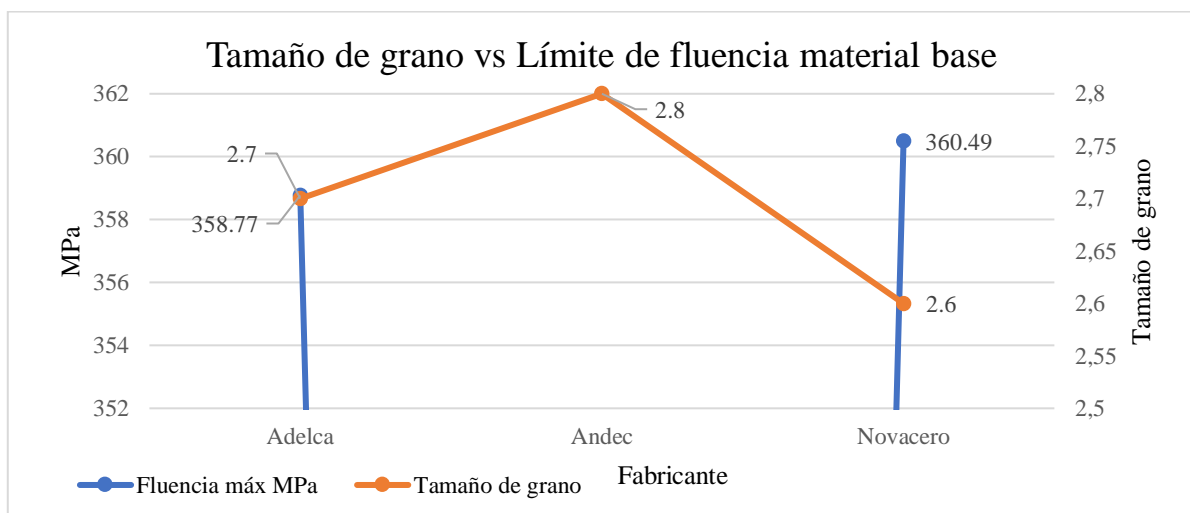
### 3.3.2 Influencia del tamaño de grano material base

El tamaño de grano tiene una gran influencia en las propiedades mecánicas del material, tal es el caso del límite de fluencia el cual aumentará para grano fino y disminuirá su valor para grano grueso. En la tabla 21 se detallan los valores de fluencia y tamaño de grano para las varillas de acero corrugado ASTM de los tres fabricantes estudiados.

**Tabla 21.** Valores de tamaño de grano y límite de fluencia para material base.

<b>Tamaño de grano vs Límite de fluencia (Material base)</b>		
	<b>Fluencia máxima MPa</b>	<b>Tamaño de grano</b>
<b>Adelca</b>	358.77	2.7
<b>Andec</b>	352.83	2.8
<b>Novacero</b>	360.49	2.6

La figura 40 muestra el valor del límite de fluencia correspondiente para cada material en función del tamaño de grano. La varilla microaleada de Novacero tiene el valor más bajo, esto ocasiona que su límite de fluencia aumente en comparación con los otros dos materiales.



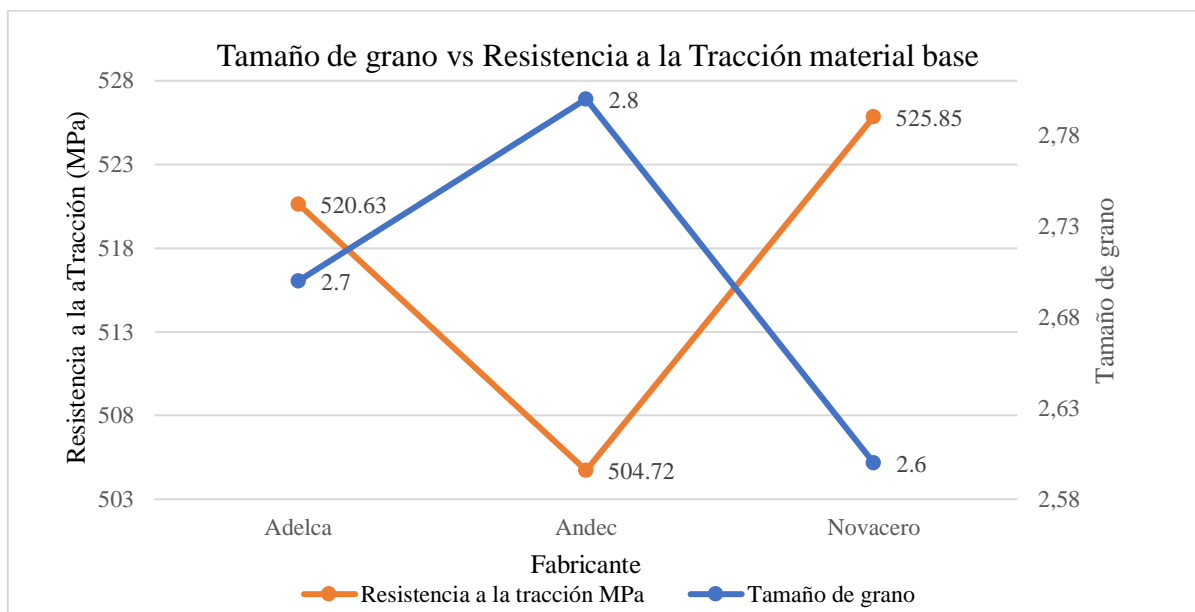
**Figura 40.** Tamaño de grano vs límite de fluencia material base.

El tamaño de grano tiene una relación inversa en cuanto al valor de la resistencia a la tracción, pues un material de grano fino presenta mayor resistencia a la tracción que un material de grano grueso. En la tabla 22 se presenta los valores de resistencia a la tracción de acuerdo con el límite de grano para cada material.

**Tabla 22.** Valores de tamaño de grano y resistencia a la tracción material base.

<b>Tamaño de grano vs resistencia a la tracción (Material base)</b>		
	<b>Tamaño de grano</b>	<b>Resistencia a la tracción MPa</b>
<b>Adelca</b>	2.7	520.63
<b>Andec</b>	2.8	504.72
<b>Novacero</b>	2.6	525.85

La relación entre el tamaño de grano y resistencia a la tracción se puede observar en la figura 41 para los valores de la tabla 22. Para tamaño de grano fino la resistencia a la tracción aumenta, y disminuye su valor de resistencia para tamaño de grano grueso.



