

**CARACTERIZACIÓN Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE MÉNSULAS USADAS
EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA EN EPM.**

ÓSCAR IVÁN ROJAS GIRALDO

**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MATERIALES
MEDELLÍN
2015**



energía | gas natural | aguas

CARACTERIZACIÓN Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE MÉNSULAS USADAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA EN EPM.

**Informe Semestre de Industria
ÓSCAR IVÁN ROJAS GIRALDO**

**Requisito para optar por el título de
Ingeniero de Materiales**

**Asesores:
GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA
Profesional Técnico Distribución
Unidad Centro de excelencia técnica, normalización y especificaciones.
Grupo EPM**

**RICARDO ARISTIZÁBAL SIERRA
Profesor del Departamento de Ingeniería de Materiales
Universidad de Antioquia**

**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MATERIALES
MEDELLÍN
2015**

*Le doy gracias a Dios por cada una de las bendiciones que recibo a diario,
así como por permitirme conocer lugares y personas maravillosas.*

*Mis gracias a mi adorable madre, que con su lucha incansable me ha
apoyado en cuanto locura se me ocurre llevándome a ser la persona soy.*

*Este trabajo se lo dedico a los dos motores de mi vida, mi madre y mi
hermano, Dora Elena Giraldo Chaparro y Miguel Ángel Rojas Giraldo.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Empresas Públicas de Medellín y en especial, al Centro de Excelencia Técnica (CET) Normalización y Especificación (N&E) por abrirme las puertas durante este semestre de industria, que junto con la experiencia de cada uno de los miembros de este equipo tanto en lo técnico como en calidad humana, dejan en mí huellas imborrables que estarán presentes durante toda mi vida.

Muchas gracias a Andrés Mauricio Vanegas Restrepo y Helmut Alexander Moncada Ossa, integrantes del CET N&E, que junto con su experiencia técnica en el manejo de software de simulación mecánica y de diseño me apoyaron en el desarrollo de este proyecto.

Al laboratorio EATIC de EPM, y en especial a John Jairo Marulanda Gómez, que siempre estuvieron dispuestos a colaborar y escuchar mis inquietudes técnicas.

A mis compañeros de práctica Lina María Builes González y Juan Gonzalo Cuartas Bouhot, que junto con nuestras tardes de tertulia, compañía y apoyo durante el desarrollo de este proyecto, dejan un millar de excelentes recuerdos.

Infinitas gracias a Gabriel Jaime Carmona Zapata que gracias a su calidad humana como compañero, amigo y padre me deja muchos modelos de vida a seguir. Gracias por estar siempre dispuesto a asesorarme, apoyarme y escucharme.

Muchas gracias a la profesora Claudia Patricia Serna Giraldo, que estuvo siempre dispuesta a orientarme con cada inquietud que se presentó durante mi instancia en EPM.

Tengo un sentimiento de gratitud muy especial por el profesor Ricardo Emilio Aristizábal Sierra por ser más que mi asesor; por ser mi acompañante durante este proceso, que gracias a su colaboración en la ejecución de ensayos e interpretación de resultados, permitieron tener éxito en este proyecto.



energía | gas natural | aguas

Mil gracias al grupo de Investigación GIMACYR, y en especial a Fabio Vargas Galvis y a Esperanza López Gómez, que fueron claves durante mi formación como profesional y como persona.

Agradezco a mi Alma Mater, la Universidad de Antioquia, por acogerme como su estudiante; gracias porque con la calidad del cuerpo docente, de los grupos de investigación, sus estudiantes y sus espacios formadores, me marcan como persona y futuro Ingeniero de Materiales.



TABLA DE CONTENIDO

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E.P.S. (EPM)	1
INTRODUCCIÓN	2
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1. MÉNSULA-BRAZO TIPO "L" (<i>TANGENT BRACKET</i>)	4
1.1.1. <i>Historia</i>	5
1.1.2. <i>Materiales y procesos de fabricación</i>	6
➤ Piezas de Acero estructural soldadas.....	6
✓ Proceso de soldadura GMAW.....	8
✓ Soldabilidad de los aceros.....	11
➤ Piezas por proceso de fundición	12
✓ Fundición de la aleación de Aluminio 356-T6.....	13
✓ Hierro nodular o dúctil.	15
1.1.3. <i>Resistencia a la corrosión</i>	17
➤ Galvanizado.....	18
2. OBJETIVOS	20
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	20
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. METODOLOGÍA	21
3.1. ANÁLISIS DE FALLA MÉNSULA DE 44 kV	22
3.1.1. <i>Tipo de falla, mecanismo de fractura y zona de la unión soldada</i>	22
3.1.2. <i>Composición química del metal base</i>	22
3.1.3. <i>Medida del espesor de Galvanizado (Zinc)</i>	22
3.2. ANÁLISIS DE LAS JUNTAS SOLDADAS DE LA MÉNSULA DE 44 kV.	23
3.3. ENSAYOS DE FLEXIÓN Y TRACCIÓN A LAS MÉNSULAS ACTUALES DE 13.2 Y 44 kV.	23
3.4. MAGNITUDES Y DIRECCIONES DE ESFUERZOS SOPORTADOS POR LA MÉNSULA.....	24
3.5. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE DISTINTOS TIPOS DE MÉNSULAS POR ELEMENTOS FINITOS.	26

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	29
4.1. INFORMACIÓN RECOPIADA	29
4.1.1. Descripción geométrica de la ménsula usada actualmente por EPM.....	29
4.1.2. Soldabilidad del acero especificado en la RA7-116.....	29
4.1.3. Cargas estipuladas por los proveedores.	31
4.1.4. Especificaciones técnicas de otras comercializadoras de energía eléctrica.	33
4.2. ANÁLISIS DE FALLA DE LA MÉNSULA DE 44 kV	34
4.2.1. Tipo de falla, mecanismo de fractura y zona de la unión soldada.....	34
4.2.2. Composición química del metal base.....	36
4.2.3. Medida del espesor de Galvanizado (Zinc).....	37
4.3. ANÁLISIS DE JUNTAS SOLDADAS DE LAS MÉNSULAS DE 44 Kv.....	38
4.3.1. Inspección visual de la soldadura.....	38
4.3.2. Líquidos penetrantes juntas soldadas.....	38
4.3.3. Análisis macroscópico de las juntas soldadas.	40
4.3.4. Análisis microscópico de las juntas soldadas (evaluación de la zona afectada térmicamente).....	42
4.4. ENSAYOS DE FLEXIÓN Y TRACCIÓN A MÉNSULAS ACTUALES DE 13.2 Y 44 kV.....	46
4.4.1. Ensayos de tracción.....	46
4.4.2. Ensayos de Flexión.....	47
4.4.3. Caracterización de la grieta generada en la ménsula de 44 kV, después de ensayos de flexión.	48
4.4.3.1. Micrografía de la soldadura.....	50
4.5. MAGNITUDES Y DIRECCIONES DE ESFUERZOS SOPORTADOS POR LAS MÉNSULAS.....	51
4.6. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE DISTINTOS TIPOS DE MÉNSULAS POR ELEMENTOS FINITOS.	52
4.6.1. Esfuerzos en flexión de 14.23 kN (13,2 kV) y de 17.79 kN (44 kV)....	52
4.6.2. Esfuerzos según los resultados de PLS CADD con un factor de 2.5; 5.09 kN (13,2 kV) y de 8.925 kN (44 kV)	54
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES.....	58

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 59

ANEXOS..... 64

ANEXO 1. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA MEJORADA PARA MÉNSULAS
FABRICADAS POR PERFILERÍA CON JUNTAS SOLDADAS..... 1

ANEXO 2. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA PARA MÉNSULAS FABRICADAS EN
FUNDICIÓN NODULAR O ACERO. 1



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes tipos de Herrajes.....	3
Figura 2. Ménsula diseño HENDRIX.....	4
Figura 3. Esquema de las características generales de GMAW.....	9
Figura 4. Efecto del carbono en la Soldabilidad del acero	12
Figura 5. Ensayo de tracción A) Ménsula de 13,2 kV; B) Ménsula de 44 kV	24
Figura 6. Ensayos de Flexión A) Ménsula de 13.2 kV B) Ménsula de 44 kV ..	24
Figura 7. Imagen de simulación PLS CADD	26
Figura 8. Diseños ménsulas de 13.2 kV. A) Perfilería en acero estructural NTC 1920-NTC 1985 y B) Fundición nodular.....	27
Figura 9. Diseños ménsulas de 44 kV. A) Perfilería en acero estructural NTC 1920-NTC 1985 C) Fundición nodular.....	27
Figura 10. Descripción de las partes de la ménsula actual.....	30
Figura 11. Geometrías ofrecidas por los proveedores.....	33
<i>Figura 12. Tapa de agarre que falló</i>	<i>34</i>
<i>Figura 13. Tapa de agarre que falló decapada</i>	<i>35</i>
Figura 14. Superficie de fractura	35
Figura 15. Micrografía de unión de falla.....	36
Figura 16. Junta soldada	38
Figura 17. Defectos, detectados por líquidos penetrantes, en la soldadura	39
Figura 18. Ensayo de líquidos penetrantes en soldadura en tapa de agarre	39
Figura 19. Ensayo de líquidos penetrantes en la soldadura de la base con el cuerpo de la ménsula de 44 kV	40
Figura 20. Junta Soldada para análisis macroscópico y microscópico.....	41
Figura 21. Macrografías de las juntas soldadas.....	42
Figura 22. Micrografía en la junta soldada de mayor esfuerzo A) Soldadura (Metal de aporte) B) Zona afectada térmicamente C) Metal base.....	44
Figura 23. Micrografía de soldadura de la tapa de agarre A) Soldadura B) Zona afectada térmicamente C) Metal base	45
Figura 24. Base con problemas de contacto efectivo.	46
Figura 25. Agrietamiento producto de ensayo de flexión.....	49
Figura 26. Soldadura externa y soldadura interna (refuerzo)	50

Figura 27. Macrografía de corte perpendicular a la grieta generada en ensayo de flexión..... 50

Figura 28. Ménsulas usadas actualmente A) 13.2 kV B) 44 Kv..... 53

Figura 29. Ménsulas en hierro nodular A, B, C) 13,2 kV; D, E, F) 44 kV. 53

Figura 30. Comportamiento de la ménsula de 13.2 con esfuerzos dados por PLS CADD. A) AISI SAE 1020 B) Hierro nodular..... 55



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición química de aceros usados en perfilería	7
Tabla 2. Propiedades mecánicas de los aceros usados en perfilería.	7
Tabla 3. Variables vs las características de la junta soldada	10
Tabla 4. Soldabilidad del acero en función del carbono equivalente	12
Tabla 5. Composición de la aleación de aluminio 356 y la A356.	13
Tabla 6. Propiedades de las aleaciones 356, 356-T6 y la A356-T6.	14
Tabla 7. Clasificación de la fundición nodular vs características mecánicas mínimas.....	17
Tabla 8. Condiciones climáticas de la simulación.....	25
Tabla 9. Características de cables	25
Tabla 10. Propiedades mecánicas de los distintos materiales de las ménsulas simuladas.....	27
Tabla 11. Características de ménsula por proveedor	31
Tabla 12. Comparación de las especificaciones de empresas de distribución de energía eléctrica en el país.....	34
Tabla 13. Composición química por espectrómetro de emisión óptica	36
Tabla 14. Espesor del galvanizado o recubrimiento de zinc	37
Tabla 15. Resultados de flexión ménsula de 13.2 kV.....	47
Tabla 16. Resultados de flexión ménsula de 44 kV.....	48
Tabla 17. Resultados de cargas soportadas por la ménsula de 13.2 kV	51
Tabla 18. Resultados de cargas soportadas por la ménsula de 44 kV	51

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Carbono equivalente según la WII].....	12
Ecuación 2. Reacción del Zinc con el aire y la humedad	19

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E.P.S. (EPM)

Es una empresa industrial y comercial, propiedad del municipio de Medellín, que tiene como objetivo social la prestación de servicios públicos domiciliarios tales como de acueducto, alcantarillado, energía, distribución de gas combustible, entre otros.

Actualmente, entre las múltiples actividades que desarrolla, el máximo esfuerzo está enfocado en la distribución y transmisión de energía eléctrica, lo que ha hecho que esta empresa antioqueña, en los últimos años haya tenido una expansión no sólo en el país sino que haya incursionado en el mercado internacional.

Dada la nueva estructura de E.P.M, se ha dividido en áreas con objetivos y metas específicas, las cuales apuntan hacia un objetivo general de la empresa. Entre esas áreas se encuentra la vicepresidencia de proyectos e ingeniería, la cual a su vez se divide en gerencias. La gerencia en la cual se desarrolló el presente trabajo fue en la de Centro de Excelencia Técnica en la unidad de Normalización y Especificación.

Dicha unidad tiene como objetivo fundamental la evaluación con sentido crítico de los distintos tipos de componentes utilizados en las redes, tanto de distribución como de transmisión de energía eléctrica, a partir de normas nacionales e internacionales que permiten establecer las condiciones que deben ser exigidas a los proveedores para garantizar un buen funcionamiento de los mismos; y de esta manera brindar un servicio de mejor calidad a los usuarios con un suministro constante de energía.

INTRODUCCIÓN

Entre los componentes claves, usados en redes de distribución, que la unidad Centro de Excelencia Técnica, Normalización y Especificación estudia se encuentran los herrajes, que son elementos metálicos de protección, soporte, fijación, suspensión y/o amortiguación usados en redes de distribución de energía por el grupo de Empresas Públicas de Medellín (EPM), los cuales deben cumplir con ciertas propiedades físico-químicas y mecánicas para asegurar su buen funcionamiento [1-2], que dependen de diversos factores como: la materia prima utilizada para su fabricación, los procesos de manufactura utilizados para su producción, los tratamientos térmicos o superficiales a los que son sometidos, su diseño entre otros.

Dichos herrajes cumplen un papel fundamental en la instalación de equipos y redes, sin los cuales se dificultaría el transporte de energía eléctrica a los distintos puntos donde es requerida.

Por esta razón, para garantizar la eficiencia y la seguridad de los productos que emplea EPM en las instalaciones de redes aéreas, se vuelve una tarea indispensable evaluar cuidadosamente las propiedades de cada uno de los tipos de herrajes, siendo así que el objetivo de este trabajo, se enfocó en el estudio de ménsulas con el fin de detectar y sugerir soluciones a fallas que se presentaban; identificar los puntos de falla potenciales así como establecer las condiciones de evaluación y caracterización que ayuden en la modificación de la especificación técnica actual para que empresas públicas de Medellín garantice la seguridad, perdurabilidad y correcta funcionalidad de los sistemas de distribución.

1. MARCO TEÓRICO

Las redes de distribución son medios que permiten el paso de energía y potencia a diversos lugares de consumo. Dichas redes pueden estar dispuestas subterráneamente o de forma aérea, esta última requiere del empleo de herrajes que permitan realizar todo el diseño de las líneas aéreas de media tensión [2].

Los herrajes son elementos, normalmente metálicos de gran importancia que facilitan la unión, el soporte, la fijación y el amortiguamiento de distintos componentes que están presentes en las redes de energía eléctrica, Figura 1. De acuerdo a su diseño y función deben cumplir con ciertas propiedades eléctricas y mecánicas, además de presentar buena resistencia contra la acción corrosiva, bien sea por la naturaleza del material o por modificaciones superficiales [3-7].



Figura 1. Diferentes tipos de Herrajes [8]

Adicional a las propiedades características del material deben tener superficies continuas, sin fisuras, sin desprendimientos, sin superposición de capas, sin sopladuras, libres de rebabas o bordes agudos, para garantizar el buen funcionamiento y la seguridad de los operarios [5].

Entre la variedad de herrajes de gran utilidad en los sistemas de distribución de energía y potencia está la ménsula, la cual es la encargada de dar soporte a los conductores y espaciadores empleados en media tensión. Dicha ménsula fue objeto de estudio, para establecer condiciones mecánicas reales para las cuales debe de estar diseñadas, los puntos donde son más críticos los esfuerzos en la pieza y la evaluación del material con la que serán fabricadas con el fin de encontrar una buena relación costo-beneficio que mejore la prestación de servicio por parte del grupo EPM.

1.1. MÉNSULA-BRAZO TIPO "L" (TANGENT BRACKET)

Se caracterizan por ser empleadas en la construcción de líneas de distribución de energía eléctrica del sistema de cable cubierto para soportar y darle amarre al cable mensajero, del cual se suspenden los cables de las fases de niveles de tensión, tanto de 13.2 kV como de 44 kV, con ayuda de aisladores (espaciadores) encargados de separar las líneas. En general, constan de un soporte y un cuerpo principal en forma de percha que va unido al poste, lo cuales pueden ser en una o dos piezas dependiendo del material y el proceso de fabricación, Figura 2. En el extremo, la ménsula consta de una grapa o mordaza biplaca, la cual es la que cumple la función de soportar o amarrar el cable descrito anteriormente [2, 9].

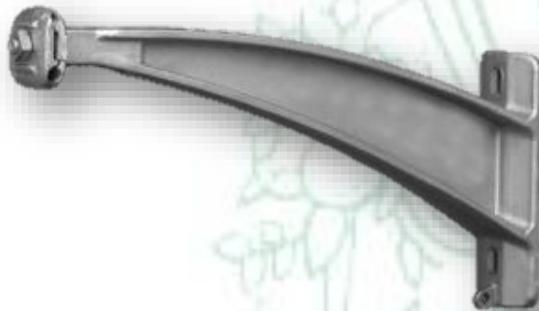


Figura 2. Ménsula diseño HENDRIX [10]

Puesto que las ménsulas están diseñadas para soportar el cable mensajero junto con las fases conductoras, deben tener la resistencia mecánica adecuada para soportar cargas considerables en flexión, las cuales

dependen de las condiciones climáticas de temperatura, viento y de espaciamiento entre soportes, entre otros.

Por tal motivo, de acuerdo a las necesidades que demanda cada empresa, por su ubicación geográfica, alrededor del mundo se comercializan ménsulas de diseño similar, pero con variaciones en el material que se usa para fabricarlas, entre las que se encuentran:

- ✚ Las constituidas principalmente por acero estructural para el soporte, que va unido al poste, y una grapa generalmente de fundición [9]. La fabricación de ésta, requiere la unión de cada una de las partes mediante soldadura, lo cual demanda un cuidado especial para garantizar su perdurabilidad.
- ✚ Las fabricadas (tanto el soporte como la grapa) en fundición de aluminio o fundición nodular, garantizando mayores resistencias mecánicas a nivel general pero a su vez mayores costos [10-13].

Adicional a la elección del material de fabricación de las ménsulas, para asegurar un buen desempeño, menores riesgos y bajos costos, se debe garantizar una buena resistencia a la corrosión bajo intemperie, por lo que en la especificación actual de EPM para ménsulas, RA7-116, se hace alusión al empleo de un tratamiento superficial de galvanizado en caliente, siguiendo lo estipulado en la norma NTC 2076 cuando esta, por su baja resistencia a la corrosión, lo requiera [14-15].

1.1.1. Historia

La ménsula, brazo tipo “L” o *tangent bracket* empezó a ser usado como accesorio con la creación del sistema cubierto, el cual fue introducido para mejorar la seguridad y la fiabilidad de las redes de distribución aérea de alta tensión en zonas donde el corte de energía eléctrica era muy propenso a que se diera por la caída de árboles o contacto con ramas, así como para aislarlo de lugares vulnerables al incendio y emplearlo en construcciones con vanos más largos [16].

