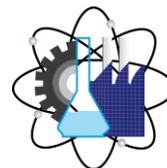




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO
DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

MAESTRIA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE CONECTORES DE HIERRO NODULAR PARA ELEMENTOS REDUNDANTES DE MATERIAL COMPUESTO PARA TORRES DE TRANSMISIÓN

TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

PRESENTA:

ALBERTO HERNÁNDEZ VALDEZ

DIRECTOR DE TESIS INTERNO:
DR. OUTMANE OUBRAM

DIRECTOR DE TESIS EXTERNO:
DR. ISAÍAS RAMÍREZ VÁZQUEZ

Cuernavaca, Morelos, México

OCTUBRE 2019



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT
SGC certificado en la norma ISO 9001:2015



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

Maestría en Ingeniería Eléctrica y Electrónica

"1919-2019: en memoria del General Emiliano Zapata Salazar"

FORMATO T-2
NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA
Y DICTAMEN DE REVISIÓN

Cuernavaca, Mor., a 13 de septiembre de 2019.

Dr. Luis Cisneros Villalobos
Dr. Mario Acosta Flores
Dr. Roy López Sesenes
Dr. Mario Limón Mendoza
Dr. Outmane Oubram
PROFESORES DE LA FCQel
PRESENTE

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta el Ing. Hernández Valdez Alberto titulada: DISEÑO Y FABRICACIÓN DE CONECTORES DE HIERRO NODULAR PARA ELEMENTOS REDUNDANTES DE MATERIAL COMPUESTO PARA TORRES DE TRANSMISIÓN realizada bajo la dirección del Dr. Outmane Oubram en el Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

ATENTAMENTE
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA

DICTAMEN

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQel

PRESENTE

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:

DICTAMEN

NOMBRE	VOTO	FIRMA
Dr. Luis Cisneros Villalobos	Aprobado	
Dr. Mario Acosta Flores	Aprobado	
Dr. Roy López Sesenes	Aprobado	
Dr. Mario Limón Mendoza	Aprobado	
Dr. Outmane Oubram	Aprobado	

Dedicatorias

A Dios por regalarme un aliento de vida cada día, dándome la oportunidad de inventarme un nuevo amanecer de grandes retos, aprendiendo el gran valor que tiene la vida en compañía de los que me aman.

A mis padres María Victoria Sara Valdez Estañol† y Guillermo Hernández González† quienes me enseñaron los valores más preciados para mantenerme erguido a lo largo de la vida.

A mi familia María Antonieta, Judith, Aimé, Amanda, Rubén, Ilse, Oscar, Wendy, Fiorella, Omar, Lucero, Rodolfo, Lourdes, Diana, por su gran apoyo y comprensión en este periodo de cambios.

A mis amigos Mary Carmen Ortega, Xavier, Adalberto Cruz, Antonio Jaime, Sergio, Jesús Millán, Alejandro de Jesús, por su amistad y apoyo incondicional en los momentos más críticos de la maestría.

Agradezco

A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos UAEM y a la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería FCQI, por el apoyo brindado durante mi estancia como alumno.

A los catedráticos de la Maestría en Ingeniería Eléctrica y Electrónica Dr. Outmane, Dr. Cisneros, Dr. Mario, Dr. Roy, Dr. Limón, Dr. Guadalupe, Dra. Viridiana, Dr. Gerardo, por su gran entusiasmo y apoyo en mi formación académica y desarrollo profesional.

Al Dr. Isaías Ramírez Vázquez, por su apoyo incondicional en el desarrollo de este trabajo de tesis, por enseñarme a crecer como ser humano y por su ejemplo de gran calidad humana.

A mis compañeros de maestría Alejandro de Jesús, Hebert, Gustavo, Carlos, Enrique, Aristeo, Eduardo, Cosmos, Omar, por el gran apoyo y trabajo en equipo.

Al M.I. Ramiro Hernández, Ing. Alberto Brito, Dr. David Ponce, M.I. Julio Vergara, Ing. Fernando Ramírez, por su apoyo en la realización de este trabajo.

Al Instituto de Investigaciones Eléctricas hoy Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias y a su gran plantilla de investigadores y personal de apoyo, porque cobijó y atendió mis necesidades, enseñándome a trabajar y adquirir conocimientos, valorándome como ingeniero y ser humano a lo largo de los 28 años de vida profesional.

Resumen

En el siguiente trabajo de tesis se presenta un panorama de los países con mayor afectación en el fenómeno del robo de acero procedente de elementos angulares principales, secundarios y redundantes en la zona del bottom panel, piernas y extensiones, cerramiento y cuerpo piramidal de las torres de las líneas de transmisión.

Debido a la problemática del colapso de las torres de las líneas de transmisión, por falta de elementos redundantes de acero, los cuales son removidos indebidamente; se realiza el análisis estructural asistido por computadora, para una torre de transmisión tipo EA4G23C+10+0 de 400 kV operando bajo diferentes escenarios.

Con base en los resultados de los escenarios anteriores, se diseñaron 8 geometrías de material compuesto tipo polimérico de ingeniería para utilizarse como elementos redundantes en la zona del bottom panel de las torres de las líneas de transmisión y de esa manera, desalentar la remoción indebida o robo de elementos redundantes de acero. Finalmente, cada perfil fue sometido a pruebas normalizadas de flexión y tensión en laboratorio.