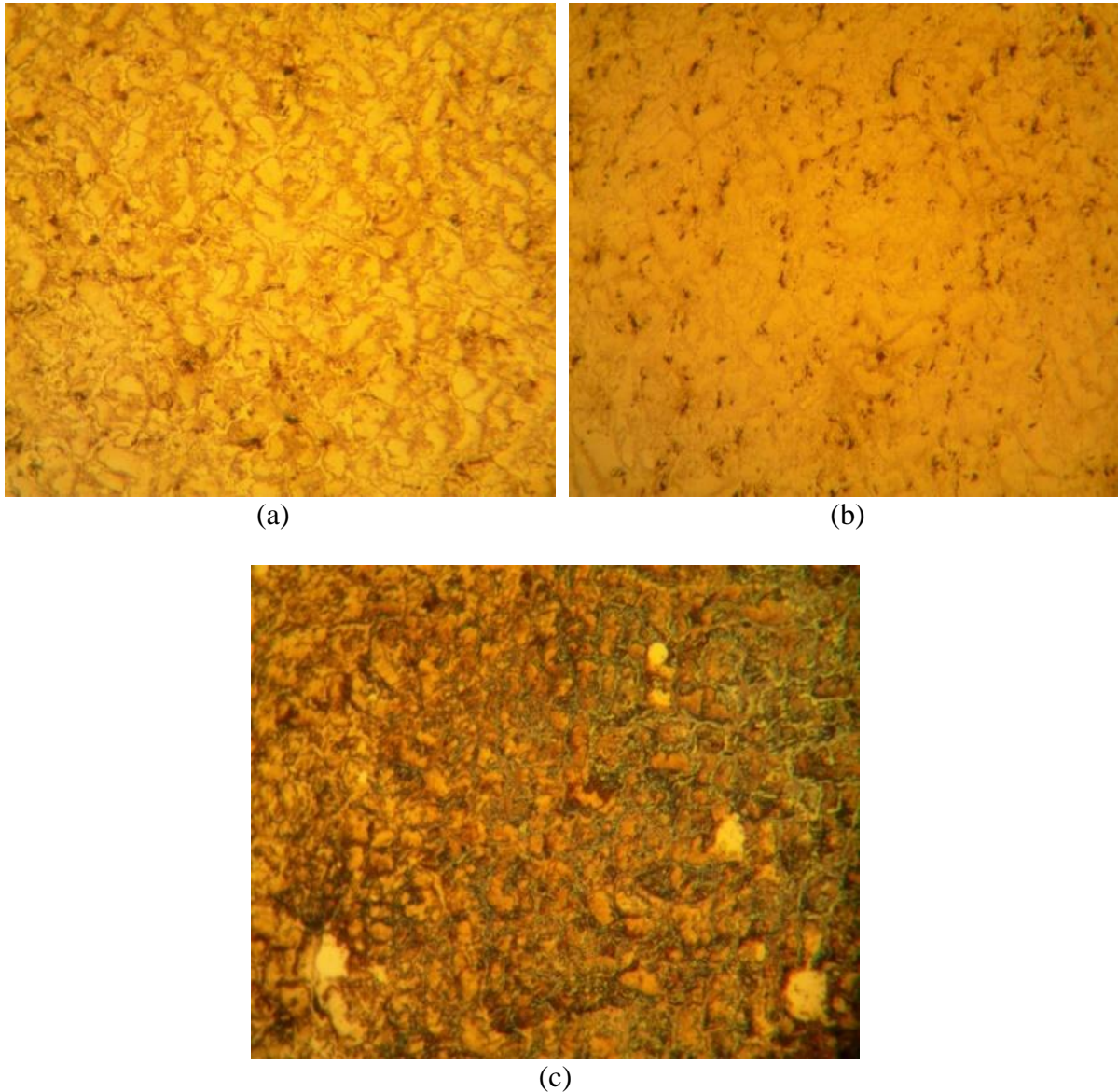
**Figura 41.** Tamaño de grano vs resistencia a la tracción material base.

### 3.3.3 Análisis metalográfico soldadura.

La figura 42 muestra las imágenes de la metalografía de las varillas de acero para uso estructural, las cuales han sido unidas mediante un proceso de soldadura por arco eléctrico SMAW, posteriormente se ha realizado un corte transversal en el área de soldadura obteniendo así el producto final para el estudio.

Las figuras (a), (b) y (c) corresponden a la metalografía de la soldadura de las varillas de Adelca, Andec y Novacero respectivamente. Se realizará a continuación un estudio de la metalografía para conocer sus características, fases, tamaño de grano y se realizará una comparación para determinar cuál de las tres probetas presenta mejores propiedades después de a ver pasado por

el proceso de soldadura y cuanto difiere de los resultados obtenidos en la metalografía del material base (sin soldadura).



**Figura 42.** Microestructura de soldadura a) Adelca, b) Andec y c) Novacero.

Las fases y cambios en el tamaño de grano que experimentó el acero ASTM A706 después de aplicar un proceso de soldadura por arco eléctrico Smaw se detallan a continuación en la tabla 23.

**Tabla 23.** Análisis metalográfico de soldadura.

<b>Análisis metalográfico de la soldadura en ASTM A706</b>		
Microscopio	Tamaño de grano	Aumento: x40 Descripción
Adelca	$n = Q + n_a$ $n = -2.6 + 5.6$ $n = 2.3$	<p>La figura 42 (a) representa la microestructura de la varilla de Adelca después del proceso de soldadura por arco eléctrico. Se puede observar una estructura laminar de perlita que ha disminuido su coloración oscura debido al acortamiento de espacios en el límite de grano entre las láminas de ferrita y la matriz cementita, ocasionando así un aumento en la dureza del material.</p> <p>En la figura 42 (b) se observa la microestructura después del proceso de soldadura, la cual ha pasado de una estructura perlítica globular a una estructura perlítica laminar, pues se puede observar láminas de las dos fases ferrita y cementita alternadas entre sí.</p>
Andec	$n = Q + n_a$ $n = -2.6 + 4.9$ $n = 3$	<p>Al contrario de las varillas termotrataadas la microestructura de la varilla de Novacero mostrada en la figura 42 (c) presenta una estructura donde predomina el color oscuro, al compararla con la microestructura antes de la soldadura se observa que este cambió su estructura perlítica laminar a perlítica globular, pues se observa que encima de la matriz ferrita se han formado glóbulos de cementita lo que ocasiona además pérdida en su dureza.</p>
Novacero	$n = Q + n_a$ $n = -2.6 + 5.4$ $n = 2.8$	



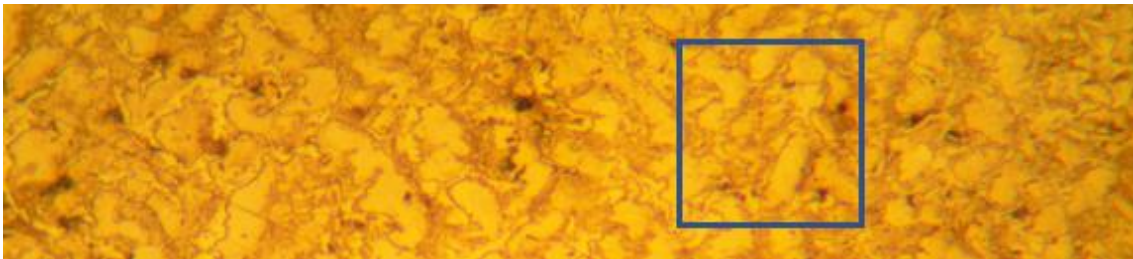
Después de realizar el estudio de la metalografía en la soldadura de la varilla ASTM A706, se observa que las varillas termotratadas de Adelca y Andec cambian su estructura de perlítica globular a perlítica laminar lo cual permite el aumento de dureza en el material, pues se acortan los espacios entre los límites de tamaño de grano entre la ferrita y cementita. Por el contrario, en la varilla microaleada de Novacero se presenta un cambio de perlítica laminar a perlítica globular, la muestra toma un color oscuro a comparación de las anteriores. Este cambio ocasiona una pérdida en la dureza del material.

También se observa un aumento en el tamaño de grano en las varillas de Andec y Novacero lo que se interpreta como una pérdida en su resistencia al flujo plástico, pues mientras más grande es el tamaño de grano mayor es el espacio que existe para que se muevan las dislocaciones presentes en la estructura del material.

### 3.3.3.1 Cálculo del tamaño de grano en la soldadura.

#### 3.3.3.2 Adelca probeta soldada

Para la obtención del tamaño de grano en la soldadura de las varillas de acero corrugado ASTM A706, se ha utilizado el método planimétrico establecido por la norma ASTM E112 el cual consiste en determinar el número de granos existente por unidad de área. Se muestra en la figura 43 un ejemplo de cálculo para la soldadura de la varilla termotratada de Adelca.