El sistema de conductor cubierto está conformado por tres conductores, con una cobertura protectora, en una configuración triangular suspendidos mediante un espaciador especialmente diseñado, sobre un cable mensajero que a su vez sirve como neutro del sistema. A partir de esta configuración, nació la necesidad de emplear un soporte donde el cable mensajero estuviese apoyado cada cierta distancia. Dicho soporte es un herraje que fue denominado por Hendrix “*tangent bracket*”, y que ahora es de gran utilidad en las empresas dedicadas a la distribución de energía eléctrica.

1.1.2. Materiales y procesos de fabricación

Las ménsulas, como ya se había mencionado, se fabrican de distintos materiales y procesos de acuerdo a las necesidades que se tengan, por lo que a continuación se tratarán, explicando las generalidades de los materiales y procesos a tener en cuenta para la fabricación de las mismas.

➤ **Piezas de Acero estructural soldadas**

Cuando se habla de acero estructural se hace alusión a un tipo de material de gran importancia para miembros estructurales, puesto que sus propiedades combinan alta resistencia, tanto en tracción como en compresión, alta capacidad de deformación reversible (alto módulo de elasticidad), facilidad en la obtención de piezas de diversas geometrías, como barras, placas, perfiles, tuberías, piezas laminadas, etc., costos de fabricación relativamente bajos ideales en la obtención de elementos que soporten cargas importantes [17]. Una desventaja notable, identificada desde sus primeros usos, es que requiere de tratamientos de modificación superficial para suplir la baja resistencia a la corrosión, dada a la facilidad con la que reacciona electroquímicamente con el oxígeno del ambiente.

De acuerdo a los requerimientos de esfuerzos a la que será sometida la pieza, las propiedades se pueden variar según su composición química, por lo cual en EPM se han especificado (RA7-116) rangos de composición [9] que están dados por las normas NTC 1920 (ASTM A36/A36M) o la NTC 1985

(ASTM A572/A 572M: 2012), las cuales indican que la composición del acero estructural debe cumplir con las condiciones listadas en la Tabla 1 [18-19].

Tabla 1. Composición química de aceros usados en perfilería [9, 18-19]

Tipo de Material	Perfiles	
	NTC 1920	NTC 1985 (grado 50)
% Carbono Máx.	0.26	0.23
% Fósforo Máx.	0.040	0.040
% Azufre Máx.	0.050	0.050
% Manganeso	-----	1.35
% Silicio Máx.	0.40	0.30
% Vanadio	-----	0.01-0.15
% cobre Mín	0.20	-----

Además de las especificaciones en composición química que deberán tener los materiales usados para la fabricación de las ménsulas, se deben cumplir las propiedades de la Tabla 2, que son una exigencia de cumplimiento en la misma especificación.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los aceros usados en perfilería [9, 18-19].

Propiedad	NTC 1920		NTC 1985-grado 50	
	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa
Resistencia a la tracción.	58-80	400-550	65	450
Límite de fluencia	36	250	50	345
Elongación en 50 mm mín.	21	21	18-21	18-21

Las anteriores características, llevaron a los aceros estructurales a ser una alternativa llamativa para la fabricación de ménsulas con una buena resistencia y a bajos costos comparados con otros materiales y procesos.

Las ménsulas generalmente se fabrican por la unión de varias partes mediante un proceso de soldadura GMAW, el cual se explica de manera general en las secciones siguientes.

Dicha unión de las partes de la pieza mediante soldadura debe garantizar condiciones de compatibilidad entre la composición del acero estructural y el tipo de material de aporte empleado para realizar las juntas, además de que requiere controles rigurosos durante el proceso con el fin de garantizar que la junta soldada soporte los esfuerzos que se generan cuando la ménsula es puesta en servicio.

✓ **Proceso de soldadura GMAW [20]**

GMAW es un proceso de soldadura por fusión, que se emplea actualmente en la fabricación ménsulas, brazos tipo L o *tangente brackets*. Se caracteriza por tener dos elementos consumibles, uno es el electrodo que es alimentado a una velocidad constante (pero ajustable), el cual además de ser material de aporte, permite establecer el arco con la pieza (metal base) a soldar. El gas protector, es el segundo elemento consumible, el cual cumple la tarea de desplazar la atmósfera circundante al metal fundido, evitando que a esas temperaturas haya absorción de distintos gases que debiliten la junta soldada (Figura 3). Por otro lado, este tiene un efecto pronunciado sobre las características del arco, del modo de transferencia del metal de aporte, la profundidad de fusión, el perfil del cordón, velocidad de soldadura y la acción de limpieza, de acuerdo a la presión, viscosidad cinemática y las interacciones que pueda tener con el material de aporte.

La regulación del arco puede darse de dos manera, una de ellas es con una tensión constante (velocidad de electrodo constante-ajustable) y una corriente variable la cual cambia de acuerdo a la longitud del arco, siendo mayor para arcos cortos y menor para arcos más largos siendo así que para mayores corriente la tasa de fusión aumenta.

Otra de las maneras con las que es posible regular el arco es utilizando una fuente de alimentación de corriente constante y con una velocidad de detección de voltaje variable, por lo que los cambios en la tensión generan que la velocidad de alimentación del electrodo sea variable. Este tipo de regulación, es limitado para el caso en el que el electrodo es de un diámetro mayor y las velocidades de avance son bajas.

Lo anterior, en cuanto a la formación del arco, pero durante el proceso de soldadura es necesario establecer el tipo de transferencia (globular, por corto-circuito o spray), características de corriente, de tensión, de velocidad de aplicación del material de aporte, y para eso se debe tener en cuenta:

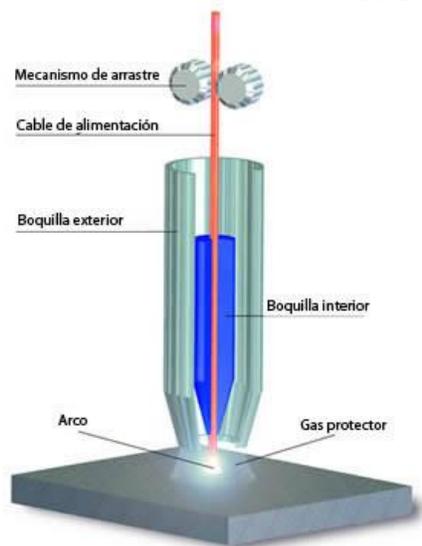


Figura 3. Esquema de las características generales de GMAW [21]

- ✚ Diámetro del electrodo
- ✚ Composición del electrodo
- ✚ Extensión del electrodo desde la punta de la pistola
- ✚ Gas de alimentación

Por otro lado es necesario en GMAW controlar algunas variables, para que la penetración, la geometría y la calidad de la soldadura sean las adecuadas y la pieza soldada tenga un desempeño satisfactorio. Entre estas variables están:

- ✚ **La corriente de soldadura**, la cual va acompañada de la velocidad de alimentación. A corrientes elevadas la penetración, las tasas de fusión y de deposición son mayores, pero también hay más salpicadura.
- ✚ **Tensión del arco (longitud)**. A valores mayores tiende a aplanar el cordón y aumentar la anchura del cordón y a menores valores el cordón es más estrecho de corona más alta.
- ✚ **Velocidad de desplazamiento** o **deposición del cordón**. Al reducirla la deposición de relleno por unidad de longitud aumenta y la penetración

disminuye por incidencia del arco sobre la piscina fundida y no sobre el metal base. A altas velocidades, hay menor ganancia de calor del metal base.

- ✚ **Extensión del electrodo.** Un aumento en la extensión provoca un aumento en la resistencia eléctrica, generando calor adicional, y el cordón es estrecho de alta corona. La extensión óptima varía desde 6.4 a 13 mm en cortocircuito y en pulverización y transferencia globular desde 13 a 25 mm.
- ✚ **Orientación del electrodo** (ángulo de pistola). Es característica para cada tipo de junta a soldar, por ejemplo para soldadura en filete el ángulo debe ser de aproximadamente 45° respecto al elemento vertical
- ✚ **Diámetro del electrodo.** Para diámetros mayores, se requiere el uso de corrientes superiores para que se proporcione la suficiente energía para su fusión.

La selección adecuada de los anteriores parámetros está dada por la habilidad y experiencia del operario. En la Tabla 3, se muestra los criterios globales de cómo las variables de corriente, voltaje, velocidad de desplazamiento, extensión y diámetro del electrodo, % de gas protector y ángulo de pistola afectan la penetración, la velocidad de deposición, el tamaño de junta y el ancho de junta.

Adicional al control de los parámetros mostrados en la tabla 3, el operario debe tener un buen conocimiento en soldadura, puesto que hay que tener en cuenta el tipo de material base, la composición del electrodo, la posición de la soldadura, geometría a soldar, y los requisitos de calidad, además de la selección de las variables de la Tabla 3. Por otro lado, el operario también debe poseer conocimiento en inspección de juntas soldadas para que tenga el criterio necesario para predecir si la junta soldada es de buena o mala calidad, mediante el reconocimiento de defectos, como determinar las causas y las posibles soluciones [22,23].

Tabla 3. Variables vs las características de la junta soldada [20]

<i>Variables</i>	<i>Cambios deseados</i>							
	Penetración		Velocidad de deposición		Tamaño de cordón		Ancho de cordón	
	Aumentar	Disminuir	Aumentar	Disminuir	Aumentar	Disminuir	Aumentar	Disminuir

Corriente y velocidad alimentación	Aumentar	Disminuir	Aumentar	Disminuir	Aumentar	Disminuir	Poco efecto	Poco efecto
Voltaje	Ningún efecto	Ningún efecto	Poco efecto	Poco efecto	Poco efecto	Poco efecto	Aumentar	Disminuir
Velocidad desplazamiento	Ningún efecto	Ningún efecto	Poco efecto	Poco efecto	Disminuir	Aumentar	Disminuir	Aumentar
Extensión electrodo	Disminuir	Aumentar	Aumentar	Disminuir	Aumentar	Disminuir	Disminuir	Aumentar
Diámetro electrodo	Disminuir	Aumentar	Disminuir	Aumentar	Poco efecto	Poco efecto	Poco efecto	Poco efecto
% gas protector	Aumentar	Disminuir	Poco efecto	Poco efecto	Poco efecto	Poco efecto	Aumentar	Disminuir
Ángulo pistola	Arrastrar*	Empujar*	Poco efecto	Poco efecto	Poco efecto	Poco efecto	Empujar*	Arrastrar*

* Ángulo de arrastre entre 0°-90° y Ángulo de empuje entre 90°-180°

El conjunto de todos estos requerimientos hace el proceso de soldadura dispendioso, riguroso, al momento de establecer los parámetros; y de mucho control durante el proceso que permita producir juntas de excelente calidad.

✓ Soldabilidad de los aceros [17]

Como se mencionó, hay que tener en cuenta la composición del material base que se pretende soldar, debido a que no todos los materiales pueden ser soldados con la misma facilidad y demandan condiciones especiales tanto en el material de aporte como en la temperatura que se alcanza en el momento de realizar la junta, puesto que de acuerdo a la rigurosidad de control, además de las variables y de las condiciones que requiere cada material dependerá la calidad de la junta soldada.

En ese sentido, para el caso del material (NTC 1920 o NTC 1985) con el que son fabricadas las piezas, es necesario tener presente que especialmente la composición química tiene una influencia muy marcada, sobre todo el contenido de carbono, para el caso de aceros estructurales de baja aleación con el que son fabricados los brazos tipo "L".

La facilidad con la que se suelda un acero disminuye con el aumento del carbono o el carbono equivalente (calculado con la Ecuación 1), Figura 4 y Figura 5, trayendo consigo problemas de agrietamiento y endurecimiento

excesivo que lleva a una fragilización de la junta, que deben ser solucionados con tratamientos posteriores a la fabricación de la junta soldada, si no hay defectos presentes en la pieza, con el fin de liberar tensiones que potencialicen la falla.



Figura 4. Efecto del carbono en la Soldabilidad del acero [17]

Tabla 4. Soldabilidad del acero en función del carbono equivalente [17]

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}$$

Ecuación 1. Carbono equivalente según la WII [24]

Dicho endurecimiento está dado por cambios microestructurales, generalmente de austenita a martensita, en el metal base, donde la facilidad con la que estos se generan están dados, además del contenido de carbono, por elementos como el Manganeso, Cromo, Molibdeno y otros, que presentan una influencia en la tendencia a endurecer el material y a su vez disminuir la soldabilidad. De ahí la importancia de la Ecuación 1 desarrollada empíricamente para hallar el carbono equivalente.

➤ **Piezas por proceso de fundición**

Otra de las formas de obtener las ménsulas, es mediante el proceso de fundición de materiales como el aluminio y el hierro nodular. Siendo el proveedor (caso del hierro nodular) quien normalmente define las características mecánicas de las piezas, tal que estas cumplan con la resistencia mínima para ser utilizadas en sistemas de distribución. A continuación se hará un recuento de los materiales típicamente usados para la fabricación de ménsulas fundidas.

✓ **Fundición de la aleación de Aluminio 356-T6**

Actualmente, algunas empresas emplean aleaciones de aluminio, tal como la 356 y A356, usadas en la fabricación de brazos tipo “L” [10], porque, además de las propiedades características del aluminio, presenta alta resistencia a la tracción cuando el contenido de hierro es bajo [25]. La composición del material con el que los fabrican se muestra en la Tabla 5 dada por la norma ASTM B26 o B108.

Tabla 5. Composición de la aleación de aluminio 356 y la A356 [26, 27].

Aleación		Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Otros
ANSI	UNS									
356.0	A03560	Resto	6.5-7.5	0.60*	0.25	0.35*	0.20-0.45	0.35	0.25	0.15
A356.0	A13560	Resto	6.5-7.5	0.20*	0.20	0.10*	0.25-0.45	0.10	0.20	0.15

*Si el contenido de hierro excede el 0.45%, el contenido de magnesio no será menor a la mitad del contenido de hierro.

Con el fin de reforzar esas propiedades, las aleaciones pueden ser mejoradas mediante el empleo de tratamientos térmicos. Para el caso de estas piezas, se emplea un tratamiento de homogenización, llevado a cabo a 520°C-530°C durante 2 a 8 horas, con el fin de llevar el Mg₂Si, compuesto característico en este tipo de aleaciones, a disolución en la solución sólida α -Al la cual queda rica en contenido de silicio y magnesio.

Posteriormente a este tratamiento se realiza un enfriamiento que es acompañado de un tratamiento de envejecimiento artificial, que consiste en calentar la pieza alrededor de 150°C-180°C durante 2 a 8 horas [28], con el fin de provocar la precipitación muy fina del compuesto intermetálico

Mg₂Si por toda la matriz, confiriéndole al material un máximo en la resistencia mecánica.

Al ciclo de los tres pasos de tratamiento térmico se le conoce con el nombre de T6, denominándose a las aleaciones con el nombre de 356-T6 o A356-T6, las cuales obtiene unas propiedades superiores, Tabla 6, con respecto a la aleación sin tratar, que las hacen únicas en diversas aplicaciones.

Tabla 6. Propiedades de las aleaciones 356, 356-T6 y la A356-T6 [26,27].

Aleación		Tratamiento	Resistencia de tracción (ksi)	Límite elástico (ksi)	%min de elongación (2in)	Dureza Brinell a 500kgf con 10 mm ball
ANSI	UNS					
356.0	A03560	F*	19.0-21.0	9.5-10.0	2.0-3.0	55
356.0	A03560	T6	30.0-33.0	20.0-22.0	3.0	70-85
A356.0	A13560	T6	34.0-38.0	24.0-26.0	3.5-5.0	80-90

F* sin tratamiento

Pero, tener una pieza de composición adecuada y tratamientos, térmicos y/o de deformación plástica o combinación de ambos, para mejorar sus propiedades no garantiza tener una pieza de alta calidad, por esto con el fin de generar que la pieza tenga un adecuado desempeño se debe tener una rigurosidad durante el proceso de fabricación, puesto que las fundiciones de aluminio son muy susceptibles a presentar defectos tales como [3]:

- Inclusiones no metálicas que son dadas por la facilidad con la que el aluminio se oxida a alúmina (Al₂O₃) y puesto que el nuevo material formado presenta una densidad mayor que el aluminio, este se sedimenta a una velocidad muy baja, generando la presencia de este cerámico en la pieza de aluminio el cual ocasiona una disminución en la resistencia del material.

Por tal motivo, se hace necesario que durante el proceso de vaciado del aluminio fundido se haga un control riguroso de filtrado, mediante el empleo membranas cerámicas (espumas cerámicas o canales paralelos), con el fin de eliminar la escoria de alúmina y las posibles sales que se generen durante el proceso con el fin buscar la buena calidad de la pieza fundida.

✚ Porosidad que es generada por la facilidad con la que se difunde el hidrógeno en el aluminio fundido que al solidificar lo deja atrapado, generando diversos problemas como reducción de resistencia mecánica y ductilidad, pérdida de calidad superficial y de la facilidad en dejarse tratar térmicamente. El hidrógeno aparece de las reacciones entre el aluminio y el vapor de agua, generando alúmina e hidrógeno, por lo que para poder controlar la presencia de este gas en la pieza, se emplea antes de realizar el vaciado una desgasificación inyectando gases como el Argón o Nitrógeno [29], los cuales atrapan el hidrógeno y lo ayudan a salir. Otro de los mecanismos es adicionando cloruros, para que el hidrógeno reaccione con estos, pero aunque los ácidos son fácilmente removidos generan un costo adicional por la adecuada disposición que se debe hacer a estos ácidos generados durante el proceso.

✓ **Hierro nodular o dúctil.**

Otro material que ha ganado participación en la fabricación de las ménsulas es la fundición nodular que en los últimos años ha despertado gran interés como posibilidad de remplazo de otros materiales debido a la gama de propiedades que puede presentar al variar su microestructura a partir de los diversos tratamientos térmicos a los que puede ser sometida

Este tipo de fundición aparece por la adición de cerio y/o magnesio durante el proceso de fundición, formando grafito esferoidal, produciendo una disminución notable en el agrietamiento producido por la aplicación de *cargas cíclicas*, [30-33] además de generar un amplio rango de propiedades, las cuales son dependientes de la microestructura que se logre.

Debido a la posibilidad de incorporar distintos componentes, en las fundiciones, como elementos de aleación además de sus propiedades inherentes y con la aplicación de tratamientos térmicos que mejoran sus propiedades, se ha incursionado en la aplicación de éstas para reemplazar muchas de las funciones que era de preferencial uso de los aceros, motivos por los cuales ha ganado gran participación en la industria automotriz en la

construcción de ejes de carros, discos de frenos, cardenales, bielas para motores, etc [32], y ahora en la fabricación de ménsulas o brazos tipo “L”.

Entre las propiedades características se encuentra su elevada resistencia a la compresión (50 kg/mm^2 a 100 kg/mm^2) y su excelente resistencia a la tracción que puede variar de 12 kg/mm^2 a 90 kg/mm^2 . Además tiene buena resistencia al desgaste y a la absorción de vibraciones.