**Figura 43.** Tamaño de grano Adelca soldada.

$$N = 9 + \frac{13}{2}$$

$$N = 15.5 \frac{\text{granos}}{\text{pulg}^2}$$

$$N = 2^{n_a - 1}$$

$$\ln(15.5) = (n_a - 1)\ln(2)$$

$$n_a = 4.9$$

$$M = 40x$$

$$Q = 2 \log_2 \left( \frac{M}{100} \right)$$

$$Q = 2 \log_2 \left( \frac{40}{100} \right)$$

$$Q = -2.6$$

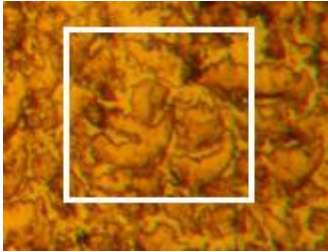
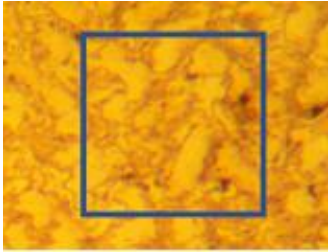
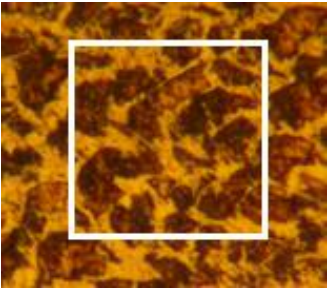
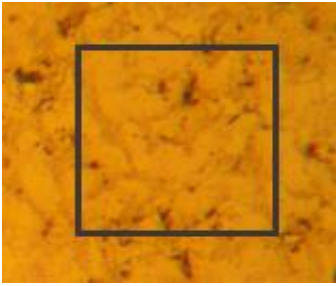
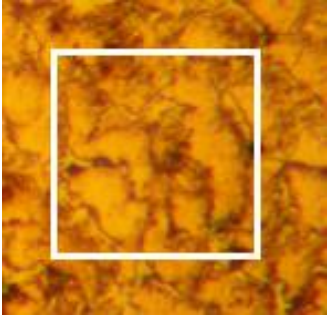
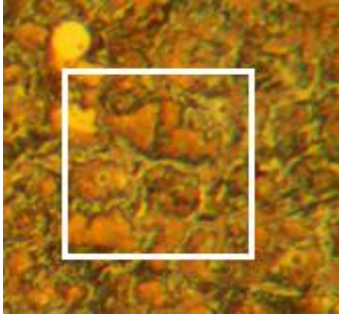
$$n = Q + n_a$$

$$n = -2.6 + 4.9$$

$$n = 2.3$$

En la tabla 24 se detalla el tamaño de grano para las probetas soldadas y de material base de los fabricantes de varillas Adelca, Andec y Novacero. Estos valores se obtuvieron de la misma forma que los calculados anteriormente mediante el método planimétrico.

**Tabla 24.** Tamaño de grano probetas material base y probetas soldadas.

<b>Tamaño de grano</b>		
<b>Fabricante</b>	<b>Probetas Material Base</b>	<b>Probetas Soldadas</b>
Adelca	 n: 2.7	 n: 2.3
Andec	 n: 2.8	 n: 3
Novacero	 n: 2.6	 n: 2.8

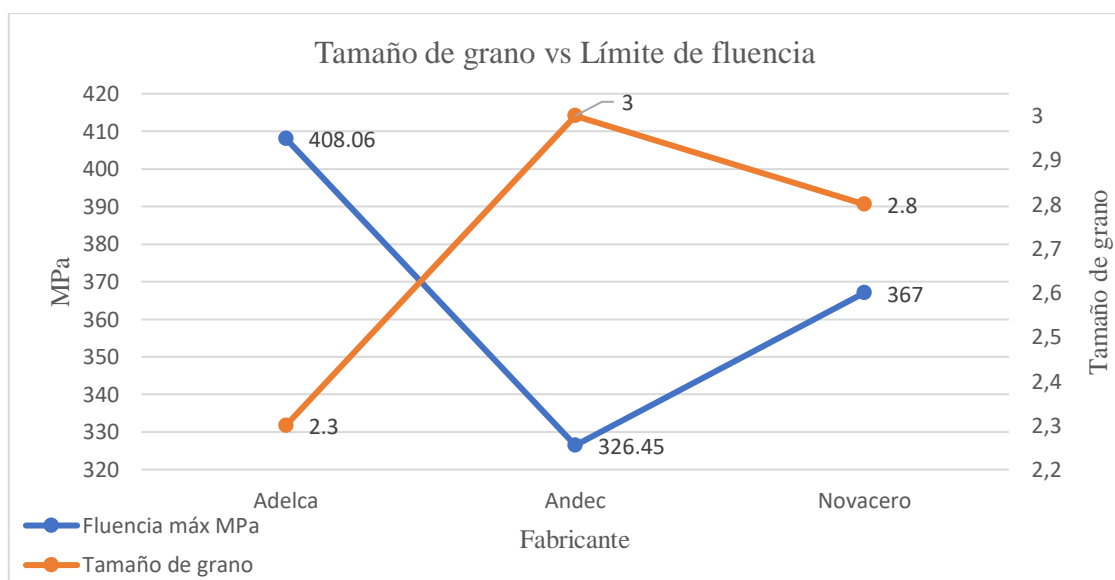
### 3.3.4 Influencia del tamaño de grano en la soldadura

Después del proceso de soldadura el tamaño de grano puede aumentar, disminuir o mantenerse de acuerdo con la destreza del experto al momento de realizar el trabajo, al igual que en el material base el límite de fluencia la aumentará cuando el tamaño de grano sea fino y disminuirá su valor para tamaño de grano grueso. En la tabla 25 se muestran los valores de esfuerzo a la fluencia y tamaño de grano para los tres materiales de estudio.

**Tabla 25.** Valores de tamaño de grano y límite de fluencia para soldadura.

Tamaño de grano vs Límite de fluencia (Soldadura)		
	Fluencia máxima MPa	Tamaño de grano
<b>Adelca</b>	408.06	2.3
<b>Andec</b>	326.45	3
<b>Novacero</b>	367	2.8

La figura 44 indica el aumento del límite de fluencia para los materiales de grano fino, tal es el caso de Adelca y Novacero. El valor menor para el límite de fluencia se presenta para la varilla termotratada de Andec pues su tamaño de grano es el mayor a comparación de los otros dos materiales.



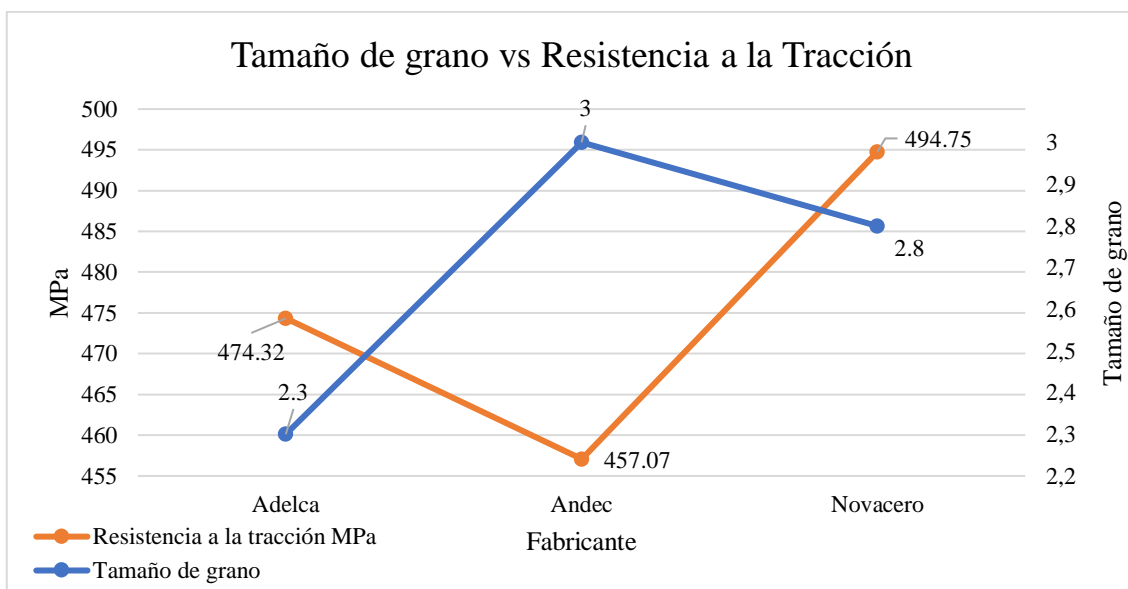
**Figura 44.** Tamaño de grano vs límite de fluencia soldadura.

De igual forma el valor de la resistencia a la tracción disminuye para cada tamaño de grano grueso y aumenta para tamaño de grano fino. Se presenta a continuación en la tabla 26 los valores correspondientes de resistencia a la tracción de acuerdo con el tamaño de grano.

**Tabla 26.** Valores de tamaño de grano y resistencia a la tracción para soldadura.

<b>Tamaño de grano vs resistencia a la tracción (Soldadura)</b>		
	<b>Tamaño de grano</b>	<b>Resistencia a la tracción MPa</b>
<b>Adelca</b>	2.3	474.32
<b>Andec</b>	3	457.07
<b>Novacero</b>	2.8	494.77

Se puede observar en la tabla 26 que los valores de resistencia a la tracción son inversamente proporcionales de acuerdo con el tamaño de grano siendo mayor para tamaños de grano pequeño y menor para tamaños de grano grande. Estos resultados se muestran en la figura 45.



**Figura 45.** Tamaño de grano vs resistencia a la tracción soldadura.

En la figura 46 se muestra una gráfica comparativa entre el tamaño de grano y resistencia a la tracción del material base y material soldado de las varillas de acero corrugado de Adelca, Andec y Novacero.

El tamaño de grano presenta una disminución del 14 % en la varilla termotratada de Adelca, mientras que aumenta 7,1 % y 7,7 % en Andec y Novacero respectivamente con respecto al tamaño de grano del material base. El tamaño de grano influye de manera directa en el valor

de la resistencia a la tracción, se muestra que para las probetas de material base y soldadas, la tracción aumenta para tamaños de grano fino, y disminuye para tamaños de grano grueso.

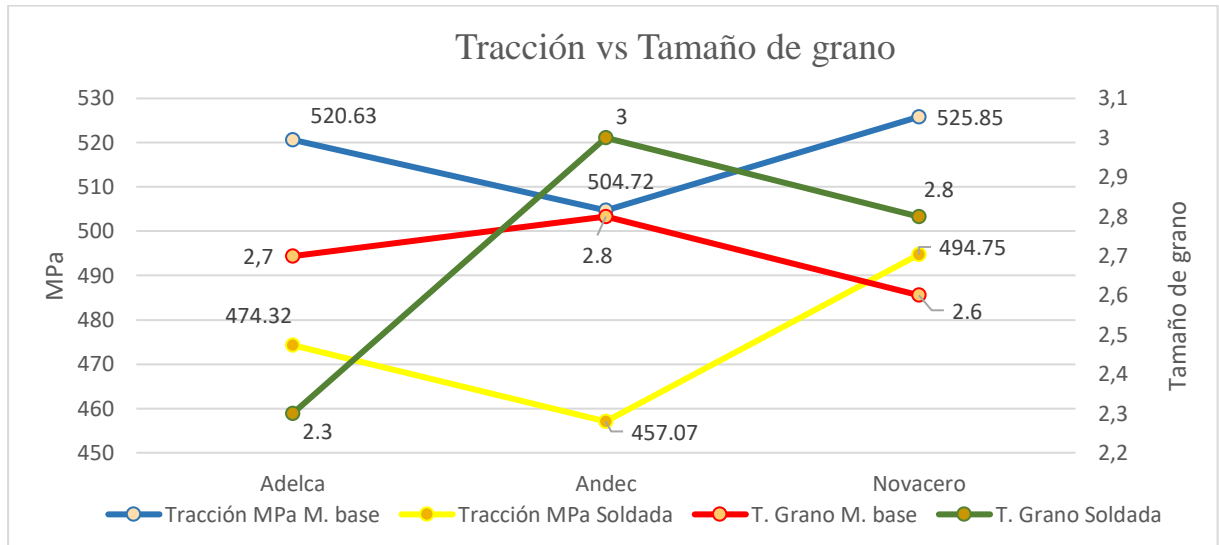


Figura 46. Tracción vs Tamaño de grano.

### 3.4 Resultados ensayo de dureza

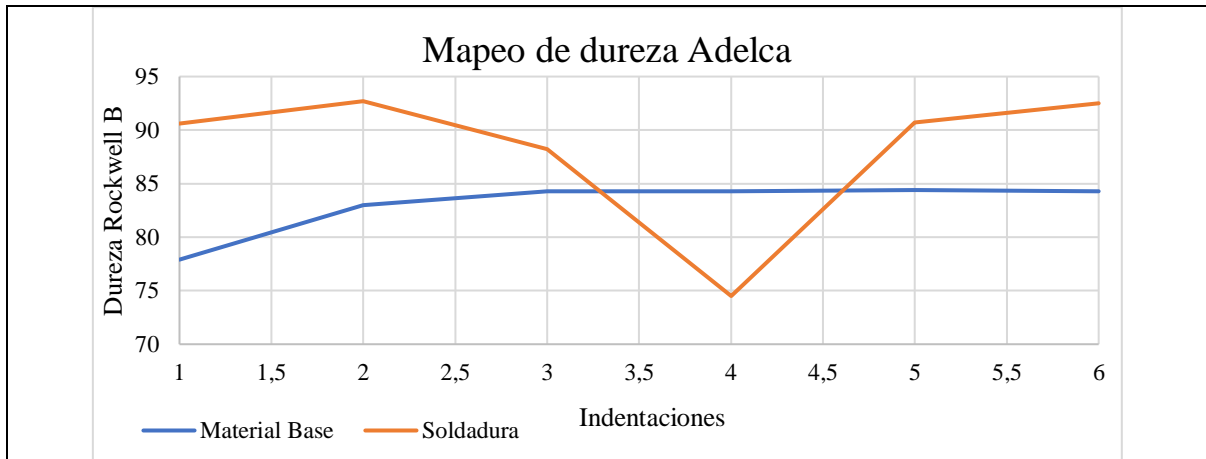
Los resultados obtenidos durante la aplicación de los ensayos de dureza realizados en el material base y soldadura de las varillas de acero corrugado, se detallan en los anexos 9 al 11.

#### 3.4.1 Ensayo de dureza Adelca

Se observa mediante el mapeo de dureza que las indentaciones realizadas en el material base tienden a formar una curva aproximadamente lineal, esto se debe a que el material no ha sido modificado por ningún agente externo.

Sin embargo, después del proceso de soldadura el mapeo de dureza revela una curva con valores que no permiten su linealidad sobre todo la indentación numero 4 posee un valor muy bajo esto puede ocurrir debido a muchos factores el más acertado es por la zona donde afecto el calor durante el proceso de soldadura.

ASTM A706 ADELCA						
Carga: 100 kgf			Indentador: 1/16"			
Escala dureza: Rockwell B						
Material	Ind 1	Ind 2	Ind 3	Ind 4	Ind 5	Ind 6
Material Base	77.9	83	84.3	84.3	84.4	84.3
Soldadura	90.6	92.7	88.2	74,5	90.0	92.5



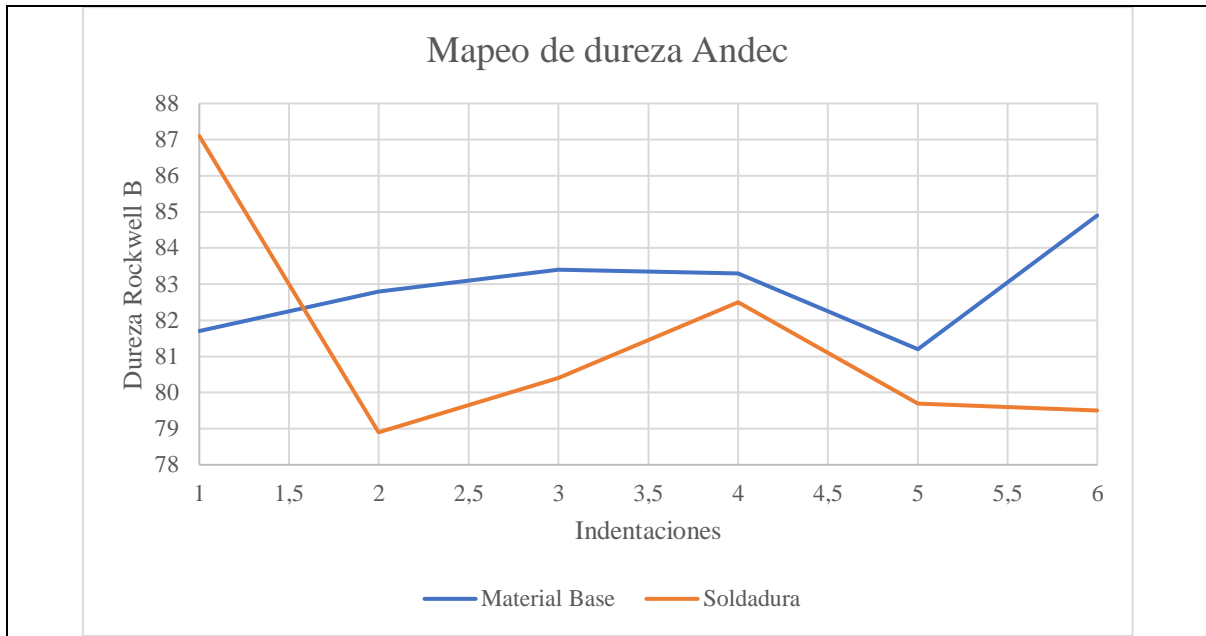
**Figura 47.** Mapeo de dureza Adelca.