Las fundiciones nodulares, como se había mencionado, son versátiles por las propiedades que se pueden lograr con modificación del tipo de matriz que rodea a los nódulos de grafito. Entre las microestructuras que se pueden lograr están [33, 34]:

✚ **La nodular ferrítica.** En este tipo de fundición el grafito nodular se encuentra rodeado de una matriz ferrítica, y ocurre cuando los átomos de carbono tienen el suficiente tiempo de salir de la austenita y/o ferrita. Las propiedades más importantes de esta aleación son la alta resistencia al impacto, buena maquinabilidad y alta permeabilidad magnética.

✚ **La nodular perlítica.** Característico porque los nódulos de grafito están dentro de la fase perlítica, proporcionándole a la fundición una dureza relativamente alta, buena resistencia al desgaste, moderada resistencia al impacto y buena maquinabilidad, entre otras.

✚ **La nodular perlítica-ferrítica.** Sus propiedades se encuentran entre las de la fundición nodular ferrítica y la perlítica, y el grafito nodular está dentro de una matriz de que es una mezcla entre la fase perlita y la de ferrita.

✚ **La nodular martensítica.** Esta fundición es poco empleada debido a su fragilidad, aunque tiene una alta dureza además de presentar una buena resistencia a la corrosión. Es obtenida después de un tratamiento térmico de temple en el que la matriz se transforma a martensita.

✚ **La nodular austenítica.** Glóbulos de grafito en matriz de austenita, siendo muy empleada debido a que presentan una buena resistencia mecánica, así como a la corrosión y a la oxidación.

Por otro lado, de acuerdo al tipo de microestructura (tratamiento y composición) que le confieren unas características determinadas, la ASTM A-536 las ha clasificado de acuerdo al grado en correlación con las propiedades mecánicas que se pueden obtener, Tabla 7.

Tabla 7. Clasificación de la fundición nodular vs características mecánicas mínimas [35-37].

Microestructura	Grado	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite de fluencia (MPa)	% Elongación en 2 in o 50 mm
<i>Ferrítica</i>	60-40-18	414	276	18
<i>Ferrítico-perlítico</i>	65-45-12	448	310	12
<i>Ferrítica</i>	70-50-05	485	345	10
<i>Ferrítico-perlítica</i>	80-55-06	552	379	6
<i>Perlítico-ferrítica</i>	100-70-03	689	483	3
<i>Martensítica</i>	120-90-02	827	621	2

Donde, según el grado presentan unas características especiales, además de las propiedades mencionadas en la Tabla 7, las cuales son [36]:

- ✚ **60-40-18.** Normalmente es usada en la fabricación de piezas con buena resistencia al impacto y resistencia a bajas temperaturas. Puede ser tratada térmicamente por recocido.
- ✚ **65-45-12.** Servicios generales
- ✚ **70-50-05.** Servicios generales.
- ✚ **80-55-06.** Servicios generales
- ✚ **100-70-03.** Esta presenta una excelente combinación tenacidad-resistencia al desgaste, y puede ser sometida a tratamientos de endurecimiento superficial y normalizado.
- ✚ **120-90-02.** Se caracteriza por ser la más tenaz y resistente al desgaste, por la alta dureza dada por la microestructura martensítica, la cual es obtenida por temple en aceite y posterior revenido.

1.1.3. Resistencia a la corrosión

En general, la resistencia a la corrosión en los metales es baja comparada con otros tipos de materiales como son los materiales cerámicos o los polímeros, esto es debido a que presentan una mayor reactividad con elementos que los rodean dado el tipo de enlace metálico que los rige.

Dentro de los materiales metálicos hay diferencias en las velocidades de corrosión, que dependen de la afinidad con los elementos o compuestos con los que están en contacto pero adicionalmente en algunas ocasiones los átomos que reaccionan en la superficie de la pieza forman otros compuestos que se encargan de proteger las piezas y no dejan avanzar la corrosión, por lo que las piezas hechas de estos materiales tienden a denominarse inoxidable.

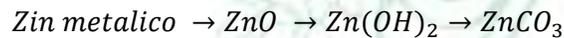
Considerando las condiciones ambientales que rodea los materiales con los que son fabricadas las ménsulas se puede afirmar que para el caso tanto del acero estructural como para las ménsulas fabricadas a partir de hierro fundido, la resistencia a la corrosión es baja por la alta afinidad del hierro a reaccionar electroquímicamente con el oxígeno del ambiente, presente en el aire y/o de la humedad, por lo que se hace necesario el empleo de tratamientos superficiales, como el galvanizado, para suplir esta debilidad.

Por otro lado, aunque la reactividad del aluminio con el oxígeno también es alta no requieren de tratamientos superficiales posteriores al proceso de fundición puesto que las capas superiores del aluminio, que alcanzan a tener interacción con éste, reaccionan rápidamente convirtiéndose en óxido de aluminio o alúmina (Al_2O_3) [3], el cual proporciona una protección aislando al resto del material del ambiente corrosivo. Esto debido a que la formación del óxido de aluminio se da uniformemente en la superficie y posee una alta resistencia a la corrosión, lo que impide la migración de oxígeno para entrar en contacto con el resto del material, caso que no ocurre con los óxidos de hierro los cuales en su mayoría producen capas discontinuas que no protegen el material de la acción del oxígeno.

➤ **Galvanizado.**

Debido a que algunos materiales presentan deficiencias en oponerse a reaccionar con otros elementos que los rodean, y tienen una tendencia con el tiempo a disminuir sus propiedades, se hace necesario emplear el uso de tratamientos superficiales, como lo es el galvanizado, para mejorar sus propiedades y garantizar una mayor perdurabilidad.

El galvanizado es un proceso en el que se aplica una capa de zinc sobre una superficie generando protección contra la corrosión, dada por el carbonato de zinc, insoluble y denso, resultado de las reacciones (Ecuación 2) del zinc con el aire y la humedad proporcionando una protección contra la reacción continua de la estructura sobre la cual este se encuentra con el medio ambiente [38,39].



Ecuación 2. Reacción del Zinc con el aire y la humedad

Normalmente, estas capas son aplicadas sobre estructuras de acero o con contenido de hierro, puesto que además de tener una baja resistencia contra la corrosión, el zinc con el hierro tiene buena interacción que le permite tener un excelente acople metalúrgico. Por lo tanto, para que el acople sea adecuado, antes de realizar el galvanizado se debe preparar superficialmente la pieza, ejecutando un desengrase, un enjuague, un decapado (para eliminar óxidos) además de generar una protección con cloruro de zinc y amonio para proteger la superficie de la oxidación antes del galvanizado para que el crecimiento de la capa de zinc sobre el material sea buena y efectivamente el recubrimiento cumpla con su papel protector [40].

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- ✚ Establecer mejoras a las especificaciones técnicas de ménsulas, para un adecuado funcionamiento en las redes de distribución.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✚ Identificar las falencias más importantes en las ménsulas que se utilizan actualmente para las líneas de distribución eléctrica en EPM.
- ✚ Determinar las características químicas, mecánicas, dimensionales y tecnológicas importantes para las aplicaciones a la que es sometido este tipo de herraje de acuerdo con las normas aplicables y la funcionalidad.
- ✚ Definir los criterios de selección de proveedores, a partir de la elaboración de especificaciones técnicas, que garanticen la funcionalidad de este herraje.

3. METODOLOGÍA

Este estudio que se enfocó en el análisis de las ménsulas usadas en distribución en el sistema de red compacta; inició con un análisis de por qué la ménsula, en especial la de 44 kV, presentó falla en campo. El estudio se realizó mediante análisis de la superficie de fractura y análisis microestructural de la ménsula que falló; se determinó la composición química y el espesor de galvanizado, con el fin de identificar su cumplimiento con la RA7-116 [9]

Al mismo tiempo, buscando identificar las posibles fallas durante el proceso de fabricación que no permiten que las ménsulas cumplan con los requisitos especificados por EPM; se decidió estudiar detalladamente la calidad de las juntas soldadas a partir de una inspección visual, por líquidos penetrantes, macrografías y micrografías, además de realizar ensayos de flexión y de tracción, con las cargas de la especificación.

Por otro lado, después de hacer una revisión exhaustiva de las referencias en las que se basa la especificación e identificar que las cargas exigidas no corresponden a condiciones ambientales a las que están sometidos estos herrajes en la región; mediante el uso de un software de simulación se determinaron las cargas bajo condiciones climáticas típicas reales que deben soportar las ménsulas.

Adicionalmente, en la búsqueda por mejorar la calidad en el servicio de distribución de energía eléctrica, empleando las condiciones de carga especificadas y las halladas por simulación, se comparó el comportamiento de diferentes diseños y materiales, con el ánimo de encontrar el herraje que mejor se adapte a las necesidades del sistema de red compacta.

A continuación se realizará una descripción más detallada de las técnicas, los ensayos y los software de simulación empleados durante el estudio.

3.1. ANÁLISIS DE FALLA MÉNSULA DE 44 kV

3.1.1. Tipo de falla, mecanismo de fractura y zona de la unión soldada.

La parte que falló de la ménsula de 44 kV fue la tapa de agarre de tornillo a la grapa, Figura 10, la cual se encontraba soldada al resto de la pieza; pero, puesto que la superficie de falla quedó expuesta a la intemperie se oxidó, dado a que el material es un acero estructural, que presenta baja resistencia a la corrosión, fue necesario decapar la zona, usando ácido fosfórico al 20% durante 5 minutos, para revelar la(s) forma(s) de la fractura e identificar cual fue el mecanismo de falla.

Después de identificado su mecanismo de fractura, se procedió a realizar una metalografía teniendo en cuenta la norma ASTM E3 [41]. Para el pulido abrasivo se empleó papel de lija N° 400, 600, 1000, 1500, 2000 y posteriormente se llevó a brillo espejo, con alúmina de 0.05 micra. Finalmente, se atacó la muestra con Nital al 2% de 15 a 25 segundos, para revelar la estructura, observada en un microscopio óptico, que permitió identificar la zona afectada térmicamente, formada al hacer la junta soldada. Dado esto, se determinó la profundidad de penetración que sirvió de complemento, en el análisis de falla.

3.1.2. Composición química del metal base.

Dentro de la RA7-116, se tiene estipulada una composición límite para las ménsulas, razón por la cual se hizo un análisis composicional usando un Espectrómetro de emisión óptica por chispa QU-067-M, con el fin de corroborar que estas tuvieran la composición adecuada además de permitir predecir teóricamente las propiedades mecánicas del material, que posteriormente serían usadas para simular el comportamiento de las ménsulas que actualmente se usan en EPM.

3.1.3. Medida del espesor de Galvanizado (Zinc)

De igual forma, hay condiciones para el espesor de recubrimiento por tal motivo se midió la capa protectora usando un medidor de espesor de

recubrimiento ELCOMETER ME-025-M, teniendo en cuenta las características descritas en la NTC 3981:1996 [42], y las condiciones de espesor dadas por la RA7-116 y la NTC 2076:1998 [15].

3.2. ANÁLISIS DE LAS JUNTAS SOLDADAS DE LA MÉNSULA DE 44 kV.

Para la inspección de las juntas soldadas, primero se realizó una detección de los principales defectos que a simple vista se lograban observar apoyados en los defectos característicos de una junta soldada descritos en guía técnica colombiana 110, que en el ítem 4 muestra los defectos generales de la soldadura [43]

Luego, para poner en evidencia los defectos que a simple vista no eran detectados fue empleado el método de inspección no destructivo por líquidos penetrantes, usando un kit marca Spotcheck que consiste en agente limpiador, líquido penetrante y revelador.

A continuación, las juntas analizadas fueron cortadas y pulidas hasta brillo espejo, usando el procedimiento descrito para hacer un análisis metalográfico en 3.1.1. [44]. Después de hacer el ataque con Nital, se observó macroscópicamente la zona afectada térmicamente y se identificaron algunos de los defectos presentes allí, y posteriormente usando un microscopio óptico se obtuvieron unas micrografías para posteriormente analizar la microestructura.

3.3. ENSAYOS DE FLEXIÓN Y TRACCIÓN A LAS MÉNSULAS ACTUALES DE 13.2 Y 44 kV.

Se realizaron ensayos de tracción, en un dinamómetro Dillon de capacidad de 10000 lb-f, a una carga de 3200 lb-f (14.23 N) y 4000 lb-f (17.80 N) para las ménsulas de 13,2 kV y 44 Kv respectivamente, según lo especificado por la RA7-116, Figura 5. El mismo dispositivo fue empleado para realizar los ensayos de flexión, donde solo se varió la dirección de la fuerza aplicada a la ménsula, como es evidenciado en la Figura 6.

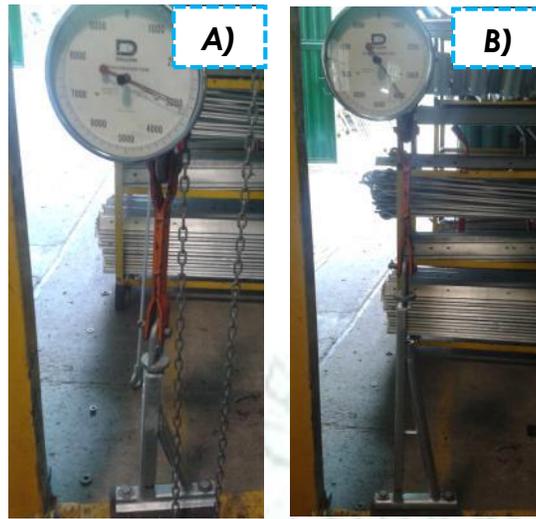


Figura 5. Ensayo de tracción A) Ménsula de 13,2 kV; B) Ménsula de 44 kV

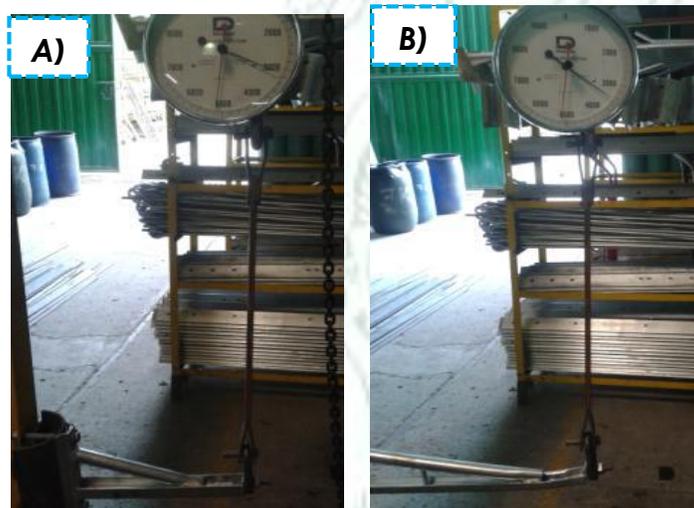


Figura 6. Ensayos de Flexión A) Ménsula de 13.2 kV B) Ménsula de 44 kV

3.4. MAGNITUDES Y DIRECCIONES DE ESFUERZOS SOPORTADOS POR LA MÉNSULA.

Las cargas especificadas en la RA7-116, están basadas en lo que especificó el proveedor Hendrix para las condiciones climáticas, las dimensiones de sus conductores y las distancias poste-poste que se emplean en los Estados Unidos. Por esta razón se recalcularon las magnitudes y direcciones de los esfuerzos a los que están sometidas las ménsulas con el programa PLS CADD™ (Power Line Systems-Computer Aided Design and Drafting);

programa empleado en el diseño de líneas de transmisión y distribución aérea, el cual permite modelar condiciones climáticas, de terreno, de las estructuras y las propiedades de los cables, y entre muchas de sus funciones, calcular los esfuerzos a los que están sometidas las estructuras bajo diversas condiciones [44].

En la simulación se estudiaron dos condiciones climáticas, de viento máximo y mínimo, y de temperatura máximas en terreno plano, que son mostrados en la Tabla 8:

Tabla 8. Condiciones climáticas de la simulación [45].

Descripción	Densidad del aire	Velocidad (m/s)	Presión (Pa)	Temp. máx Conductor (°C)	Temp. Máx Ambiente (°C)
Viento máximo	0.613	23	324.277	75	31
Viento mínimo-conductor nuevo	0.613	0	0	20	20

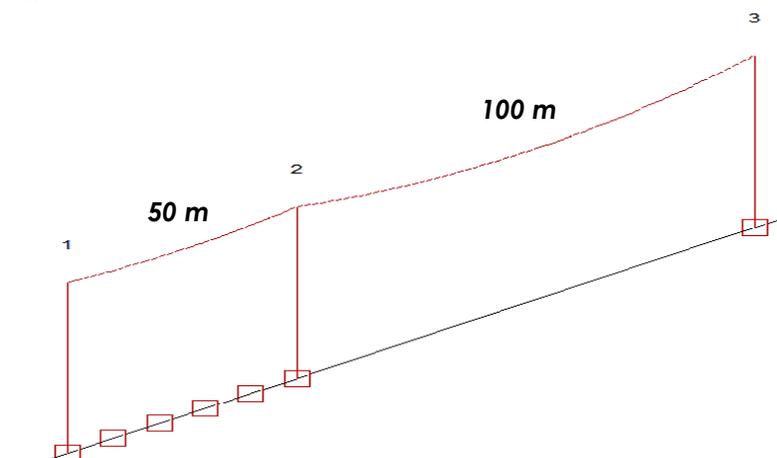
Dichas condiciones fueron simuladas para el sistema compacto de 13.2 kV y 44 kV teniendo en cuenta, además del peso de los cables, la presencia de separadores (0.163 kg), que son dispuestos cada 8.0 m. Las características de los cables son enunciadas en la Tabla 9.

Tabla 9. Características de cables [46]

	Mensajero	Conductor 13.2	Conductor 44
		266,8 Kcmil ACSR	kcmil AAAC
Peso (kg/Km)	347.69	754	1396
Carga de ruptura (kg-f)	4392	3122	4770
Diámetro externo (mm)	11.35		
NORMA	ASTM B		
Módulo de elasticidad	10671 Kg/mm ²		
Coef. de expansión (x10⁻⁶/°C)	16.4		

Nota. Solo se tiene en cuenta las características de resistencia, módulo y coeficiente de expansión del mensajero, puesto que este es el que sostiene los conductores de 13.2 kV y de 44 kV.

Adicionalmente, tanto para los conductores de 13.2 kV como de 44 kV, se empleó una distancia típica entre los postes, de 50-100 metros (Figura 7).



**Figura 7. Imagen de simulación PLS CADD
(Distancia 1 a 2: 50 m; de 2 a 3: 100 m)**

3.5. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE DISTINTOS TIPOS DE MÉNSULAS POR ELEMENTOS FINITOS.

Puesto que en el mercado se han encontrado diseños y materiales distintos para la fabricación de las ménsulas tanto de 13.2 kV como de 44 kV, se decidió realizar un análisis del comportamiento bajo los esfuerzos estipulados actualmente, en la RA7-116, así como para los resultados obtenidos en las simulaciones del PLS CADD.

Entre los distintos diseños y materiales elegidos para ser estudiados están, de acuerdo a las Figuras 8 y 9:

- ✚ La ménsula empleada actualmente por EPM, la cual difiere en diseño con la especificada en la RA7-116, y fabricada con un acero en acuerdo a la NTC 1920-NTC1985 (resultados de composición química).
- ✚ Una ménsula de diseño de Hendrix, fabricada por un proveedor de la región, a partir de fundición nodular.

Dicho estudio se realizó empleando el software Inventor®, producto de Autodesk, el cual además de permitir el diseño de las distintas ménsulas deja hacer un estudio por elementos finitos, identificando cualitativamente la distribución de esfuerzos y los puntos críticos del diseño.



Figura 8. Diseños ménsulas de 13.2 kV. A) Perfilería en acero estructural NTC 1920-NTC 1985 y B) Fundición nodular.



Figura 9. Diseños ménsulas de 44 kV. A) Perfilería en acero estructural NTC 1920-NTC 1985 C) Fundición nodular.

Las propiedades mecánicas usada para estudiar el comportamiento de las distintas ménsulas, se especifican a continuación en la Tabla 10.

Tabla 10. Propiedades mecánicas de los distintos materiales de las ménsulas simuladas [18-19, 31, 47].

Propiedades mecánicas	A) Actual	B) Fundición nodular		
	NTC 1920/1985	°60-40-18	°70-50-05	°100-70-03
Resistencia a la tracción (MPa)	425	400	450	600
Límite de elástico (MPa)	300	250	310	370
Módulo de Young (GPa)	205	169	169	174

3.6. MEJORAS DE LA ESPECIFICACIÓN TÉCNICA RA7-116.

La recopilación de los resultados teóricos, los ensayos, los análisis y las simulaciones realizados durante este trabajo permitieron determinar las

principales falencias presentadas en los herrajes que estaba adquiriendo EPM y las modificaciones que debían realizarse a la Especificación Técnica RA7-116, para que las ménsulas adquiridas garanticen la seguridad, perdurabilidad y correcta funcionalidad de los sistemas de distribución.

Dichas falencias encontradas en las especificaciones, permitieron realizar modificaciones y construcción de algunos ítems de los que carecía la RA7-116, obteniendo como resultado dos especificaciones técnicas, Anexo 1 y Anexo 2, que se hicieron en acuerdo al tipo de material con el que pueden ser fabricadas las ménsulas.



4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. INFORMACIÓN RECOPIADA

4.1.1. Descripción geométrica de la ménsula usada actualmente por EPM.

La Figura 10 muestra la ménsula usada en el nivel de tensión de 44 kV, usada actualmente por EPM, que incluye detalles (Figuras 10-1 a 10-3) de las principales secciones que la componen (similares a las de la ménsula de 13.2 kV). Dicho soporte tangencial es fabricado en acero estructural en acuerdo a la NTC 1920-NTC1985 mediante la unión de cada una de sus partes usando el proceso de soldadura GMAW

4.1.2. Soldabilidad del acero especificado en la RA7-116.

En acuerdo a la especificación, RA7-116 de EPM, para la adquisición de estas piezas, se establece que el contenido de carbono debe ser máximo de 0.26 o 0.23; por lo que al realizar un análisis de acuerdo a la Figura 4, se logra ver que la soldabilidad del acero especificado está en la región óptima.

Pero aunque el carbono tiene una influencia marcada en la soldabilidad de los aceros; los elementos que lo acompañan pueden alterar la facilidad con la que puede ser soldado [17], por lo que al analizar la soldabilidad versus el carbono equivalente (CE), Tabla 4, hallando CE empleando la ecuación 1 de la WII (international institute of Welding), usando los contenidos máximos límites para los elementos estipulados en la RA7-116 (Tabla 1); se logra observar que el contenido de carbono equivalente es un poco mayor a 0.5, evidenciando que la soldabilidad para estos acero cuando se encuentra al límite de composición tiende a ser regular casi pobre, generando dificultades en obtener juntas soldadas de alta calidad, por lo que se requieren de controles más rigurosos con el fin de garantizar que la pieza cumpla con la función para la que es fabricada.

Por lo tanto, es de vital importancia que los proveedores, cuando fabrican las ménsulas, conozcan la composición química de las láminas y/o tubos que les permita establecer adecuados controles para su fabricación.



Figura 10. Descripción de las partes de la ménsula actual

4.1.3. Cargas estipuladas por los proveedores.

Como ya se había mencionado, en la sección 1.1.2 Materiales y procesos, las ménsulas son fabricadas con distintos tipos de materiales tales como aceros estructurales por perfilería, fundición nodular y fundición de aluminio.

Los proveedores encontrados que se encargan de la fabricación de los soportes tangenciales mediante fundición, ya sea nodular o de aluminio, son extranjeros, entre los que se encuentra: **Hendrix**, con la fabricación de estas piezas con ambos materiales tanto para niveles de tensión de $\leq 15\text{kV}$ y $\leq 46\text{kV}$, Figura 11 a; **Southwire**, la cual usa hierro nodular para fabricar las ménsulas de $\leq 15\text{kV}$ y aluminio 356-T6 para niveles de tensión $\leq 46\text{kV}$, Figura 11b; y **PLP Brasil**, que fabrica ménsulas para $\leq 15\text{kV}$ en fundición de hierro nodular, Figura 11c.

En los catálogos de estas empresas comercializadoras de soportes tangenciales, se da garantía de que las piezas cumplen con cargas determinadas de ruptura mínima, además de indicar el tipo de material con el que son fabricadas como se especifica en la Tabla 11, y el diseño o geometría como se muestra en la Figura 11.

Tabla 11. Características de ménsula por proveedor [10-13]

Proveedor	Geometría	Sistema de voltaje (kV)	Resistencia última (Lbs-f)	Material
HENDRIX	1	15	3200	ASTM 356-T6 Al
	2	15	1500	
	3	15	3200	Hierro nodular
	4	46	4000	ASTM 356-T6 Al
	5	46	6000	Hierro nodular
SOUTHWIRE	6	15	2250	ASTM 356-T6 Al
	7	46	4000	
PLP BRASIL	8	15	1000	Hierro nodular

Al analizar las especificaciones que están indicadas en cada uno de los catálogos de estas empresas, se logra evidenciar que independientemente del material utilizado, a partir de la geometría es posible obtener ménsulas igual de resistentes.

Al analizar teóricamente las propiedades de los materiales, tanto del material que se usa actualmente como de las fundiciones, ya sea nodular o de aluminio, se logra ver que en lo que respecta a las propiedades mecánicas en tensión y compresión de la fundición nodular, que al variar su composición y microestructura, pueden presentar una gama de resistencia (en tensión: 118-850 y compresión: 490-980) que puede superar a los aceros estructurales y a las fundiciones de aluminio, además de presentar una buena resistencia a los esfuerzos cíclicos o de fatiga.

En cambio, los aluminios presentan una ventaja frente a los otros dos materiales, y es la baja densidad que permite dar mayor ligereza a las piezas además de tener excelente resistencia a la corrosión, pero esto último puede ser mejorado en las piezas fabricadas en acero estructural y hierro nodular mediante una capa protectora mediante galvanizado. La Figura 11 muestra imágenes de los diferentes diseños que se encuentran disponibles.

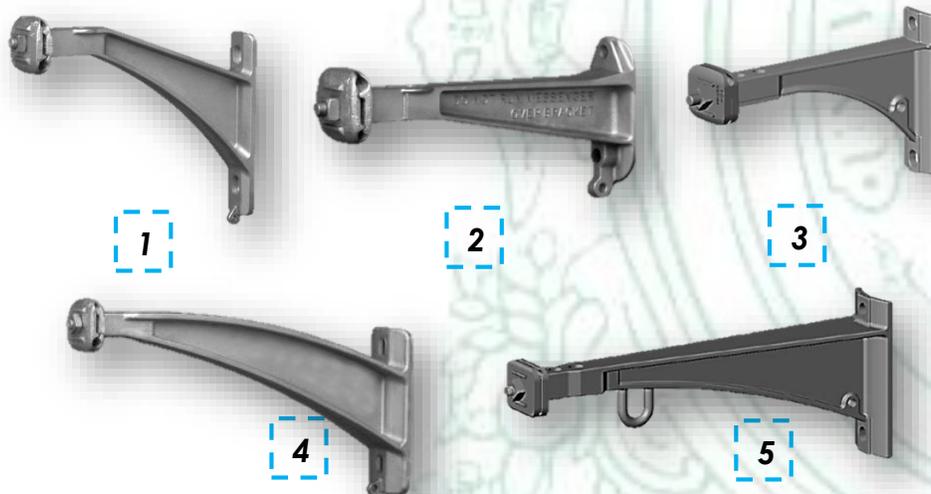


Figura 11 a. HENDRIX [10, 13]



Figura 11 b. Southwire [12]

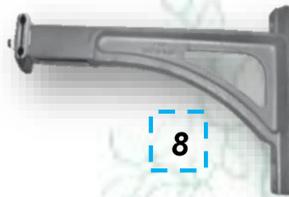


Figura 11 c. PLP Brasil [11]

Figura 11. Geometrías ofrecidas por los proveedores

4.1.4. Especificaciones técnicas de otras comercializadoras de energía eléctrica.

Con la implementación del sistema compacto en las redes de distribución por parte de empresas comercializadoras de energía eléctrica se ha buscado emplear elementos que faciliten el montaje. Razón por la cual, se realizan exigencias, a través de especificaciones técnicas, a los proveedores en acuerdo a las necesidades de cada compañía.

Al comparar las especificaciones que emplea EPM, con otras comercializadoras de energía eléctrica aérea, se encontró que hay algunas variaciones que están dadas por el tipo de proveedor, en el que han basado sus especificaciones, y los niveles de tensión que usan en los conductores jugando un papel fundamental en la fijación de las cargas de obligatorio cumplimiento, como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Comparación de las especificaciones de empresas de distribución de energía eléctrica en el país.

Empresa	EPM [9]		CODENSA [48]		ENSA [49]	
Nivel de tensión	13.2 kV	44 kV	15 kV	34.5 kV	15 kV	46 kV
Carga	3200 Lb/f	4000 Lb/f	1000 Lb-f		3200 Lb-f	6000 Lb-f
Tipo de material	Acero estructural		Acero o fundición nodular		Fundición nodular o maleable	
Galvanizadas	Si		Si		Si	
Diseño	-----		PLP Brasil (15 kV - 34,5 kV ≠longitud)		Hendrix- Geometría 3 (15 kV) y 5 (46 kV)	
Especificación basada	Parcialmente en Hendrix		Completamente en PLP Brasil		Completamente en Hendrix	

4.2. ANÁLISIS DE FALLA DE LA MÉNSULA DE 44 kV

4.2.1. Tipo de falla, mecanismo de fractura y zona de la unión soldada [40].

La falla se presentó por desprendimiento de la tapa (Figura 10-3) donde se sujeta la grapa, que es la encargada del soporte o agarre del cable mensajero. Con el fin de realizar un análisis a la zona de falla se decapó la superficie de fractura con ácido fosfórico al 20%, en la junta que falló (Figura 12b), permitiendo revelar la superficie de fractura (Figura 13).

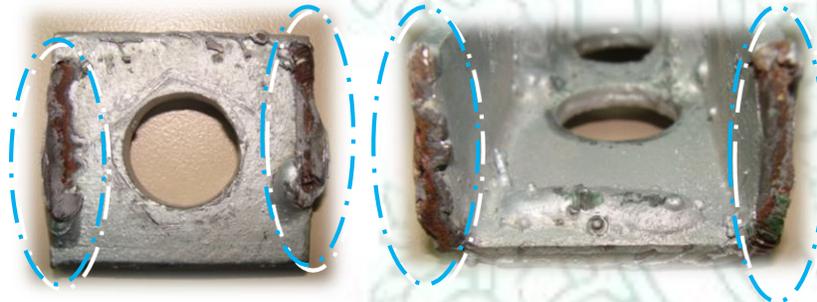


Figura 12a

Figura 12b

Figura 12. Tapa de agarre que falló

Al analizar la superficie de fractura, con el apoyo de un microscopio estereográfico y una cámara digital, se logró observar en la zona indicada en la Figura 14a, la falla es de tipo frágil o súbita, puesto que la superficie de fractura es muy plana y a nivel macroscópico no se logran observar deformaciones plásticas.

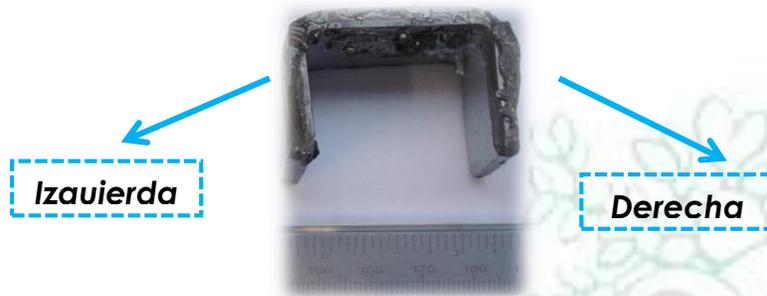


Figura 13. Tapa de agarre que falló decapada

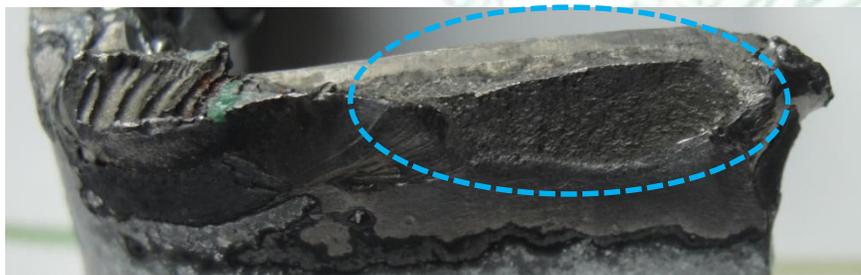


Figura. 14a. Parte Izquierda

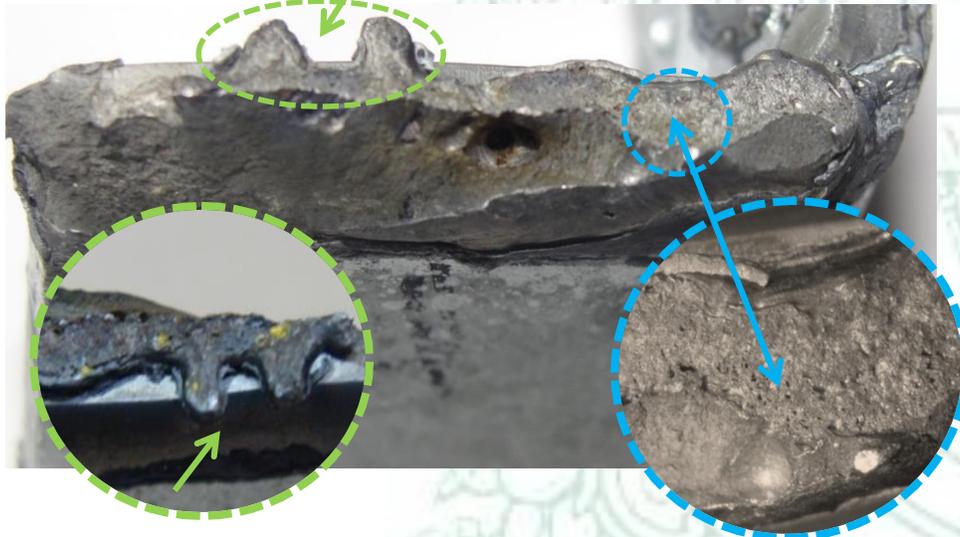


Figura 14b. Parte derecha
Figura 14. Superficie de fractura

Esta falla súbita se cree que es dada por la sobre carga localizada debida a los efectos de la falla temprana de la soldadura presente en la zonas de la Figura 14b, pues la ampliación del círculo verde evidencia poca

interacción metal de aporte-metal base y la del círculo azul revela presencia de escoria (morfología porosa con brillo mate).

Por otro lado, con el fin de corroborar la poca interacción entre metal de aporte y metal base se realizó una metalografía (Figura 15), en la zona indicada con el círculo verde, Figura 14b; encontrándose baja afectación térmica del metal base, pues no se evidencian las tres zonas características del proceso de soldadura.



Figura 15. Micrografía de unión de falla

4.2.2. Composición química del metal base

Los resultados obtenidos al analizar el metal base, mediante el uso de un espectrómetro de emisión óptica por chispa QU-067-M, Tabla 13, son:

Tabla 13. Composición química por espectrómetro de emisión óptica

Composición química	%P/P	RA7-116 (%P/P)	
		Requisitos NTC 1920	Requisito NTC 1985 Grado 50
Carbono	0.18±0.02	0.26 máx	0.23 máx
Manganeso	0.60±0.01	----	1.35
Fósforo	0.02±0.001	0.040 máx	0.040 máx
Azufre	0.01±0.001	0.050 máx	0.050 máx
Silicio	0.10±0.01	0.40 máx	0.30 máx
Cromo	0.40±0.003	----	----
Vanadio	----	----	0.01 a 0.15
Cobre	0.009±0.001	0.20 Min	----

De lo que se puede observar que la composición química del metal base cumple con lo especificado en la RA7-116 [9]. Adicionalmente, si se realiza

un análisis de soldabilidad de este material, comparando la cantidad de carbono (máx. 0.2) con la Figura 4 y el carbono equivalente (0.311 CE), hallado a partir de la Ecuación 1 (WII), con la Tabla 4 se encuentra que la soldabilidad es óptima y excelente (<0.4 CE), respectivamente.

4.2.3. Medida del espesor de Galvanizado (Zinc)

El espesor medido con el equipo de corrientes parásitas ELCOMETER, permitió obtener los siguientes resultados, Tabla 14:

Tabla 14. Espesor del galvanizado o recubrimiento de zinc [42]

Muestra	Sección	Espesor recubrimiento en micras		
		Mínimo	Máximo	Promedio
<u>1</u>	Travesaño en "U"	59.3	83.7	65.9
	Refuerzo (Cilíndrico)	42.4	64.8	50.0
	Base en "U"	53.8	94.9	91.7
<u>2</u>	Travesaño en "U"	54.9	71.5	62.8
	Refuerzo (Cilíndrico)	44.4	77.5	54.7
	Base en "U"	55.9	113	82.4
Total promedio				67.9
Requisito norma RA7-116-NTC2076		78 micras (mínimo)	86 micras (promedio)	

Nota: La incertidumbre en la medición es de 5, 8 micras para cada punto de medición y un nivel de confianza del 95%.

Estos resultados son comparados con lo que dice la especificación de la norma RA7-116, donde las exigencias están basadas en lo que indica la NTC 2076 Clase B1 [15]. Dicha norma indica que el espesor promedio de las piezas ensayadas debe ser mayor igual a 86 micras, lo cual para este caso no se cumple, puesto que los recubrimientos presentan aproximadamente 18.1 micras menos de lo especificado. Por otro lado, al sacar el promedio de los valores mínimos hallados para ambas muestras, se encontró que el valor es inferior en 26.2 micras según lo especificado en la NTC 2076 (78 micras), lo cual nos permite inferir que las piezas están faltas de espesor en el recubrimiento de zinc.

4.3. ANÁLISIS DE JUNTAS SOLDADAS DE LAS MÉNSULAS DE 44 Kv

4.3.1. Inspección visual de la soldadura [23, 43]

Al realizar un análisis visual de la junta soldada, se logró observar que esta presenta un conjunto de defectos que nos permite inferir que el proceso de soldadura está falto de control.

Entre los defectos que se pueden observar, como se muestra en la Figura 16, se encuentran porosidad, socavadura, alta corona, salpicadura y mal aspecto.