### 3.4.2 Ensayo de dureza Andec

El mapeo de dureza revela detalles importantes en la curva del material base. Se puede observar una linealidad en las cuatro primeras indentaciones, la 5 toma de dureza proporciona un valor muy bajo con respecto a los anteriores lo que no permite la linealidad de la curva. No se descarta errores humanos o de maquina pues el área de estudio aún no ha sido afectada por ningún agente externo.

Para la curva de dureza en el área de soldadura el mapeo revela que la dureza presenta muchas variaciones la más alta se da en la primera indentación y la más baja en la sexta indentación esto debido a que el área estudiada ha sido afectada por altas temperaturas que se manejan durante el proceso de soldadura. Para esta curva se presentan valores más bajos de dureza por lo que la hace una curva descendente.

ASTM A706 ANDEC						
Carga: 100 kgf			Identador: 1/16"			
Escala dureza: Rockwell B						
Material	Ind 1	Ind 2	Ind 3	Ind 4	Ind 5	Ind 6
Material Base	81.7	82.8	83.4	83.3	81.2	84.9
Soldadura	87.1	78.9	80.4	82.5	79.7	79.5

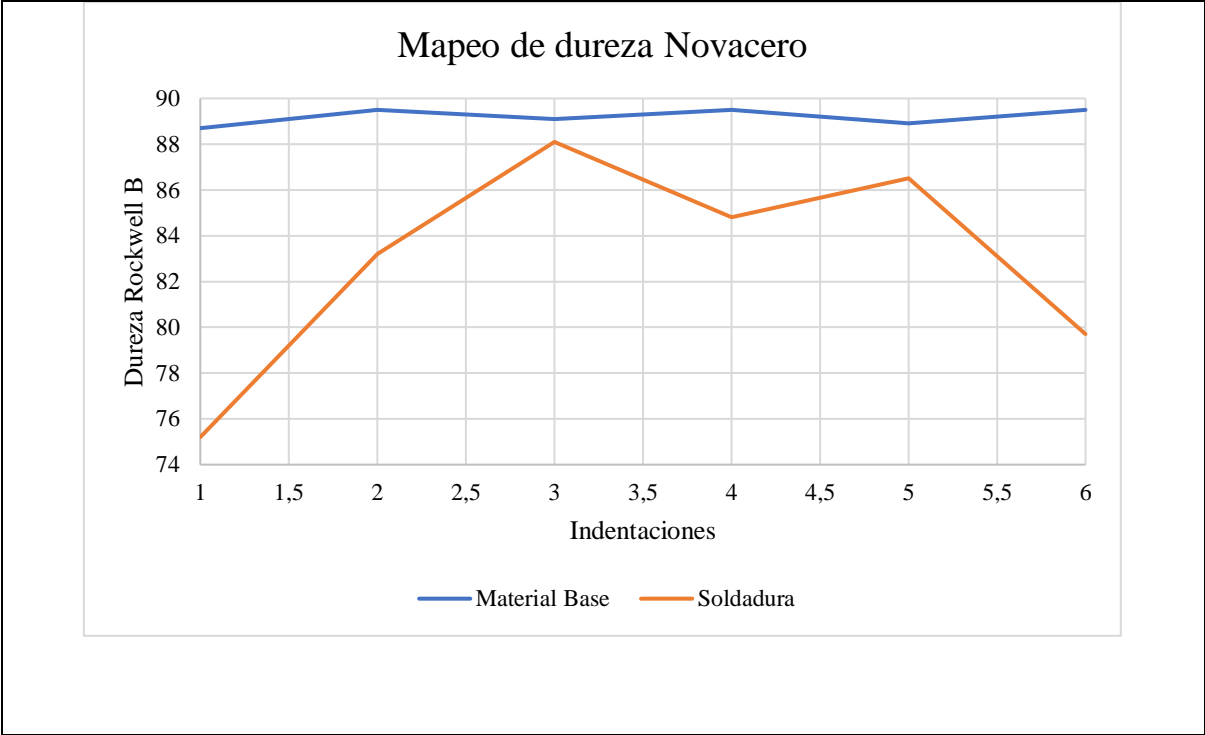


**Figura 48.** Mapeo de dureza Adelca.

### 3.4.3 Ensayo de dureza Novacero

Las mediciones de dureza en el material base no difieren en mucho sus resultados pues la superficie donde se han realizado las tomas de dureza no ha sido afectada por ningún agente externo y por ello el mapeo de dureza muestra una curva casi lineal. Para el material después de la soldadura ocurre todo lo contrario a lo anterior pues las tomas de dureza difieren unas de otras por lo cual su curva es muy irregular, presenta dos picos en la indentación tres y en la indentación cinco. Los valores de dureza van de menor a mayor por lo que se puede observar una curva ascendente.

ASTM A706 NOVACERO – x40						
Carga: 100 kgf			Identador: 1/16"			
Escala dureza: Rockwell B						
Material	Ind 1	Ind 2	Ind 3	Ind 4	Ind 5	Ind 6
Material Base	88.7	89.5	89.1	89.5	88.9	89.5
Soldadura	75.2	83.2	88.1	84.8	86.5	79.7



**Figura 49.** Mapeo de dureza Novacero.



## CONCLUSIONES

Se comprobó la soldabilidad de las varillas de acero corrugado ASTM A706 para tres fabricantes disponibles en el mercado, Adelca, Andec y Novacero mediante la aplicación de los ensayos establecidos por la norma INEN 2167 entre los cuales se encuentra el ensayo de espectrometría que sirve para determinar el porcentaje de carbono equivalente que indica cuan óptimo es el material para ser soldado, así se obtuvo los siguientes resultados en Adelca 0.52 %, Andec 0.48 % y Novacero 0.54 %. Mediante los resultados obtenidos se clasifica la varilla de Andec como un material con una soldabilidad promedio y las varillas de Adelca y Novacero como materiales con soldabilidad mala.

Se realizó un estudio metalográfico del acero ASTM A706 para tres fabricantes Adelca, Andec y Novacero donde se pudo observar los cambios de fase y tamaño de grano en el material analizado. En la microestructura de las varillas termotratadas Adelca y Andec se observó una fase perlítica globular en el material base que cambió después del proceso de soldadura a una fase perlítica laminar esto debido al acortamiento de espacios entre el límite de grano de las láminas de ferrita y la matriz cementita, en cuanto al tamaño de grano al compararlas con el material base, Andec disminuyó su tamaño en 14.8 % y Adelca aumento su tamaño en 7.14 % respectivamente. Para la varilla microaleada de Novacero se presenta una fase perlítica laminar en el material base la cual cambia después del proceso de soldadura por una fase perlítica globular donde se observa la formación de glóbulos de cementita. El tamaño de grano para este material aumentó en 7.69 % con respecto al del material base.