Estos defectos son ocasionados por un mal control en los parámetros seleccionados para aplicar la soldadura, falta de limpieza antes y después, lo que podría generar puntos críticos para el inicio de procesos corrosivos.

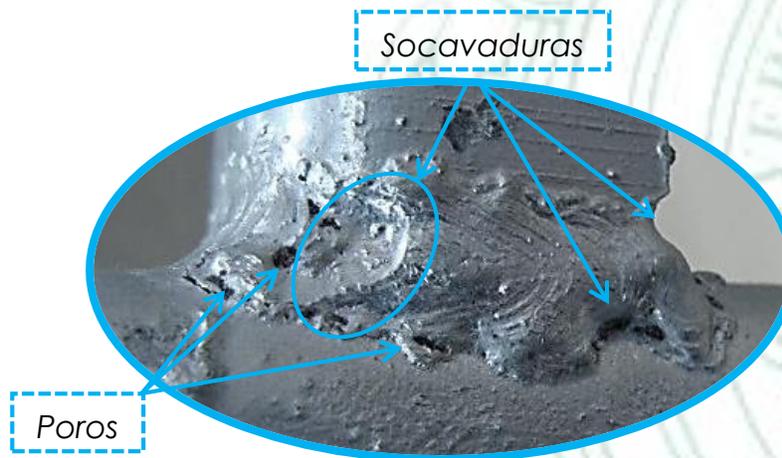


Figura 16. Junta soldada

4.3.2. Líquidos penetrantes juntas soldadas [20, 50]

El ensayo de líquidos penetrantes se efectuó con el fin corroborar el mal estado de las juntas soldadas e identificar defectos que son difíciles de observar por inspección visual. Dicha inspección se realizó entre el "soporte de agarre al poste", Figura 10-1 y "los brazos de soporte" Figura 10-2.

Los resultados mostraron algunos defectos superficiales que ya se habían identificado visualmente, tales como porosidades y/o grietas, Figura 17, los cuales no sólo se encuentran en la unión metal de aporte-base, sino en el metal de aporte.

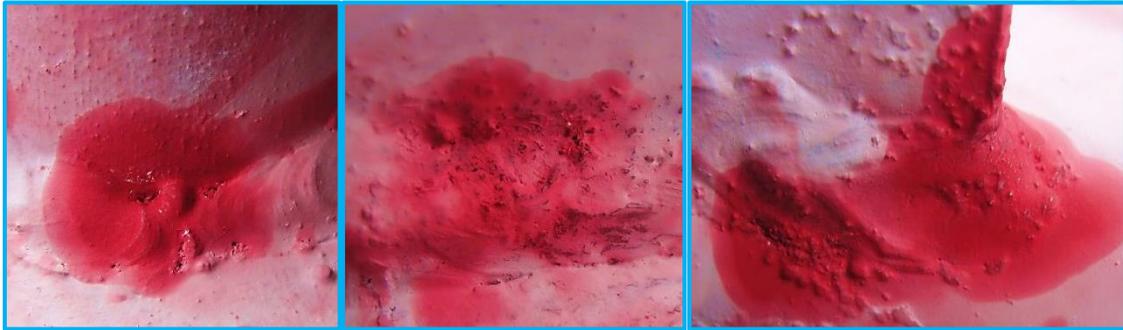


Figura 17. Defectos, detectados por líquidos penetrantes, en la soldadura

Puesto que, era de vital importancia corroborar dichos resultados, se realizaron unos ensayos de líquidos penetrantes a nuevas ménsulas de 44 kV tomadas al azar. Donde se observó que los resultados obtenidos eran similares, Figura 18 y 19, con la variante que en el primer ensayo los defectos eran mayores y se encontraban sobre toda la superficie, mientras que para este caso los defectos se encontraron en las terminales soldadura-metal, con pequeños defectos dentro del material de aporte (soldadura).



Figura 18. Ensayo de líquidos penetrantes en soldadura en tapa de agarre

El que la soldadura presente porosidad y/o agrietamiento abierto a la superficie, posibilita que tanto la soldadura como la pieza sean alcanzados por corrosión generada por la humedad que se puede localizar, reduciendo la resistencia de la junta y/o del material y consigo la vida útil del soporte tangencial. Por tal razón, es de vital importancia que este tipo de defectos sean controlados, más cuando estas piezas están constantemente

sometidas a la intemperie, con el fin de evitar fallas tempranas a menores esfuerzos.



Figura 19. Ensayo de líquidos penetrantes en la soldadura de la base con el cuerpo de la ménsula de 44 kV

Para controlar este tipo de defectos en estas piezas es necesario incluir en la especificación técnica RA7-116 controles por parte del proveedor (Anexo 1. Ítem 5.4) de los defectos como porosidades, grietas e inclusiones, mediante la calificación de los soldadores. Controles que podrían ser verificados con las técnicas de caracterización dadas en la NTC 2120 [50]; siendo la más recomendable la radiografía, esto con el fin de detectar no sólo los defectos superficiales sino también los subsuperficiales.

4.3.3. Análisis macroscópico de las juntas soldadas [23].

Para corroborar los defectos generalizados que se observaban visualmente en las ménsulas almacenadas por el grupo EPM, se realizaron unas macrográficas, Figura 21, y micrográficas, Figuras 22 y 23, de ménsulas en la junta soldada mostrada en la Figura 20, en la permitió detectar algunos defectos como falta de fusión de la soldadura y algunos defectos macroscópicos que estas presentan.



Figura 20. Junta Soldada para análisis macroscópico y microscópico.

En este orden de ideas, se pudo detectar que la profundidad de penetración en estas juntas aunque logra una interacción mayor metal de aporte- base aún es deficiente además de presentar agrietamiento en el límite soldadura-material base, lo que quizás genere una concentración de esfuerzos allí, potencializando la posibilidad de falla de la unión entre la pieza y la soldadura. Por otro lado, al igual que la porosidad, el agrietamiento también posibilita puntos de corrosión, por lo que estos defectos juntos, reducen la funcionalidad y la durabilidad de la ménsula. Figura 21.

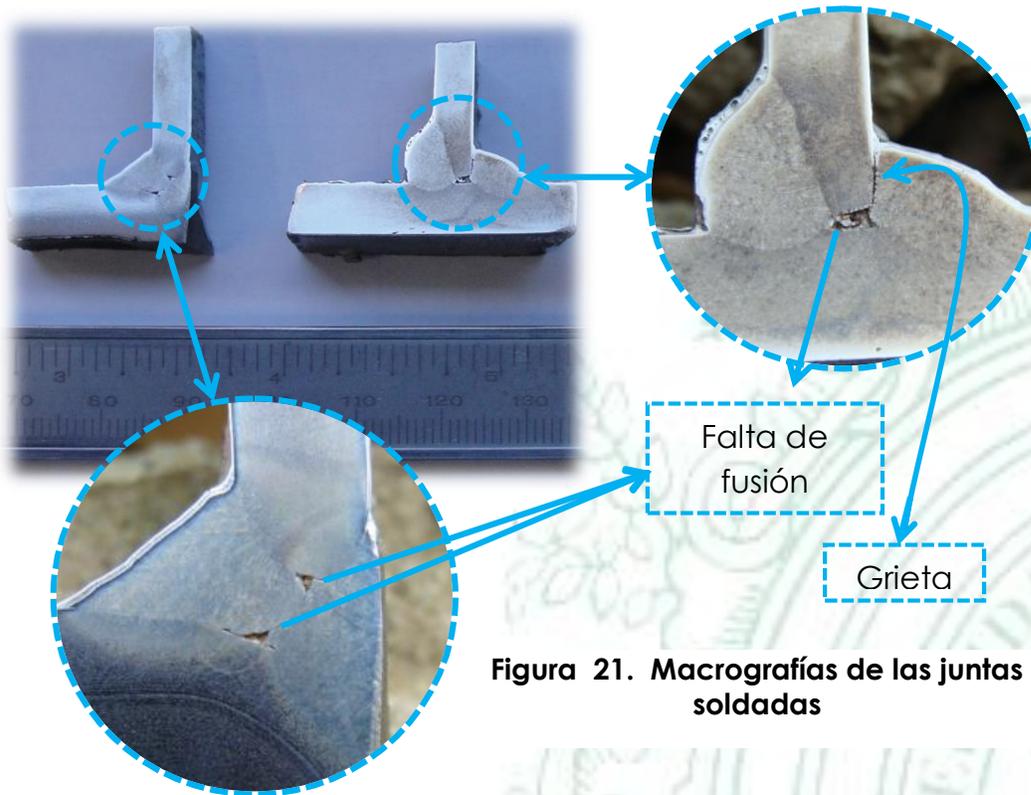


Figura 21. Macrografías de las juntas soldadas

4.3.4. Análisis microscópico de las juntas soldadas (evaluación de la zona afectada térmicamente) [51 -52].

A pesar que se evidencian defectos macroscópicos en la Figura 21, se logra ver una mayor alteración microestructural, si se comparan las microestructuras mostradas en las Figuras 22-23, con la microestructura que presentó la junta soldada que falló, Figura 15.

Tanto es así que en la Figura 22, se evidencian las tres zonas características típicas de una junta soldada, que cuentan con las siguientes características.

- ✚ Material de aporte o ligante: Granos columnares de ferrita y perlita típicos de la microestructura de solidificación del material de aporte.
- ✚ La zona afectada térmicamente: compuesta principalmente por granos de ferrita y perlita con presencia de ferrita widmanstätten, que disminuye a medida que se aleja del metal de soldadura. Cerca del depósito de soldadura se evidencia crecimiento de grano seguida de

una zona de grano fino recristalizado, productos del calentamiento durante el proceso de soldadura.

- ✚ Metal base: que evidencia una zona que no ha sido afectada térmicamente por el calentamiento generado durante el proceso de soldadura, el cual presenta una microestructura típica de los aceros NTC 1920-NTC 1985 con granos de ferrita y perlita orientados en el sentido de la deformación del material.

Otro de los análisis microestructurales realizados, Figura 23, muestra un comportamiento similar para cada una de las zonas, con la variante que:

- ✚ Para este caso no hay unos límites tan pronunciados como los que se evidenciaron en el anterior análisis microestructural (Figura 22).
- ✚ La zona afectada térmicamente no muestra tan definidas las fases, como si lo hace la Figura 22; y su estructura es muy similar a la del metal base.

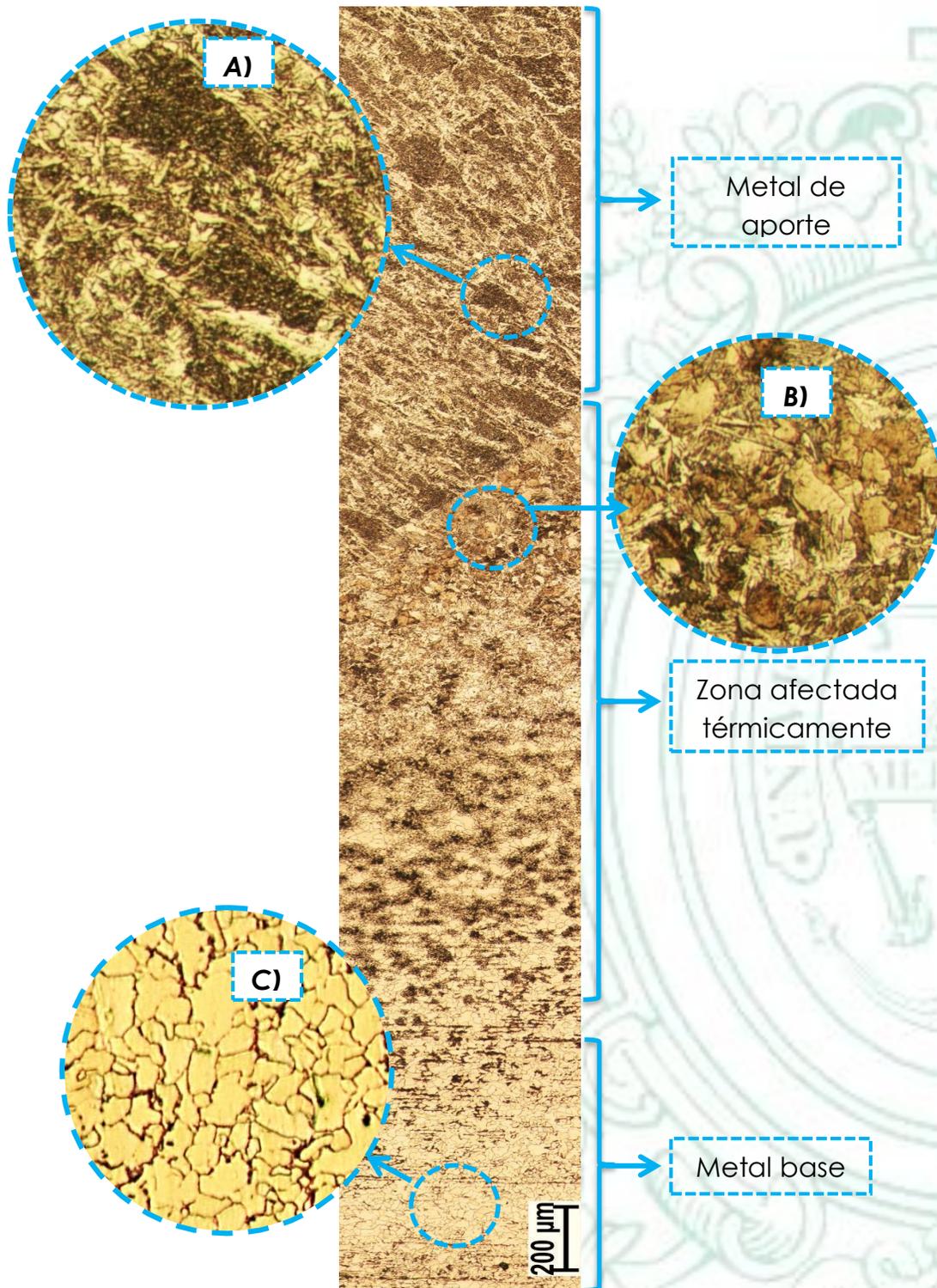


Figura 22. Micrografía en la junta soldada de mayor esfuerzo A) Soladura (Metal de aporte) B) Zona afectada térmicamente C) Metal base.

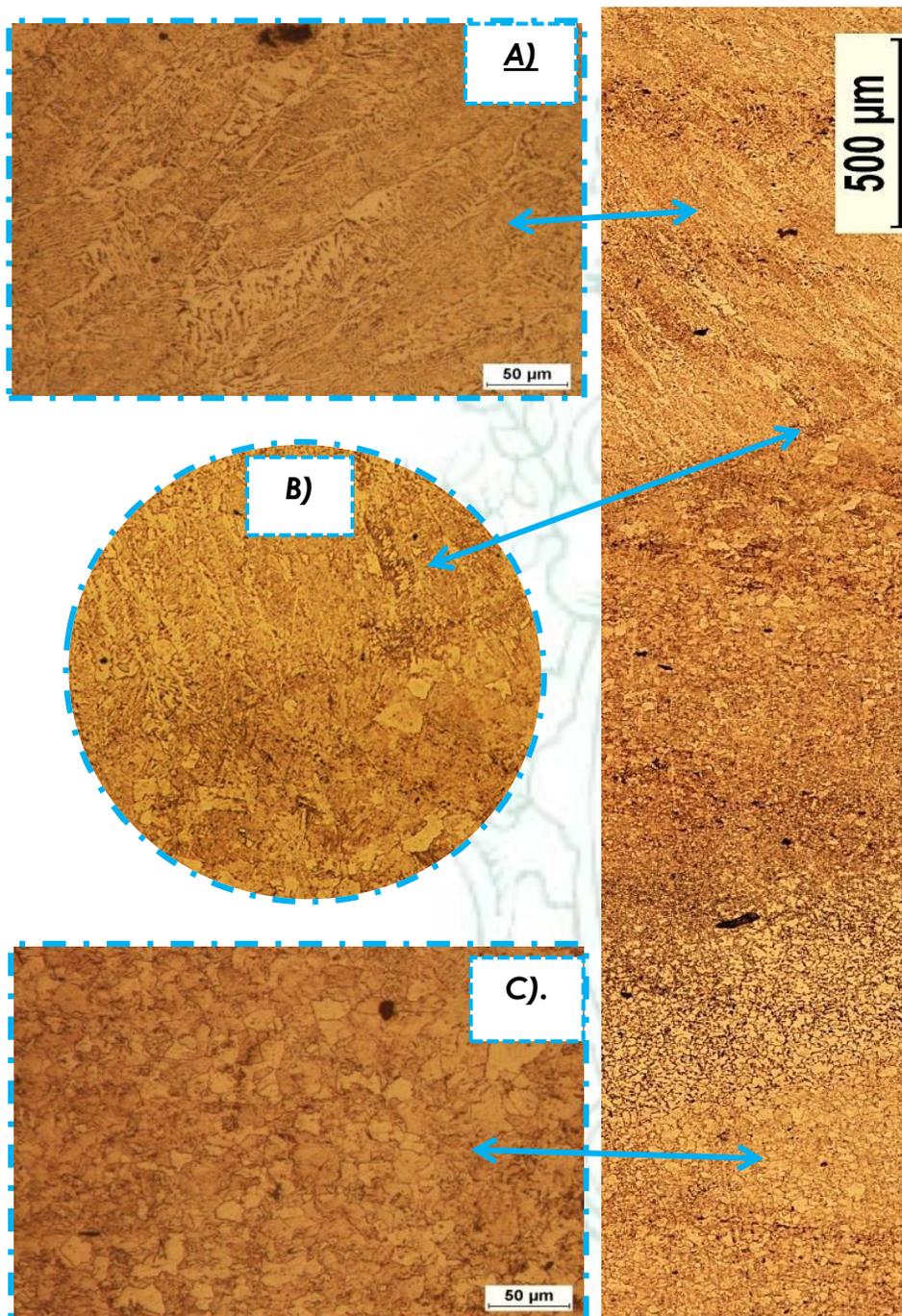


Figura 23. Micrografía de soldadura de la tapa de agarre A) Soldadura B) Zona afectada térmicamente C) Metal base

4.4. ENSAYOS DE FLEXIÓN Y TRACCIÓN A MÉNSULAS ACTUALES DE 13.2 y 44 kV.

Las ménsulas de 13.2 kV como de 44 kV fueron puestas a prueba mediante ensayos de tracción y flexión que permitieron evidenciar algunas fortalezas y debilidades, como se enunciará a continuación para cada tipo de ensayo.

4.4.1. Ensayos de tracción

Realizados los ensayos de tracción a tres ménsulas de 13.2 y 44 kV se encontró que no había deformación permanente, y por supuesto, éstas, no alcanzaron su resistencia última.

Se observó, en las ménsulas de 44 kV, una dificultad para la sujeción a la sección circular, puesto que presentaba unos refuerzos que sobresalían de la superficie de nivel, evitando el contacto efectivo con toda la superficie, Figura 24, generando algunas deformaciones permanentes en la base. Adicionalmente, por no tener aletas en la base, que sí posee la ménsula de 13.2 kV, no permitía una buena estabilidad, por tal razón, se recomienda exigir que la base de anclaje cuente con pestañas, tal que proporcione un mejor agarre y soporte con el poste; además de presentar un contacto completo y uniforme, donde no existan superficies que sobre salgan de las caras de las aletas.