Se comprobó a partir del ensayo de tracción realizado mediante la norma INEN 109 en las varillas de acero corrugado ASTM A706, la relación existente entre el tamaño de grano y las propiedades mecánicas del material. Los resultados conseguidos por este ensayo indican que existió un aumento de 13.7 % en el límite de fluencia y una disminución de 8.8 % en la resistencia a la tracción de la varilla corrugada de Adelca con respecto a las propiedades del material. El tamaño de grano en este material disminuyó en un 14.8 % lo que hace que sus propiedades aumenten. en la varilla de acero corrugado de Andec se observa una pérdida en las propiedades mecánicas, para la fluencia el valor disminuyó en 7.5 % y para la resistencia a la tracción su valor decayó en 9.4 %, el tamaño de grano en este material presenta un aumento de 9.4 % lo cual infiere en la disminución en el valor de sus propiedades. Finalmente, las varillas de Novacero presentaron un límite de fluencia mayor

a 1.8 % y una resistencia a la tracción 5.9 % menor que la del material sin soldar. Se observa que el tamaño de grano presenta una relación inversamente proporcional con las propiedades mecánicas de material, mientras más fino el grano mayor son las propiedades mecánicas del material y a medida que el tamaño de grano aumenta, las propiedades mecánicas del material van decreciendo.

Se verificó mediante los ensayos realizados, que las propiedades mecánicas de las varillas de acero corrugado para uso estructural de Adelca, Andec y Novacero, presentan características similares antes y después de la soldadura por arco eléctrico realizada mediante Smaw.

## **RECOMENDACIONES**

Es recomendable la utilización de un mayor número de probetas en la ejecución de los ensayos realizados, que permita la obtención de información y excluir valores utópicos que puedan afectar los resultados obtenidos.

Para obtener un análisis más completo de las propiedades mecánicas en la soldadura de las varillas de acero corrugado, se recomienda para un próximo estudio la aplicación del ensayo de doblado para valorar cuan dúctil es el material de estudio.

Para la aplicación del ensayo de metalografía es recomendable utilizar lentes que proporcionen una mejor visibilidad de la microestructura del material. Un aumento de 100x, 200x y 400x; permitirá observar de mejor manera las fases presentes en la metalografía y una visión mejor para el cálculo del tamaño de grano.

Para mejorar las propiedades mecánicas en la soldadura es recomendable la aplicación de tratamientos térmicos que aumenten la dureza, resistencia a la tracción y límite de fluencia del material.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Rafael. Pérez. ‘AWS. D.14’. 2011”.
- [2] “NTE-INEN. (2017), NTE INEN 2167: Varillas corrugadas y lisas de acero al carbono laminadas en caliente, soldable, soldables, microaleadas o termotratadas para hormigón armado. requisitos (Tercera edición).”,” 2011.
- [3] I. Roberto, L. Gamero, I. Álvaro, and S. Canales, “Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Estudio de la soldabilidad de barras corrugadas de acero Astm a 706 de 3/4”, en junta a tope,” 2007.,” Mar. 2007.
- [4] “A. Darby, ‘Tipos de Soldadura’, 2018,” vol. 50.
- [5] J. A. Bejarano Ulloa and R. M. Nuñez Monroy, “Evaluación de la influencia de los gases de protección de soldadura en las propiedades del acero inoxidable UNS S32707,” *PUCP*, May 20, 2019.
- [6] “T. Reyes, C. Rodríguez. ‘Estudio y Análisis del comportamiento de varillas de acero corrugado A706 bajo la acción de cargas cíclicas,’” vol. 58, pp. 1–50, 2012.
- [7] “Paúl, D. ‘Antecedentes históricos 1. Antecedentes históricos 1.1. Los primeros aceros.’ 2015.”
- [8] E. Y. Aceros and M. M. Felipe Díaz Del Castillo Rodríguez Alberto Reyes Solís, “E. coronel, “Universidad nacional autónoma de México facultad de estudios superiores Cuautitlán departamento de ingeniería tratamientos térmicos”, 2017.”
- [9] E. de, J. Coronado García Tutor, and F. Blanco Álvarez, “Universidad de OVIEDO ‘Balance de masa, energía y simulación del Convertidor LD’ 2009.”
- [10] “F. Villagómez, ‘Tipos de Acero Estructural y Sistemas Estructurales’.,” Sep. 2019.
- [11] R. Nacional, “Schafer, ‘Norma mínima de Diseño y Construcción general’.,” 2012.
- [12] L. A. Supuesta and P. de Este Metal, “R. Cabezas. ‘Clasificación de los aceros’, 2018.”
- [13] O. Eduardo and A. Luzcando, “A. Sotomayor. ‘Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería civil y Ambiental, Estudio numérico computacional discreto del fenómeno de adherencia entre una matriz cementante y varillas corrugadas de acero: un

acercamiento desde la meso-escala. proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Civil mención estructuras’, 2017.”

- [14] “J, Torres. Norma Técnica guatemalteca, ‘Ensayos destructivos’, 2015.” [Online]. Available: [www.mineco.gob.gt](http://www.mineco.gob.gt)
- [15] G. García Márquez, “Ensayo de dureza Brinell, 2012.,” *Struers Ensuring Certainty*, Sep. 14, 2022.
- [16] “Játiva, Jefferson ‘Estudio del reforzamiento de mampostería de bloque de hormigón mediante ensayos destructivos aplicados a pórticos de acero con juntas apernadas”.
- [17] “Ficha técnica Novacero ASTM A706”.
- [18] “Ficha técnica Andec varilla ASTM A706”.
- [19] “Ficha técnica Adelca varilla corrugada ASTM A706”.
- [20] I. Roberto, L. Gamero, I. Álvaro, and S. Canales, “S, Tamayo ‘8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica de barras corrugadas de acero ASTM A 706 de 3/4’, juntas a tope”, 2019.,” 2007.
- [21] P. I. Carlos and E. Flores, “Soldadura por arco eléctrico Smaw, 2018.” [Online]. Available: <http://www.drweld.com/smaw.html>
- [22] “O. Tamayo ‘Procesos de Soldadura arco eléctrico’, 2022.”
- [23] J. Alberto and A. Schafer, “‘Soldadura’. 2019.”
- [24] “A. Ochoa ‘Procesos y tipos de soldadura’, 2017”.
- [25] R. Lazarte Guerrero, “Soldadura de Acero Corrugado ASTM a-706,” *VSIP*, oct. 25, 2007.
- [26] V. Anzures, “Bienestar Laboral,” *PEMEX*, jul. 12, 2018.
- [27] R. Ortúzar Maturana, “Mecánica de Fractura en Estructuras Navales,” *DOCPLAYER*, oct. 02, 1999.
- [28] “T. Reyes ‘Ensayo de Tracción’ 2017.,” pp. 1–10.
- [29] G. D. Westfal, “Física para ingeniería y ciencias,” *IDOC PUB*, jun. 12, 2014.

- [30] “A. López ‘Capítulo 3- Ensayo de tracción- Introducción’, 2019.”
- [31] D. Mejía Almeida and R. E. Tarco Muñoz, “Ensayo de tracción en metales,” *Couse Hero*, Apr. 23, 2018.
- [32] “C. Rodríguez, ‘Estructura de los Materiales para varilla corrugada ASTM A706’, 2019.”.
- [33] “C. Bastidas ‘Fundamentos de Química- Práctica 4 espectrometría’, 2017.”
- [34] “S. Flores, ‘Metalografía introducción’, 2018.”
- [35] A. C. García Bórquez and M. Moranchel, “Análisis de activación neutrónica en el acero de un reactor nuclear tipo BWR para su estudio sin riesgos radiológicos,” *UNAM*, Dec. 02, 2012.
- [36] R. Alfaro Salazar and S. Leyton Girón, “Satisfacción laboral y su relación con algunas variables ocupacionales en tres municipalidades,” *Slideshare*, Jul. 12, 2012.