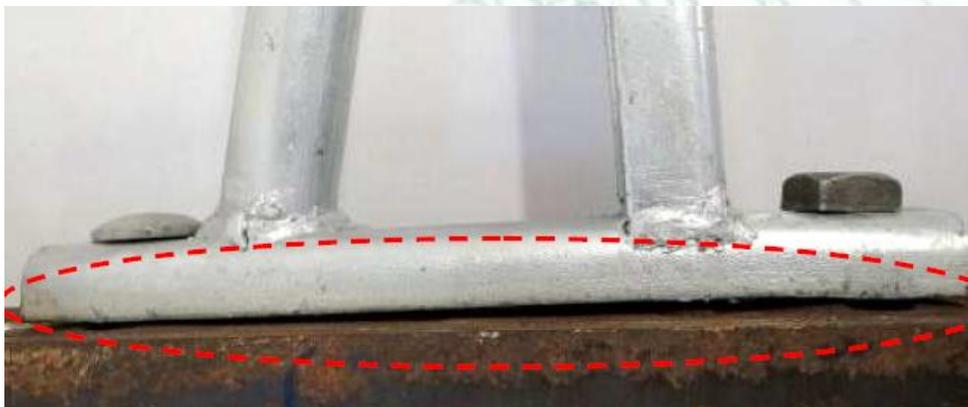


Figura 24. Base con problemas de contacto efectivo.

4.4.2. Ensayos de Flexión

De los ensayos de flexión se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 15:

Tabla 15. Resultados de flexión ménsula de 13.2 kV

Muestra	Carga aplicada, lb-f	Deflexión, mm	Muestra	Carga aplicada, lb-f	Deflexión, mm
1	0	0	2	0	0
	500	1		500	2
	0	1		0	2
	1000	3		1000	4
	0	2		0	3
	1500	4		1500	4
	0	2		0	3
	2000	9		2000	6
	0	3		0	3
	2500	12		2500	10
	0	6		0	4
	3200	21		3200	15
0	10	0	6		
Requisito según RA7-116: Carga mínima 4000 lb-f/17.8 kN Deformación no definida					

De los anteriores resultados, se observó que la ménsula de 13.2 kV (Tabla 15), cumple con los esfuerzos estipulados en la especificación, pero para el caso de la ménsula de 44 kV (Tabla 16) una de las juntas soldadas alrededor de los 2500 a 3000 lb-f, se empieza a agrietar; lo que en principio nos conduce a pensar que la vida útil de esta pieza cuando alcanza dichos esfuerzos se reduce considerablemente.

Adicionalmente, al revisar la RA7-116, no hay claridad a la hora de definir cuál es considerado el criterio de falla, puesto que no dice si las cargas estipuladas son el límite de cedencia o resistencia última a la tensión, si debe fallar después de ese límite o debe quedar intacta; ya que si se considera esos esfuerzos dentro del límite plástico se debería adicionar cual es la deformación máxima permitida, por lo que se hace necesario establecer un criterio de falla conciso (Anexo 1 y 2. Ítem 5.3).

Tabla 16. Resultados de flexión ménsula de 44 kV

Muestra	Carga aplicada, lb-f	Deflexión, mm	Muestra	Carga aplicada, kg-f	Deflexión, mm
1	0	0	2	0	0
	500	2		600	2
	0	0		0	1
	1000	7		1000	2
	0	1		0	1
	1500	15		1500	10
	0	3		0	2
	2000	20		2000	13
	0	4		0	4
	2500	30		2500	18
	0	10		0	9
	3000	31		3000	24
	0	10		0	9
	3200	32		3200	34
0	12	0	10		
<p>Requisito según RA7-116: Carga mínima 4000 lb-f/17.8 kN Deformación no definida</p>					

4.4.3. Caracterización de la grieta generada en la ménsula de 44 kV, después de ensayos de flexión.

Al observar la soldadura encargada de la unión del cuerpo de la ménsula con la base, después del ensayo de flexión, ésta presentó un agrietamiento en la unión soldadura-metal (Figura 25). Como ya se había mencionado, dicho agrietamiento no se produjo en la carga especificada en la RA7-116 puesto que la grieta inició su propagación alrededor de las 2600 libras producto de los defectos de la soldadura.



Figura 25. Agrietamiento producto de ensayo de flexión

Con el fin de analizar la superficie de fractura, y predecir el mecanismo de falla, se trató de propagar dicha grieta fracasando en el intento, ya que:

- ✚ El acero estructural se deformaba en exceso por otras regiones de su cuerpo, no proporcionando la suficiente transferencia del esfuerzo para propagar la grieta.
- ✚ Por otro lado, la unión cuerpo base no solo está dispuesta de una soldadura exterior, sino que está reforzada con una interior (Figura 26) que entre las dos rodean el perfil en “U”, lo que evita que la transferencia de esfuerzos sea completa en la junta que presentó la grieta.

Lo que permite deducir que dicho refuerzo, a pesar de los defectos, descritos en 6.4 análisis de juntas soldadas, es de gran apoyo pues evita la concentración de esfuerzos, en la soldadura externa, que generarían la propagación de la grieta.

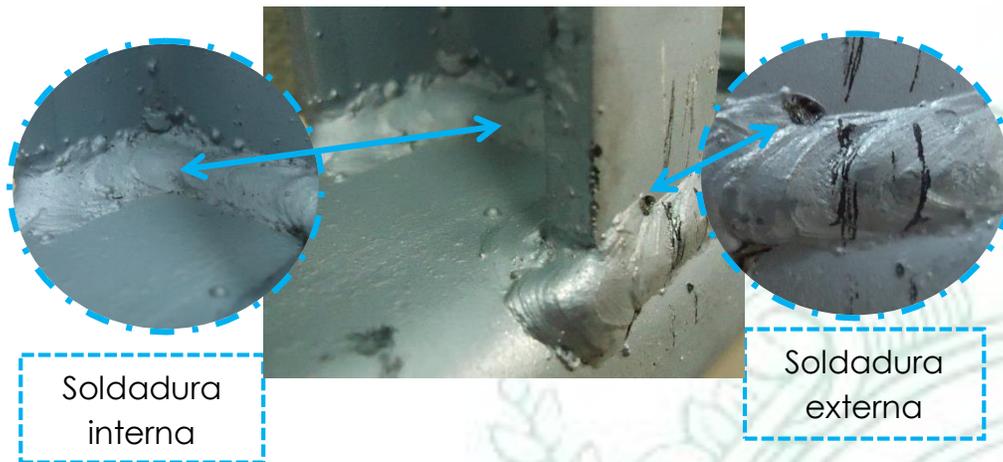


Figura 26. Soldadura externa y soldadura interna (refuerzo)

4.4.3.1. Micrografía de la soldadura.

Se procedió a realizar un corte perpendicular al sentido de propagación de la grieta para tratar de visualizar la profundidad de penetración de esta, sabiendo que esto sólo nos permite visualizar sólo una parte de su comportamiento, sin permitir concluir que pasa con el resto de la grieta.

De ese modo al tratar la macrografía, perpendicular a la grieta-Figura 27, mediante image j (*Image Processing and Analysis in Java*), se obtuvo que, al menos para este caso, la profundidad de la grieta es aproximadamente 58 micras con un recorrido de esta de 102 micras.

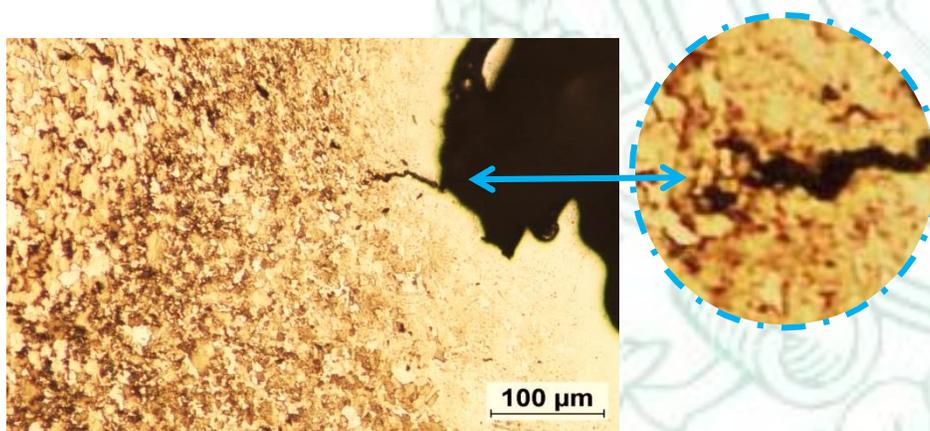


Figura 27. Macrografía de corte perpendicular a la grieta generada en ensayo de flexión

Por otro lado, la grieta, aparentemente se nucleó en la superficie potencializada por el recubrimiento de zinc y llega a un punto en que por efectos de la microestructura trata de bifurcarse, buscando caminos de menor energía.

4.5. MAGNITUDES Y DIRECCIONES DE ESFUERZOS SOPORTADOS POR LAS MÉNSULAS.

Al aplicar las condiciones climáticas, de separación entre postes (vano) y las distintas características de los cables empleados en el sistema compacto de 13.2 y 44 kV, se obtuvieron los resultados mostrados en las Tablas 17 y 18 para la simulación de esfuerzos en la ménsula.

Tabla 17. Resultados de cargas soportadas por la ménsula de 13.2 kV

Condiciones	Cargas (N)		
	Vertical	Transversal	Longitudinal
Viento máximo	2036	1722	0
Viento máximo	2036	-1722	0
Viento mínimo-conductor nuevo	2036	0	0

Tabla 18. Resultados de cargas soportadas por la ménsula de 44 kV

Condiciones	Cargas (N)		
	Vertical	Transversal	Longitudinal
Viento máximo	3570	2595	0
Viento máximo	3570	-2595	0
Viento mínimo-conductor nuevo	3570	0	0

Nota: Vertical: Dirección de la estructura; Transversal: Al cable; Longitudinal: Dirección del cable con ángulos de desvío del cable inferiores a 6°.

A partir de los resultados obtenidos en la simulación se puede observar que:

- ✚ Los esfuerzos a los que están sometidas las ménsulas, tanto en 13.2 kV como en 44 kV, no son solamente verticales (en flexión) sino que hay componentes de esfuerzos en compresión (-) o en tracción (+) según la dirección del viento. Dentro de la especificación se cree que deberían tenerse en cuenta a la hora de determinar la carga que debe soportar la ménsula.
- ✚ Se observa que las cargas en flexión a las que están sometidas las ménsulas son muy inferiores a lo especificado en la RA7-116, que es de 14.23 kN y 17.80 kN [9], comparadas con los resultados de la simulación del PLS CADD que sería de 5.09 kN y 8.925 kN para 13.2 y 44 kV respectivamente, los cuales tienen un factor de seguridad de 2.5 estipulado por el RETIE [5].
- ✚ Debido a que hay variaciones en la dirección del viento, generando esfuerzos tanto de compresión como de tracción, deberían ser considerados esfuerzos de fatiga, que podría generar fallas en la ménsula sin alcanzar su resistencia última.

4.6. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE DISTINTOS TIPOS DE MÉNSULAS POR ELEMENTOS FINITOS.

4.6.1. Esfuerzos en flexión de 14.23 kN (13,2 kV) y de 17.79 kN (44 kV)

Realizada la simulación en Inventor®, elementos finitos, para los distintos diseños y materiales con la resistencia en flexión estipulada por la RA7-116, Figuras 28-29, y hacer una comparación cualitativa, a partir de la distribución de esfuerzos indicada por los colores, se logró observar que tanto para el caso de las ménsulas actuales de 13,2 kV como para las de 44 kV, Figura 28, hay una concentración máxima de esfuerzos que se distribuye sobre todo el perfil en “U”, siendo la zona de intercepción entre el pie de amigo cilíndrico y el perfil en “U” donde se presenta una mayor concentración de esfuerzos.

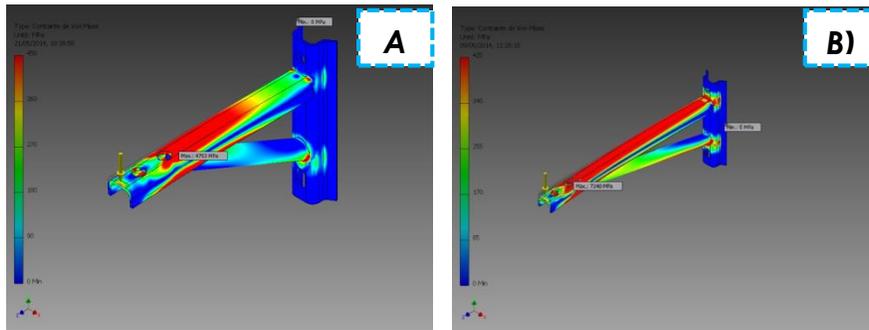


Figura 28. Ménsulas usadas actualmente A) 13.2 kV B) 44 Kv

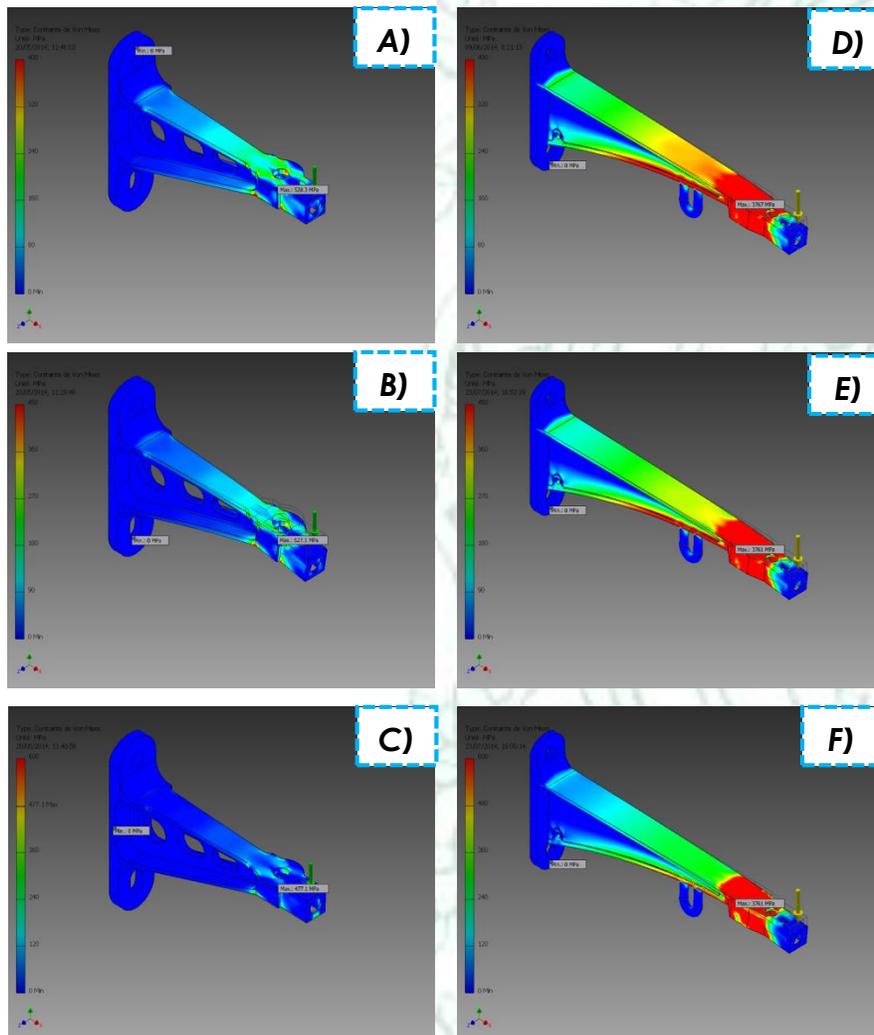


Figura 29. Ménsulas en hierro nodular A, B, C) 13,2 kV; D, E, F) 44 kV.
Grado de fundición A,D) 60-40-18 ; B,E) 70-50-05; C,F) 100-70-03

Al comparar estas ménsulas con las fabricadas en fundición, Figura 29, se observa que la distribución de esfuerzos máximos se reduce considerablemente, presentando un mejor comportamiento las de 13.2 kV, por el menor torque, que está dado por la menor distancia entre la base y el extremo donde se generan los esfuerzos de flexión.

Por otro lado, al comparar las ménsulas fabricadas en fundición se ve que a medida que aumenta la resistencia, la concentración de esfuerzos disminuye, como es de esperarse, debido a las mejores propiedades y a que el diseño es más robusto.

Las diferencias entre la distribución de esfuerzos de las dos ménsulas está dado por varios factores entre los que influye la resistencia del material, puesto que a mayor resistencia menores concentraciones de esfuerzos; además de las propiedades, la mejor distribución de esfuerzos que presenta las ménsulas fundidas está dado por el tipo de diseño, pero sobre todo a que en comparación con las ménsulas que son usadas actualmente, estas son de una mayor robustez, es decir, peso superior.

4.6.2. Esfuerzos según los resultados de PLS CADD con un factor de 2.5; 5.09 kN (13,2 kV) y de 8.925 kN (44 kV)

Al realizar la misma simulación empleando los resultados obtenidos por el software PLS CADD, se encontró que los esfuerzos en flexión junto con los esfuerzos en tracción, generan mayores concentraciones de esfuerzos.

Adicionalmente, como es de esperarse, como la carga en flexión disminuye considerablemente, la distribución de esfuerzos disminuye de igual forma; y sigue prevaleciendo la superioridad de las ménsulas fabricadas en hierro nodular respecto a las que son hechas en perfilería, Figura 30, en el que se observa que la ménsula de 13.2 kV por perfilería todavía presenta concentración de esfuerzos en la intersección perfil en "U" y pie de amigo circular, mientras que la ménsula de 13.2 kV en hierro nodular, no presenta

concentraciones de esfuerzos que sean críticos para su buen funcionamiento.

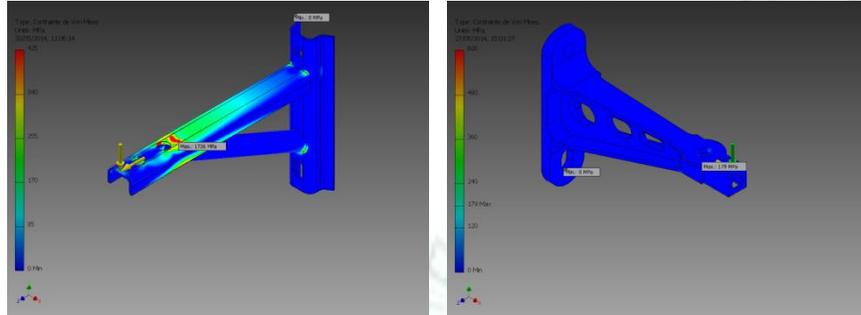


Figura 30. Comportamiento de la ménsula de 13.2 con esfuerzos dados por PLS CADD. A) AISI SAE 1020 B) Hierro nodular

Notas.

- El comportamiento que presenta las otras ménsulas fundidas es muy similar al mostrado
- La comparación que se realiza para las ménsulas de 13.2 kV respecto a las de 44 kV es muy similar, con una mayor concentración de esfuerzos para la que es fabricada en perfilería y similar para la de hierro nodular.

CONCLUSIONES

El estudio realizado a la falla presentada en campo junto con el análisis de las características generales que presentan las ménsulas usadas actualmente por EPM, evidencia que las juntas soldadas presentan un bajo control durante el proceso de fabricación, lo que genera defectos críticos que se convierten en concentradores de esfuerzos así como en potencializadores de corrosión, ocasionando la pérdida de la funcionalidad de estos herrajes.