## ANEXOS

FMX 52U0016      Optik 52U0017

Sample      :

Alloy      : FE\_100      Mode      : PA 31/05/2022 16:00:13

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
2	97.9	0.301	0.0983	1.36	0.0200	0.0324	0.0730
3	98.0	0.274	0.0992	1.32	0.0196	0.0311	0.0729
4	97.9	0.284	0.0993	1.37	0.0186	0.0315	0.0730
<b>Average</b>	<b>97.9</b>	<b>0.286</b>	<b>0.0989</b>	<b>1.35</b>	<b>0.0194</b>	<b>0.0317</b>	<b>0.0730</b>

	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti
2	0.0061	0.0402	< 0.0010	< 0.0010	0.0648	< 0.0005	0.0048
3	0.0065	0.0398	< 0.0010	0.0015	0.0630	< 0.0005	0.0033
4	0.0058	0.0371	< 0.0010	< 0.0010	0.0633	< 0.0005	0.0037
<b>Average</b>	<b>0.0061</b>	<b>0.0390</b>	<b>&lt; 0.0010</b>	<b>0.0011</b>	<b>0.0637</b>	<b>&lt; 0.0005</b>	<b>0.0039</b>

	V	W	Pb	Sn	B	Ca	Zr
2	0.0010	< 0.0100	0.0179	0.0098	0.0020	< 0.0001	0.0092
3	0.0013	< 0.0100	0.0192	0.0098	0.0018	0.0001	0.0096
4	0.0011	< 0.0100	0.0208	0.0096	0.0022	< 0.0001	0.0095
<b>Average</b>	<b>0.0011</b>	<b>&lt; 0.0100</b>	<b>0.0193</b>	<b>0.0097</b>	<b>0.0020</b>	<b>&lt; 0.0001</b>	<b>0.0094</b>

	Zn	Bi	As	Se	Sb
2	0.0020	0.0120	0.0060	0.0094	0.0125
3	0.0021	0.0115	0.0038	0.0084	0.0122
4	0.0021	0.0109	0.0052	0.0085	0.0108
<b>Average</b>	<b>0.0020</b>	<b>0.0115</b>	<b>0.0050</b>	<b>0.0088</b>	<b>0.0118</b>

**Anexo 1.** Promedio componentes químicos Adelca.

FMX 52U0016      Optik 52U0017

Sample      :

Alloy      : FE\_100      Mode      : PA 31/05/2022 16:14:12

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
1	98.0	0.277	0.0990	1.36	0.0193	0.0317	0.0745
2	97.9	0.291	0.0970	1.38	0.0198	0.0350	0.0746
6	98.0	0.262	0.0901	1.37	0.0198	0.0312	0.0725
7	97.9	0.271	0.0937	1.38	0.0193	0.0327	0.0729
<b>Average</b>	<b>97.9</b>	<b>0.275</b>	<b>0.0950</b>	<b>1.37</b>	<b>0.0195</b>	<b>0.0327</b>	<b>0.0736</b>

	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti
1	0.0058	0.0391	< 0.0010	< 0.0010	0.0645	< 0.0005	0.0031
2	0.0063	0.0392	< 0.0010	< 0.0010	0.0665	< 0.0005	0.0033
6	0.0058	0.0388	< 0.0010	< 0.0010	0.0651	< 0.0005	0.0032
7	0.0059	0.0383	< 0.0010	< 0.0010	0.0644	< 0.0005	0.0022
<b>Average</b>	<b>0.0060</b>	<b>0.0388</b>	<b>&lt; 0.0010</b>	<b>&lt; 0.0010</b>	<b>0.0651</b>	<b>&lt; 0.0005</b>	<b>0.0030</b>

	V	W	Pb	Sn	B	Ca	Zr
1	< 0.0005	< 0.0100	0.0178	0.0094	0.0017	0.0001	0.0095
2	< 0.0005	< 0.0100	0.0216	0.0106	0.0020	0.0001	0.0096
6	< 0.0005	< 0.0100	0.0199	0.0098	0.0016	0.0001	0.0095
7	< 0.0005	< 0.0100	0.0146	0.0102	0.0018	0.0001	0.0091
<b>Average</b>	<b>&lt; 0.0005</b>	<b>&lt; 0.0100</b>	<b>0.0185</b>	<b>0.0100</b>	<b>0.0018</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0094</b>

	Zn	Bi	As	Se	Sb
1	0.0020	0.0111	0.0036	0.0085	0.0117
2	0.0021	0.0107	0.0040	0.0090	0.0091

**Anexo 2.** Promedio componentes químicos Andec.



FMX 52U0016      Optik 52U0017  
 Sample    :  
 Alloy     : FE\_100    Mode       : PA 31/05/2022 15:53:36

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
2	97.5	0.288	0.146	1.31	0.0183	0.0674	0.188
4	97.5	0.298	0.145	1.33	0.0203	0.0682	0.185
5	97.5	0.312	0.148	1.32	0.0198	0.0670	0.186
<b>Average</b>	<b>97.5</b>	<b>0.300</b>	<b>0.146</b>	<b>1.32</b>	<b>0.0195</b>	<b>0.0676</b>	<b>0.187</b>

	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti
2	0.0118	0.0849	< 0.0010	0.0031	0.248	< 0.0005	0.0047
4	0.0117	0.0835	< 0.0010	0.0033	0.243	< 0.0005	0.0054
5	0.0129	0.0851	< 0.0010	0.0035	0.257	< 0.0005	0.0056
<b>Average</b>	<b>0.0122</b>	<b>0.0845</b>	<b>&lt; 0.0010</b>	<b>0.0033</b>	<b>0.249</b>	<b>&lt; 0.0005</b>	<b>0.0052</b>

	V	W	Pb	Sn	B	Ca	Zr
2	0.0156	< 0.0100	0.0231	0.0166	0.0027	0.0001	0.0093
4	0.0163	< 0.0100	0.0262	0.0172	0.0025	0.0002	0.0097
5	0.0168	< 0.0100	0.0203	0.0168	0.0025	0.0002	0.0098
<b>Average</b>	<b>0.0163</b>	<b>&lt; 0.0100</b>	<b>0.0232</b>	<b>0.0169</b>	<b>0.0026</b>	<b>0.0002</b>	<b>0.0096</b>

	Zn	Bi	As	Se	Sb
2	0.0043	0.0110	0.0052	0.0097	0.0070
4	0.0046	0.0112	0.0057	0.0102	0.0087
5	0.0049	0.0124	0.0050	0.0104	0.0103
<b>Average</b>	<b>0.0046</b>	<b>0.0115</b>	<b>0.0053</b>	<b>0.0101</b>	<b>0.0087</b>

**Anexo 3.** Promedio componentes químicos Novacero.

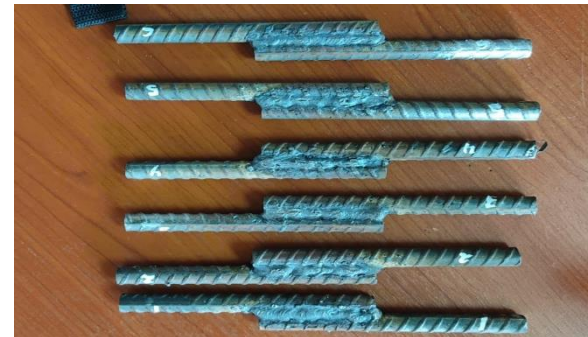
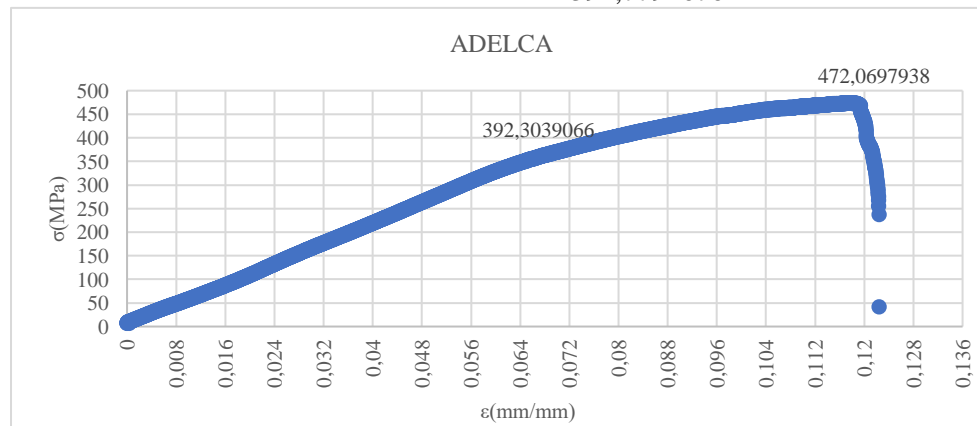


**Anexo 4.** Ensayo de Espectrometría.

## UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

DATOS ENSAYO DE TRACCIÓN							
<b>MATERIAL</b>	ASTM-A706	<b>FABRICANTE</b>	ADELCA	<b>GRADO</b>	A-42	<b>NORMA</b>	ISO 6892-1
<b>EQUIPO</b>	TEST RESOURCES						
DATOS OBTENIDOS							

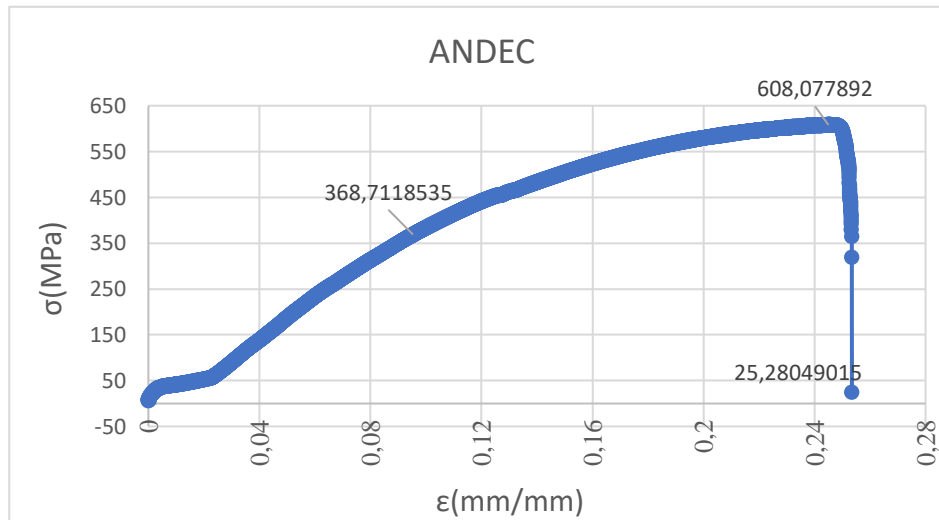
RESISTENCIA ULTIMA A LA TRACCIÓN MIN	RESISTENCIA A LA FLUENCIA	RESISTENCIA A LA ROTURA	MÓDULO DE ELASTICIDAD	CARGA RUPTURA	CARGA DE FLUENCIA
Mpa	Máxima Mpa	Mpa	Mpa	N	N
472,06979	392,3039066 Mínima Mpa 391,7791676	-54,5310195	5071,51467	-6167,313	44368,5267



**Anexo 5.** Ficha técnica Adelca.

## UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

DATOS ENSAYO DE TRACCIÓN							
<b>MATERIAL</b>	ASTM-A706	<b>FABRICANTE</b>	ANDEC	<b>GRADO</b>	A-42	<b>NORMA</b>	ISO 6892-1
<b>EQUIPO</b>	TEST RESOURCES						
DATOS OBTENIDOS							
<b>RESISTENCIA ULTIMA A LA TRACCIÓN MIN</b>	<b>RESISTENCIA A LA FLUENCIA</b>	<b>RESISTENCIA A LA ROTURA</b>	<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD</b>	<b>CARGA RUPTURA</b>	<b>CARGA DE FLUENCIA</b>		
Mpa	Máxima Mpa	Mpa	Mpa	N	N		
608,07789	368,7118535 Mínima Mpa 368,3011422	25,28049015	3811,658162	2859,15609	41700,3284		



**Anexo 6.** Ficha Técnica Andec.

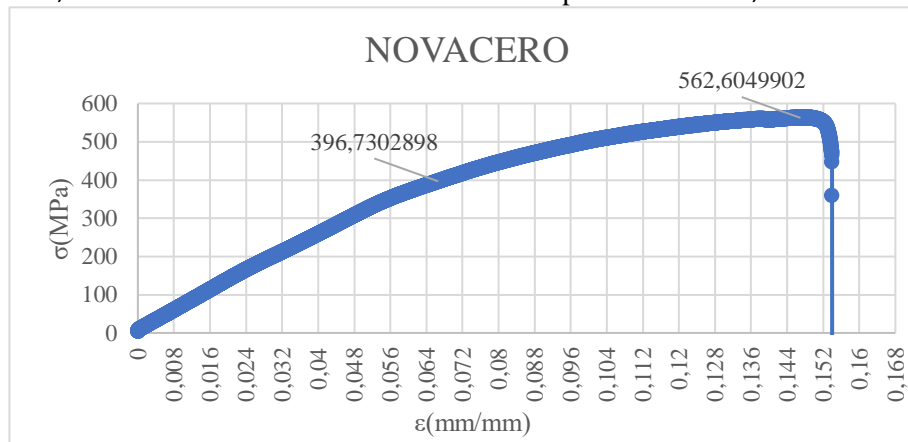
## UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

### DATOS ENSAYO DE TRACCIÓN

<b>MATERIAL</b>	ASTM-A706	<b>FABRICANTE</b>	NOVACERO	<b>GRADO</b>	A-42	<b>NORMA</b>	ISO 6892-1
<b>EQUIPO</b>	TEST RESOURCES						

### DATOS OBTENIDOS

RESISTENCIA ULTIMA A LA TRACCIÓN MIN	RESISTENCIA A LA FLUENCIA	RESISTENCIA A LA ROTURA	MÓDULO DE ELASTICIDAD	CARGA RUPTURA	CARGA DE FLUENCIA
Mpa	Máxima Mpa	Mpa	Mpa	N	N
562,60499	396,7302898	-29,31898149	5917,320261	-3315,8987	44869,1389
	Mínima Mpa				



Anexo 7. Ficha técnica Novacero.

---

## DUREZA

**Probetas**

**Material base**

**Soldadas**



**Adelca**





---

**Anexo 8. Dureza Adelca.**

---

---

## DUREZA

---

---

**Probetas**

**Material base**

**Soldadas**



**Andec**





---

**Anexo 9.** Dureza Andec.



---

---

**DUREZA**

---

---

**Probetas**

**Material base**

**Soldadas**



**Novacero**





---

**Anexo 10. Durezza Novacero.**

Composición química (típica) del metal depositado:				
C 0,04%; Mn 0,94%; Si 0,28%; P 0,015%; S 0,009%; Cr 0,06%; Ni 2,49%; Mo 0,02%				
Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.5-96):				
Tratamiento Térmico	Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte	Requerimientos	Energía Absorbida Ch-v	Requerimientos
605°C x 1 hr.	Resistencia a la tracción : 610 MPa Límite de fluencia : 520 MPa Alargamiento en 50 mm : 26%	550 MPa 460 MPa 19%	60J a -59°C	27J a -59°C
Amperajes recomendados:				
Diámetro mm	Longitud mm	Amperaje		Electrodos x kg aprox.
		mín.	máx.	
*2,4	300	70	100	66
3,2	350	100	150	32
4,0	350	140	200	25
4,8	350	180	250	11

**Anexo 11.** Características químicas y mecánicas electrodo E8018-C1 [20].

Composición química (típica) del metal depositado:				
C 0,06%; Mn 1,05%; Si 0,49%; P 0,015%; S 0,010%				
Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.1/A5.1M-04):				
Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte	Requerimientos	Energía Absorbida Ch-v	Requerimientos	
Resistencia a la tracción : 535 MPa Límite de fluencia : 445 MPa Alargamiento en 50 mm : 30%	490 MPa 400 MPa 22%	130J a -30°C	27J a -30°C	
Amperajes recomendados:				
Diámetro mm	Longitud mm	Amperaje		Electrodos x kg aprox.
		mín.	máx.	
2,4	300	70	120	55
3,2	350	120	150	28
4,0	350	140	200	20
4,8	350	200	275	14

**Anexo 12.** Características químicas y mecánicas electrodo E7018-RH [20].