Por esta razón, es necesario hacer una exigencia al proveedor desde lo que es especificado en la RA7-116, basados en lo que estipula la GTC 110 para la inspección visual así como en el empleo de uno de los métodos de ensayos no destructivos descrito por la NTC 2120, con el fin de garantizar que las juntas soldadas sean de buena calidad, tal que el producto adquirido por EPM lo sea también.

De la caracterización realizada a la ménsula actual; el análisis composicional muestra que el acero estructural usado es un AISI SAE 1020 que además de cumplir la composición química estipulada en la RA7-116, dada por NTC1920 o 1985, presenta una excelente soldabilidad, induciendo a pensar que el proceso de soldadura no está siendo realizado por soldadores calificados que permitan obtener juntas de excelente calidad.

Los resultados de espesor de recubrimiento de Zinc muestran que respecto a lo exigido en la NTC 2076, para las piezas fabricadas en perfilería, no se está cumpliendo con los espesores mínimos y promedios; siendo de gran importancia hacer énfasis en el cumplimiento de esta norma, dado que la resistencia a la corrosión de este tipo de material es muy baja, por lo que si se busca tener durabilidad en el tiempo de estas piezas es un requisito indispensable, que debe ir explícito en la RA7-116.

Por otro lado, en cuanto al análisis realizado al herraje usado en el nivel de tensión de 44 kV, después de realizados los ensayos mecánicos esté presentó

dificultades geométricas para ajustarse a la sección circular del poste, por lo que es indispensable exigir unas aletas que permitan dar mejor estabilidad. También no tiene la resistencia suficiente que le permita soportar las cargas solicitadas en la especificación, y esto se debe a que hay una acumulación de esfuerzos, dado por el tipo de diseño que presta la ménsula, generando una deformación excesiva.

Al simular, los esfuerzos dados por las distancias típicas entre vanos, los tipos de conductores, los accesorios que son suspendidos en la red de distribución así como las condiciones climáticas, usando el software PLS CADD se encontró que para estas condiciones las cargas que soportan las ménsulas, aplicando un factor de seguridad de 2.5 estipulado por el RETIE, son inferiores. Ya que en la especificación no se encuentra definido el criterio de falla, se recomienda establecer estas cargas como las que deben soportar las ménsulas sin deformación permanente (Anexo 1 y 2. Ítem 5.3), conservando las exigencias de resistencia última a la tracción las especificadas en la RA7-116. Los otros esfuerzos que se logran son esfuerzos que pueden ser en tracción o compresión, generados por las características de las condiciones climáticas (dirección del viento).

Para comparar los diseños a los que se tuvo acceso así como analizar la influencia de los esfuerzos diferentes a los de flexión, que fueron dados por PLS CADD; se usó elementos finitos del software de diseño Inventor, para simular las ménsulas bajo las distintas condiciones, encontrándose que las ménsulas fabricadas en hierro nodular presentan una mejor distribución de esfuerzos dado por el tipo de geometría y la robustez de las mismas. Además, la influencia de los esfuerzos dados por PLS CADD en tracción o compresión no es tan marcada comparados con los esfuerzos generados por las cargas aplicadas en flexión; pero si se observa, que los esfuerzos en tracción generan mayores concentraciones esfuerzos que apoyan a los de flexión.

Finalmente, el mercado ofrece una gama de posibilidades en cuanto a diseños y tipos de materiales generando distintas resistencias que pueden

tener las piezas a las que EPM podría tener acceso; pero dado a que la especificación actualmente establece de manera estricta el uso de aceros estructurales, imposibilita el uso de otras tecnologías y materiales.

RECOMENDACIONES

Para tener una mayor certeza del comportamiento de las ménsulas, fabricadas en perfilería en acero estructural, frente a las que son fabricadas en fundición nodular, acero o de aluminio; se recomiendan hacer ensayos mecánicos que permitan evidenciar cuáles tecnologías y diseños prestan un mejor servicio en las redes de distribución eléctrica.

Dado a que se encontró que los esfuerzos tangenciales, diferente a los esfuerzos en flexión, son dados por la dirección del viento; se propone estudiar la influencia de los ciclos de estos esfuerzos, puesto que pueden generar esfuerzos de fatiga que pueden potencializar las fallas en las piezas sin alcanzar la resistencia última.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Giraldo Valencia, Asdrúbal. Ciencia de los materiales Vol. 1. Capítulo 1. Nociones introductorias. Ingeniería de Materiales-Universidad de Antioquia. Pág. 1-23
- [2] Pérez Ayala Mario. Redes de distribución aéreas compactas en media tensión. Proyecto de tesis para optar por el título de ingeniero electricista. Universidad de Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- [3] UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA et al. Curso de Fundamentos sobre fabricación de herrajes para redes de distribución eléctrica. Medellín-Colombia; 2008.
- [4] Enersis, Endesa. Especificación técnica: Herrajes para líneas aéreas de alta tensión (E-LT-005). Abril de 2002. p. 6-8. Disponible en: <http://goo.gl/yRpdVH> [Consultada: 09 de Marzo 2014]
- [5] RETIE. Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. Actualización 2013. p. 174, 216
- [6] Hidrocantábrico Distribución Eléctrica, S.A.U. Especificación técnica. Herrajes y accesorios para líneas aéreas B.T. con conductores aislados en haz. p. 2. Disponible en: <http://goo.gl/oowlYe> [Consultada: 09 de Marzo 2014]
- [7] Hidrocantábrico Distribución Eléctrica, S.A.U. Especificación técnica. Herrajes y accesorios para el tendido aéreo de cables de tierra y/o fibras ópticas. p. 38-40. Disponible en: <http://goo.gl/4sfpga> [Consultada: 09 de Marzo 2014]
- [8] INAEL. Medium Voltage Electrical Equipment. Disponible en: <http://goo.gl/bSqsJs> [Consultada: 01 de Marzo 2014]
- [9] Empresas Públicas de Medellín. Normas de materiales para redes aéreas. Ménsula para 13.2 Kv y 44 kv sistema compacto. RA7-116. Disponible en: <http://goo.gl/l7C1No> [Consultada: 12 de Marzo 2014]

[10] Hendrix. BM-14A, BM-24A, BM-5L Tangent Brackets. Disponible en: <http://goo.gl/t1EfxP> [Consultada: 07 de Marzo 2014]

[11] PLP Brasil. Catálogo de productos de Distribución. Pág. 7-7 Brazos tipo "L". Disponible en: <http://goo.gl/GmQzYj> [Consultada: 07 de Abril 2014]

[12] Southwire Company. Tangent "L" bracket. © 2008. Disponible en: <http://goo.gl/ZoC53S> [Consultada: 10 de Marzo de 2014]

[13] Hendrix. BM-14, BM-24 Tangent Brackets. Disponible en: <http://goo.gl/NI38RO> [Consultada: 07 de Marzo 2014]

[14] Catálogo de IMFICA. Disponible en: <http://goo.gl/4e8j8N> [Consultada: 05 de Marzo 2014]

[15] Norma técnica Colombiana-NTC 2076. Recubrimiento de Zinc por inmersión en caliente para elementos en hierro y acero.

[16] Oosthuizen, Marcel and Lategan, Rikus. Hendrix Covered Conductor Manual. Western Power. 31 May 2010. Disponible en: <http://goo.gl/8h54hR> [Consultada: 06 de Marzo 2014]

[17] Ahmsa. Manual de Diseño para la construcción con Acero. Capítulo I Normas y características a las que se sujetan los aceros fabricados por Altos hornos de México. Disponible en: <http://goo.gl/SizAHH> [Consultada: 10 de Febrero 2014]

[18] Norma técnica Colombiana-NTC 1920. Acero estructural al carbono.

[19] Norma técnica Colombiana-NTC 1985. Aceros de calidad estructural de alta resistencia baja aleación al niobio (*columbio*)-vanadio.

[20] ASM handbook-International. Welding Brazing and Soldering, Volume 6. Fundamentals of welding pag. 15-270, Gas-Metal Arc welding pag. 569-58.

[21] <http://goo.gl/w1NZqD> [Consultada: 03 de Marzo 2014]

[22] Oerlikon-Exsa. Manual de soldadura. Disponible en: <http://goo.gl/P5lnE0> [Consultada: 24 de Febrero 2014]

[23] Indura. Manual de sistemas y materiales de soldadura. Disponible en: <http://goo.gl/pMGFKG> [Consultada: 24 de Febrero 2014]

[24] Kenneth Håkansson. Weld Metal Properties for Extra High Strength Steels. Doctoral Thesis. Report 2002-August. Division of Welding. Department of production Engineering, The Royal Institute of Technology.

[25] Cubero Debess, Saada. Modificación de la morfología del silicio en la aleación de aluminio A356 mediante ciclos de calentamiento y enfriamiento. Caracas, octubre de 2002.

[26] ASTM B26/B26M-12. Standard Specification for Aluminum-Alloy Sand Casting.

[27] ASTM B108/B108 M-12. Standard Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Casting.

[28] Efecto de los tratamientos térmicos en las aleaciones aluminio-silicio. Disponible en: <http://goo.gl/ZRpa6d> [Consultada: 12 de Marzo de 2014]

[29] Bautista L., Joel A.; Pasalagua Chávez, Angélica I. Desgasificado en fundición de Aluminio por medio de pastillas de hexacloroetano. Tesis para obtener título de Ingeniero de Metalurgia y Materiales. México, D.F. Septiembre de 2008. Págs. 34-37

[30] XV. Tratamientos de Fundiciones de hierro. Metalografías y tratamientos térmicos. Disponible en: <http://goo.gl/C406Z0> [Consultada: 12 de Abril de 2014]

[31] ASTM A536-84. Standard Specification for ductile Iron Castings. Reapproved 2009

[32] Castro, Guillermo. Fundiciones. Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A. Buenos Aires, Argentina. Febrero 2009.

[33] Murcia Sánchez, Sandra Carolina. Solidificación de Hierros nodulares, trabajo de grado para optar por título de Magíster en Ingeniería. Universidad EAFIT, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería. Medellín 2012.

[34] Acosta E., Miguel Antonio; Martínez M., Miguel; López., Alfredo. El tratamiento de los hierros nodulares en el mejoramiento de los materiales en la industria automotriz. Publicaciones técnicas No. 148, Sanfandila, Qro, 2000. México.

[35] ASTM A536-84. Standard Specification for ductile Iron Castings. Reapproved 2009

[36] Fundinox Chile S.A. Fundición nodular. Disponible en: <http://goo.gl/3NNqK8> [Consultada: 05 de Mayo de 2014]

[37] Fundiciones de Roda (FR). Equivalencias-fundición nodular. Disponible en: <http://goo.gl/qQdKwi> [Consultada: 06 de Mayo de 2014]

[38] Asociación sudafricana de galvanizadores por inmersión en caliente. Galvanizado general por inmersión en caliente. Disponible en: <http://goo.gl/yBz71G> [Consultada: 08 de Abril de 2014]

[39] Metelmex. Catálogo-Galvanizado por inmersión en caliente. Disponible en: <http://goo.gl/k2l2Wu> [Consultada: 08 de Abril 2014]

[40] Valencia, Asdrúbal. Comportamiento Mecánico de los materiales. Ingeniería de Materiales-Universidad de Antioquia. Medellín-1999. Pág. 372-433.

[41] ASTM E3-11. Standard Guide for preparation of metallographic Specimens.

[42] Norma técnica Colombiana - NTC 3981. Medición del espesor de revestimientos por los métodos de campo magnético o corrientes parásitas.

[43] Guía técnica Colombiana-GTC 1985. Guía para inspección visual de soldaduras

[44] Power Line-Systems-INC-PLS CADD. Disponible en: <http://goo.gl/WmywxB> [Consultada: 18 de Junio de 2014].

[45] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Reglamento colombiano de construcción sismo resistente-NSR 10. Bogotá D.C., Colombia.

[46] Cables de Energía y de Telecomunicaciones S.A. –CENTELSA. Proceso de contratación EPM, PC-2011-008986.

[47] Acero grado maquinaria. AISI 1020. Disponible en: <http://goo.gl/EEc6yU> [Consultada: 15 de Mayo de 2014]

[48] CODENSA S.A. ESP. Especificación técnica-ET443 Soporte tangencial para red compacta de 15 kV y 34,5 kV. Disponible en: <http://goo.gl/gZKbgZ> [Consultada: 21 de Febrero de 2014]

[49] ENSA. Especificaciones cortas vigentes. Enero 2013. Disponible en: <http://goo.gl/xLnMre> [Consultada: 04 de Julio de 2014]

[50] Norma técnica Colombiana-NTC 2120. Soldadura. Guía para la inspección de soldadura mediante ensayos no destructivos.

[51] Porras Arévalo et al. Identificación metalográfica de fases en una junta soldada de acero estructural microaleado y su influencia en el mecanismo de fractura. Revista de Metalurgia. Madrid Vol. Extr. (2005) 137-142.

[52] C. Porta et al. Soldadura de acero inoxidable dúplex 2205 por GMAW mediante el uso de la técnica de arco pulsado. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, V. 23 n. 1 Caracas 2003.

ANEXOS

Especificaciones técnicas y
Características técnicas garantizadas

**ANEXO 1. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA MEJORADA PARA MÉNSULAS FABRICADAS POR
PERFILERÍA CON JUNTAS SOLDADAS**



**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE MATERIALES PARA
REDES DISTRIBUCIÓN AÉREA.**

ENERGÍA

**MÉNSULA PARA 13.2 kV Y 44 Kv DEL
SISMETA COMPACTO**

**MEDELLÍN
COLOMBIA
JULIO 2014**

TABLA DE CONTENIDO

1.	OBJETIVO.....	5
2.	ALCANCE	5
3.	FUNCIÓN	6
4.	CARACTERÍSTICAS.....	7
4.1.	MATERIAL	7
4.2.	DIMENSIONES Y GEOMETRÍA	7
4.3.	MECÁNICAS.....	8
4.4.	QUÍMICAS DE LOS PERFILES	9

4.5.	ACABADO Y RECUBRIMIENTO.....	11
5.	ENSAYOS	12
5.1.	DIMENSIONALES.....	12
5.2.	MECÁNICOS DEL MATERIAL.....	14
5.3.	FLEXIÓN A LA PIEZA.....	15
5.4.	INSPECCIÓN DE LAS JUNTAS SOLDADAS	16
5.4.1.	<i>Evaluación visual</i>	<i>16</i>
5.4.2.	<i>Valoración por Ensayos no destructivos.....</i>	<i>17</i>
5.4.3.	<i>Inspección mediante macrografía (opcional).....</i>	<i>18</i>
6.	MARCACIÓN Y EMPAQUE	18
7.	NORMAS DE REFERENCIA.....	20
8.	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS GARANTIZADAS	24

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. REQUISITOS MECÁNICOS DE LOS PERFILES 9

TABLA 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS PERFILES 10

TABLA 3. ESPESOR DE GALVANIZADO 11

TABLA 4. PLAN DE MUESTREO PARA ENSAYOS MECÁNICOS 14

TABLA 5. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 15

1. OBJETIVO

La especificación técnica tiene como propósito dar a conocer las características dimensionales y los ensayos (destructivos y no destructivos) que deben cumplir las ménsulas usadas por el grupo Empresas Públicas de Medellín (Grupo EPM), en la instalación del sistema compacto, con el fin de garantizar la seguridad, perdurabilidad y correcta funcionalidad de los sistemas de distribución.

2. ALCANCE

Esta especificación hace parte del grupo de materiales normalizados y tiene como propósito fundamental determinar todas las características que deberán tener los

herrajes y accesorios que se usen e instalen en el sistema de distribución de energía del Grupo EPM.

En ella se incluyen las exigencias y características que debe cumplir la ménsula para el sistema de cable cubierto compacto en los niveles de tensión de 13.2 kV y 44 kV.

3. FUNCIÓN

La ménsula es empleada en la construcción de líneas de distribución de energía eléctrica para soportar y dar amarre al cable mensajero sobre el cual se soportan los cables de las fases en el sistema de cable compacto tanto de 13.2 kV como de 44 kV.

4. CARACTERÍSTICAS

4.1. Material

Deben ser construidas en acero estructural con uniones entre perfiles por soldadura, con material de aporte compatible con la composición del acero. Además, la pieza debe ser galvanizada en caliente según la norma NTC 2076.

4.2. Dimensiones y geometría

Las dimensiones de la ménsula serán las especificadas en cada uno de los dibujos que componen esta norma.

La base de anclaje debe contar con unas pestañas, tal que proporcione un buen agarre y soporte con el poste. Adicionalmente, el contacto base poste debe ser completo y uniforme, es decir, no deben haber superficies que sobre salgan sobre las caras de las aletas.

4.3. Mecánicas

Las principales cargas que debe soportar la ménsula son en flexión (V1), tal como se representa en los dibujos que incluye esta especificación. Razón por la cual, los perfiles deben cumplir con unos requisitos mínimos de resistencia, Tabla 1, dados por la NTC 1920 o la NTC 1985-Grado 50.

TABLA 19. REQUISITOS MECÁNICOS DE LOS PERFILES

PROPIEDAD	NTC 1920		NTC 1985- Grado 50	
	Ksi	MPa	Ksi	MPa
Resistencia a la tracción	58-80	400-500	65	450
Límite de fluencia	36	250	50	345
Elongación en 2" o 50mm (min %)	21		18-21	

4.4. Químicas de los perfiles

Los perfiles deben cumplir con la composición química estipulada por la NTC 1920 o NTC 1920 (Grado 50), Tabla 2, con un mínimo dado por la composición del acero AISI SAE 1018.

TABLA 20. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS PERFILES

ELEMENTO	PERFILES	
	NTC 1920	NTC 1985 Grado 50
Carbono, % Máx.	0.15-0.26	0.23
Manganeso, %	----	0.6-1.35
Fósforo, % Máx.	0.04	0.04
Azufre, % Máx.	0.05	0.05
Silicio, % Máx.	0.40	----
Cobre, % Mín.	0.20	----
Vanadio, %	----	0.01-0.15

4.5. Acabado y recubrimiento

Las ménsulas serán totalmente galvanizadas por inmersión en caliente y deberán cumplir con las especificaciones dadas en la norma NTC 2076, clase B, y deben estar libres de burbujas, áreas sin revestimiento, depósitos de escoria, manchas negras, escoriaciones y otro tipo de inclusiones que puedan causar interferencia en el uso específico del producto.

Para zonas contaminadas se especificarán galvanizados superiores a la Norma como se indica en la Tabla 3 de galvanizado.

TABLA 21. ESPESOR DE GALVANIZADO

PROPIEDAD	PROMEDIO	MÍNIMO
-----------	----------	--------

	g/m ²	µm	g/m ²	µm
Zonas no contaminadas (NTC 2076)	610	86	550	79
Zonas contaminadas	825	116	750	105

Los perfiles deben ser en una sola pieza, libres de soldadura, libres de deformaciones, fisuras y aristas cortantes, defectos de laminación. No se permiten dobleces ni rebabas en las zonas de corte, perforadas o punzonadas.

5. ENSAYOS

5.1. Dimensionales

La verificación de las dimensiones se hará con los instrumentos de medida que den la aproximación requerida (cinta metálica con divisiones de 1 mm para longitudes y

calibrador para los diámetros y espesores). Las tolerancias en el ancho y en el espesor del perfil deben estar de acuerdo con la norma NTC 402.

Las tolerancias de los perfiles serán:

- Para el ancho y espesor del perfil: $\pm 5\%$.
- Diámetro de los agujeros: $\pm 5\%$.
- Otras dimensiones: $\pm 1\%$.

5.2. Mecánicos del material

La prueba de tracción se realizará de acuerdo a la norma NTC 2. La prueba de doblamiento se hará de acuerdo a la norma NTC 1. Teniendo en cuenta el plan de muestro para ensayos mecánicos, Tabla 4.

**TABLA 22. PLAN DE MUESTREO PARA ENSAYOS MECÁNICOS
(NIVEL DE INSPECCIÓN ESPECIAL S-3, NAC= 4%)**

TAMAÑO DEL LOTE	TAMAÑO DE LA MUESTRA	NÚMERO PERMITIDO DE DEFECTUOSOS
2 a 15	2	0

16 a 50	3	0
51 a 150	5	0
151 a 500	8	1
501 a 3200	13	1
3201 a 35000	20	2
35000 y más	32	3

5.3. Flexión a la pieza

La ménsula debe cumplir como mínimo con las cargas en flexión (V1) (como muestra la figura que hace parte de esta norma) establecidas en la Tabla 5.

TABLA 23. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

SISTEMA DE VOLTAJE	RESISTENCIA	
	SIN DEFORMACIÓN PERMANENTE Lb-f (KN)	ÚLTIMA Lb-f (KN)
13.2 kV	1144 (5.090)	3200 (14.23)
44 kV	2006 (8.925)	4000 (17.80)

5.4. Inspección de las juntas soldadas

5.4.1. Evaluación visual

La junta soldada no debe evidenciar porosidades, grietas, socavaduras, concavidades, traslape, salpicaduras y otros. La evaluación de la calidad de la soldadura debe hacerse

de acuerdo a lo estipulado por la GTC 110, que en el ítem 4 muestra los defectos generales de la soldadura.

5.4.2. Valoración por Ensayos no destructivos

En acuerdo a la NTC 2120, se debe realizar una valoración de los defectos que visualmente no se logran observar, usando uno de los ensayos no destructivos descritos en esa norma.

El ensayo recomendado es por líquidos penetrantes, puesto que permite detectar defectos abiertos a la superficie que podrían ser puntos potencializadores de corrosión, por acumulación de humedad.

5.4.3. Inspección mediante macrografía (opcional)

Las soldaduras deben tener una buena penetración (GTC 110- 4.4), tal que al unir los perfiles conformen una sola estructura.

Para la preparación metalográfica se debe tener en cuenta la ASTM E3.

6. MARCACIÓN Y EMPAQUE

La ménsula se debe marcar con el distintivo del fabricante, que pueden ser en alto o bajo relieve a opción del fabricante.

Las ménsulas se empacarán en atados zunchados en tamaños que dependerán de la longitud y peso de éstos, de tal manera que no sufran durante el transporte, manipulación y almacenamiento.

En cada atado se colocará un rótulo con la siguiente información:

- Especificación del contenido con su referencia
- Nombre y razón social del proveedor
- País de origen
- Cantidad de elementos
- Peso unitario, peso total bruto y neto
- Nombre de la Empresa Electrificadora
- Número de contrato o pedido
- Fecha de entrega.

7. NORMAS DE REFERENCIA

Las normas que sirven de base para la elaboración de ésta son las siguientes:

NTC 1	Ensayo de doblamiento para productos metálicos.
NTC 2	Ensayo de tracción para productos de acero.
NTC 23	Determinación gravimétrica de carbono por combustión directa, en aceros al carbono.
NTC 24	Determinación del manganeso en aceros al carbono. Método del persulfato.
NTC 25	Determinación del manganeso en aceros al carbono. Método del bismutato.

- NTC 27** Determinación de azufre en aceros al carbono. Método de evolución.
- NTC 180** Método gasométrico para determinación de carbono por combustión directa en hierros y aceros al carbono.
- NTC 181** Aceros al carbono y fundiciones de hierro. Método alcalimétrico para determinación de fósforo.
- NTC 402** Metalurgia. Perfiles de acero laminados en caliente. Ángulos de alas iguales y ángulos de alas desiguales. Tolerancias en dimensiones y en masa. Segunda revisión.
- NTC 1920** Metalurgia. Acero estructural.
- NTC 1985** Acero de calidad estructural de alta resistencia y baja aleación al Niobio (columbio) – vanadio.

- NTC 2057** Metalurgia. Código para calificar el procedimiento para soldar y la habilidad del soldador.
- NTC 2076** Electricidad. Galvanizado por inmersión en caliente para herrajes y perfiles estructurales de hierro y acero.
- NTC 2120** Guía para la inspección de soldaduras mediante ensayos no destructivos
- NTC 2616** Electrotecnia. Crucetas, diagonales y bayonetas metálicas
- NTC 3320** Siderurgia. Recubrimiento de zinc (galvanizado) por inmersión en caliente en productos de hierro y acero.
- NTC-ISO-2859** Control estadístico de calidad, inspección por atributo, planeo de muestra única, doble y múltiple.
- GTC 110** Guía para inspección visual de soldaduras

ASTM A385 Standard practice for providing high quality zinc coatings (hot dip)

ASTM E3 Standard Guide for preparation of metallographic Specimens

8. CARATERÍSTICAS TÉCNIAS GARANTIZADAS

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÒSCAR IVÀN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 24 de 11

El siguiente formulario resume las características técnicas que debe garantizar el fabricante para con las ménsulas, por lo tanto los datos consignados allí pueden estar

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÓSCAR IVÁN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 25 de 11

sometidos a verificación mediante pruebas o ensayos realizados en la empresa o en un laboratorio certificado por el grupo EPM.

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÓSCAR IVÁN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 26 de 11

Nº	CARACTERÍSTICA TÉCNICA	VALOR EXIGIDO POR GRUPO EPM	VALOR GARANTIZADO
1	Fabricante		

PRIMERA VERSIÓN:
2009/12/24

ELABORÓ:
ÓSCAR IVÁN ROJAS GIRALDO

APROBÓ:
RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO

SEGUNDA VERSIÓN:
2014/07/08

REVISÓ:
GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA

2	Los perfiles son de composición química igual o inferior a lo especificado en la RA7-116 (NTC 1920 o NTC 1985-Grado 50)	SI	SI () – NO ()
----------	---	----	-----------------

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÓSCAR IVÀN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 2 de 11

3	El doblado y perforado se efectúa antes del galvanizado	SI	SI () – NO ()
----------	---	----	-----------------

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÓSCAR IVÁN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 2 de 11

4	Las dimensiones de la ménsula deben ser iguales a las especificadas en la RA7-116	SI	SI () – NO ()
----------	---	----	-----------------

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÒSCAR IVÀN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 2 de 11

5	El proceso de galvanizado, el espesor del recubrimiento de zinc y la adherencia cumple con NTC 2076 y 3320, respectivamente.	SI	SI () – NO ()
----------	--	----	-----------------

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÓSCAR IVÁN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 2 de 11

6	Las superficies son lisas, libres de grietas, rebabas o aristas cortantes, acumulaciones o excesos de zinc y	SI	SI () – NO ()
----------	--	----	-----------------

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÓSCAR IVÁN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 2 de 11

	sin zonas desprovistas de recubrimiento.		

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÓSCAR IVÁN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 2 de 11

7	La resistencia sin deformación permanente es igual o superior a lo especificado en la norma RA7-116	SI	SI () – NO ()
----------	---	----	-----------------

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÒSCAR IVÀN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 2 de 11

8	La resistencia última de rotura que soporta la ménsula cumple con lo especificado en la norma RA7-116	SI	SI () – NO ()
----------	---	----	-----------------

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÓSCAR IVÀN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 2 de 11

9	Las juntas soldadas son homogéneas; libres de poros, grietas, socavaduras, salpicaduras y	SI	SI () – NO ()
----------	---	----	-----------------

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÓSCAR IVÁN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 2 de 11

	<p>otros defectos estipulados en la GTC 110. El soldador debe ser calificado de acuerdo a la NTC 2057</p>		

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÓSCAR IVÀN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 2 de 11

10	Los herrajes se empacarán de a 5 unidades en atados zunchados de plástico, de tal manera que no sufran	SI	SI () – NO ()
-----------	--	----	-----------------

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÓSCAR IVÁN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 2 de 11

	durante el transporte, manipulación y almacenamiento		

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÓSCAR IVÁN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 2 de 11

11	Cumple con la norma RA7-116	SI	SI () – NO ()
12	Ménsulas cotizadas:	Ménsula 13.2kV Ménsula 44 kV	SI () – NO () SI () – NO ()

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÒSCAR IVÀN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 2 de 11

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÓSCAR IVÁN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 2 de 11

PRIMERA VERSIÓN: 2009/12/24	ELABORÓ: ÓSCAR IVÁN ROJAS GIRALDO	APROBÓ: RAMÓN HÉCTOR ORTÍZ TAMAYO
SEGUNDA VERSIÓN: 2014/07/08	REVISÓ: GABRIEL JAIME CARMONA ZAPATA	Página 2 de 11

ANEXO 2. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA PARA MÉNSULAS FABRICADAS EN FUNDICIÓN NODULAR O ACERO.



**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE MATERIALES PARA
REDES DISTRIBUCIÓN AÉREA.**

ENERGÍA

**MÉNSULA PARA 13.2 kV Y 44 Kv DEL
SISMETA COMPACTO**

**MEDELLÍN
COLOMBIA
JULIO 2014**

TABLA DE CONTENIDO

1.	OBJETIVO	5
2.	ALCANCE	5
3.	FUNCIÓN	6
4.	CARACTERÍSTICAS	7
4.1.	MATERIAL.....	7
4.2.	DIMENSIONES Y GEOMETRÍA.....	7

4.3.	MECÁNICAS	8
4.4.	QUÍMICAS DE LOS PERFILES	9
4.5.	ACABADO Y RECUBRIMIENTO	11
5.	ENSAYOS.....	12
5.1.	DIMENSIONALES	12
5.2.	MECÁNICOS DEL MATERIAL	13
5.3.	FLEXIÓN A LA PIEZA	15
6.	MARCACIÓN Y EMPAQUE.....	16
7.	NORMAS DE REFERENCIA	17

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. REQUISITOS MECÁNICOS DE LA FUNDICIÓN DE ACERO O NODULAR. 9
 TABLA 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA FUNDICIÓN DE ACERO O NODULAR.. 10
 TABLA 3. ESPESOR DE GALVANIZADO 11
 TABLA 4. PLAN DE MUESTREO PARA ENSAYOS MECÁNICOS..... 14
 TABLA 5. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN 15

1. OBJETIVO

La especificación técnica tiene como propósito dar a conocer las características dimensionales y los ensayos (destructivos y no destructivos) que deben cumplir las ménsulas usadas por el grupo Empresas Públicas de Medellín (Grupo EPM), en la instalación del sistema compacto, con el fin de garantizar la seguridad, perdurabilidad y correcta funcionalidad de los sistemas de distribución.

2. ALCANCE

Esta especificación hace parte del grupo de materiales normalizados y tiene como propósito fundamental determinar todas las características que deberán tener los

herrajes y accesorios que se usen e instalen en el sistema de distribución de energía del Grupo EPM.

En ella se incluyen las exigencias y características que debe cumplir la ménsula para el sistema de cable cubierto compacto en los niveles de tensión de 13.2 kV y 44 kV.

3. FUNCIÓN

La ménsula es empleada en la construcción de líneas de distribución de energía eléctrica para soportar y dar amarre al cable mensajero sobre el cual se soportan los cables de las fases en el sistema de cable compacto tanto de 13.2 kV como de 44 kV.

4. CARACTERÍSTICAS

4.1. Material

Deben ser construidas en fundición de acero o fundición nodular, cumpliendo con las especificaciones estandarizadas por la NTC 4003 (ASTM A27/A27M) o A536, respectivamente. Además, la pieza debe ser galvanizada en caliente según la norma NTC 2076.

4.2. Dimensiones y geometría.

Las dimensiones de la ménsula serán las especificadas en cada uno de los dibujos que componen esta norma.

La base de anclaje debe ser en forma circular, tal que se dé un mejor agarre y soporte con el poste. Adicionalmente, el contacto base poste debe ser completo y uniforme, es decir, no deben haber superficies que sobre salgan.

4.3. Mecánicas

Las principales cargas que debe soportar la ménsula son en flexión (V1), tal como se representa en los dibujos que incluye esta especificación. Razón por la cual, las ménsulas deben cumplir con unos requisitos mínimos de resistencia, dados por los grados especificados en la NTC 4003 (ASTM A27) o la ASTM A536, Tabla 1.

TABLA 24. REQUISITOS MECÁNICOS DE LA FUNDICIÓN DE ACERO O NODULAR

PROPIEDAD	Nodular		Acero	
	Ksi	MPa	Ksi	MPa
Resistencia a la tracción	60-120	414-827	60-70	415-485
Límite de fluencia	40-90	276-621	30-40	205-275
Elongación en 2" o 50mm (min %)	2-18		22-24	

4.4. Químicas de los perfiles

La fundición deben cumplir con la composición química estipulada por la NTC 4003 (fundición en acero) o ASTM A536, Tabla 2, y debe ser bien definido el grado de la fundición, dado por las anteriores normas estandarizadas.

TABLA 25. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA FUNDICIÓN DE ACERO O NODULAR

ELEMENTO	Fundición	
	Nodular	Acero
Carbono, % máx	3.6-3.8	0.25-0.35
Manganeso, % máx	0.15-1.0	0.60-1.20
Fósforo, % máx.	0.03	0.035
Azufre, % máx.	0.002	0.035
Silicio, % máx.	1.8-2.8	0.80
Cromo, %	0.03-0.07	-----
Níquel, %	0.05-0.20	-----

4.5. Acabado y recubrimiento

Las ménsulas serán totalmente galvanizadas por inmersión en caliente y deberán cumplir con las especificaciones dadas en la norma NTC 2076, clase A, y deben estar libres de burbujas, áreas sin revestimiento, depósitos de escoria, manchas negras, escoriaciones y otro tipo de inclusiones que puedan causar interferencia en el uso específico del producto.

Para zonas contaminadas se especificarán galvanizados superiores a la Norma como se indica en la Tabla 3 de galvanizado.

TABLA 26. ESPESOR DE GALVANIZADO

PROPIEDAD	PROMEDIO		MÍNIMO	
	g/m ²	µm	g/m ²	µm

Zonas no contaminadas (NTC 2076)	610	86	550	79
Zonas contaminadas	825	116	750	105

El galvanizado debe ser llevado acabo después de realizar el mecanizado, una adecuada pulida y limpieza superficial, garantizando superficies lisas, libres de rechupes, de deformaciones, fisuras, rebabas y aristas cortantes.

5. ENSAYOS

5.1. Dimensionales

La verificación de las dimensiones se hará con los instrumentos de medida que den la aproximación requerida (cinta metálica con divisiones de 1 mm para longitudes y

calibrador para los diámetros y espesores). Las tolerancias en el ancho y en el espesor del perfil deben estar de acuerdo con la norma NTC 402.

Las tolerancias de los perfiles serán:

- Para el ancho y espesor del perfil: $\pm 5\%$.
- Diámetro de los agujeros: $\pm 5\%$.
- Otras dimensiones: $\pm 1\%$.

5.2. Mecánicos del material

La prueba de tracción se realizará de acuerdo a la norma NTC 2. La prueba de doblamiento se hará de acuerdo a la norma NTC 1. Teniendo en cuenta el plan de muestro para ensayos mecánicos, Tabla 4.

TABLA 27. PLAN DE MUESTREO PARA ENSAYOS MECÁNICOS

(NIVEL DE INSPECCIÓN ESPECIAL S-3, NAC= 4%)

TAMAÑO DEL LOTE	TAMAÑO DE LA MUESTRA	NÚMERO PERMITIDO DE DEFECTUOSOS
2 a 15	2	0
16 a 50	3	0
51 a 150	5	0
151 a 500	8	1
501 a 3200	13	1
3201 a 35000	20	2
35000 y más	32	3

5.3. Flexión a la pieza

La ménsula debe cumplir mínimo con las cargas en flexión (V1) (como muestra la figura que hace parte de esta norma) establecidas en la Tabla 5.

TABLA 28. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

SISTEMA DE VOLTAJE	RESISTENCIA	
	SIN DEFORMACIÓN PERMANENTE Lb-f (KN)	ÚLTIMA Lb-f (KN)
13.2 kV	1144 (5.090)	3200 (14.23)
44 kV	2006 (8.925)	4000 (17.80)

6. MARCACIÓN Y EMPAQUE

La ménsula se debe marcar con el distintivo del fabricante, que pueden ser en alto o bajo relieve a opción del fabricante.

Las ménsulas se empacarán en atados zunchados en tamaños que dependerán de la longitud y peso de éstos, de tal manera que no sufran durante el transporte, manipulación y almacenamiento.

En cada atado se colocará un rótulo con la siguiente información:

- Especificación del contenido con su referencia
- Nombre y razón social del proveedor

- País de origen
- Cantidad de elementos
- Peso unitario, peso total bruto y neto
- Nombre de la Empresa Electrificadora
- Número de contrato o pedido
- Fecha de entrega.

7. NORMAS DE REFERENCIA

Las normas que sirven de base para la elaboración de ésta son las siguientes:

NTC 1 Ensayo de doblamiento para productos metálicos.

NTC 2 Ensayo de tracción para productos de acero.

NTC 23	Determinación gravimétrica de carbono por combustión directa, en aceros al carbono.
NTC 24	Determinación del manganeso en aceros al carbono. Método del persulfato.
NTC 25	Determinación del manganeso en aceros al carbono. Método del bismutato.
NTC 27	Determinación de azufre en aceros al carbono. Método de evolución.
NTC 180	Método gasométrico para determinación de carbono por combustión directa en hierros y aceros al carbono.
NTC 181	Aceros al carbono y fundiciones de hierro. Método alcalimétrico para determinación de fósforo.

- NTC 402** Metalurgia. Perfiles de acero laminados en caliente. Ángulos de alas iguales y ángulos de alas desiguales. Tolerancias en dimensiones y en masa. Segunda revisión.
- NTC 2076** Electricidad. Galvanizado por inmersión en caliente para herrajes y perfiles estructurales de hierro y acero.
- NTC 2616** Electrotecnia. Crucetas, diagonales y bayonetas metálicas
- NTC 3320** Siderurgia. Recubrimiento de zinc (galvanizado) por inmersión en caliente en productos de hierro y acero.
- NTC 4003** Fundiciones Ferrosas. Fundiciones de acero al carbono para aplicaciones generales.
- NTC-ISO-2859** Control estadístico de calidad, inspección por atributo, planeo de muestra única, doble y múltiple.

- GTC 110** Guía para inspección visual de soldaduras
- ASTM A27/A27M** Standard Specification for Steel Castings, Carbon, for General Application.
- ASTM A385** Standard Practice for Providing high quality zinc coatings (hot dip)
- ASTM A536** Standard Specification for Ductile Iron Casting
- ASTM E3** Standard Guide for preparation of metallographic Specimens