Las geometrías fabricadas fueron: Circular de Resina Epoxi con Fibra de Vidrio (REFV), Rectangular de Poliamida Reforzada con Fibra de Vidrio (PRFV), Angular de Resina Vinil Éster con Fibra de Vidrio (RVEFV) y Angular de Resina Epoxi con Fibra de Carbono (REFC).

Para cada una de las geometrías se diseñó un sistema de conexión que fue analizado por el método de elemento finito mediante un programa asistido por computadora. De acuerdo con los resultados del análisis estructural y la experiencia obtenida por los conectores preliminares de acero, se fabricó el diseño final del conector en fundición de hierro nodular para su posterior ensamble con los perfiles de material compuesto mediante el uso de un adhesivo tipo acrílico. Finalmente, el sistema de conexión para los 8 perfiles fue sometido a pruebas de tensión en el laboratorio.

Como consecuencia de los resultados favorables de las pruebas de laboratorio, los elementos redundantes de material compuesto y su mecanismo de conexión, fueron instalados en 8 torres de la línea de transmisión Yautepec-A3640-Topilejo (YTP-A3640-TOP), en 6 torres de la línea de transmisión Temascal Dos-A3460-Puebla Dos (TMD-A3460-PBD) y en 2 torres de la línea de transmisión Ojo de Agua Potencia-A3920-Puebla Dos (OJP-A3920-PBD).

Por último, se analiza el impacto psicosocial del sistema de conexión instalado y se realiza el estudio técnico-económico para los dos tipos de conectores que tuvieron el mejor desempeño en las pruebas de tensión.

Abstract

The following thesis work presents an overview of the countries with the greatest impact on the steel theft phenomenon proceeding of main members, secondary members and redundant angular members installed in the bottom panel, legs and extensions, main and top body of transmission line towers.

Because of the collapse problem of transmission lines towers, due to lack of stolen redundant elements; which are removed improperly, computer-assisted structural analysis is performed for a transmission tower type EA4G23C + 10 + 0 of 400 kV operating under different scenarios.

Based on the results of the previous scenarios, 8 geometries of composite polymeric engineering material were designed to be used as redundant elements in the bottom panel of transmission line towers, and in this way, to discourage removal or redundant steel members' theft. Finally, each profile was subjected to flexion and tension standard tests in laboratory.

The geometries manufactured were Circular of Epoxy Resin with Fiberglass (REFV), Rectangular of Polyamide Reinforced with Fiberglass (PRFV), Angular of Vinyl-Ester Resin with Fiberglass (RVEFV) and Angular of Epoxy Resin with Carbon Fiber (REFC).

For each of the geometries a connection system was designed, and it was analyzed by finite element method using a computer-assisted program. According to the structural analysis results and the obtained experience during the construction of preliminary steel connectors, the final design of the nodular iron cast connector was manufactured for later assembly with the composite profiles using an acrylic adhesive. Finally, the connection system for the 8 profiles was subjected to tension tests in laboratory.

As a result of the favorable results of laboratory tests, the redundant composite members and their connection mechanism were installed in 8 towers of the Yautepec-A3640-Topilejo transmission line (YTP-A3640-TOP), in 6 towers of the Temascal Dos-A3460-Puebla Dos transmission line (TMD-A3460-PBD), and in 2 towers of the Ojo de Agua Potencia-A3920-Puebla Dos transmission line (OJP-A3920-PBD).

Finally, the psychosocial impact of the installed connection system is analyzed and the technical-economic study is carried out for the two types of connectors with the best performance in the tension tests.

Contenido

CAPÍTULO I. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	1
1.3. Objetivo	2
1.4. Objetivos específicos	2
1.5. Justificación	3
1.6. Descripción del contenido de la tesis	3
CAPÍTULO II. Tópicos básicos	5
2.1. Introducción	5
2.2. Líneas de transmisión	5
2.3. Robo de elementos angulares a nivel mundial	6
2.4. Colapso de torres de las líneas de transmisión	9
2.5. Alternativa de solución mediante el uso de materiales compuestos	10
2.6. Problema de conexión con materiales compuestos	11
2.7. Aplicación de la fundición de hierro nodular en la industria eléctrica	11
2.8. Adhesivo en la industria	12
2.9. Conclusión del capítulo	15
CAPÍTULO III. Metodología	16
3.1. Introducción	16
3.2. Análisis de la importancia de los elementos redundantes en las torres de transmisión	16
3.3. Selección y caracterización de los materiales compuestos	22
3.4. Requerimientos mínimos del perfil de material compuesto	25
3.5. Evaluación mecánica de los materiales compuestos –Prueba de flexión–	26
3.6. Perforación de los materiales compuestos	27
3.7. Adhesivo	27
3.7.1. Selección del adhesivo	27
3.7.2. Requerimientos mínimos	28
3.7.3. Junta adhesiva	28
3.7.4. Área de contacto	28
3.7.5. Tipo de sustrato	30

3.7.6.	<i>Preparación de las superficies</i>	30
3.7.7.	<i>Tipo de falla en la junta adhesiva</i>	30
3.8.	<i>Requerimientos mínimos para el diseño de los conectores</i>	31
3.9.	<i>Diseño preliminar del conector de acero AISI 1020</i>	33
3.9.1.	<i>Requerimientos mínimos del conector de acero</i>	33
3.9.2.	<i>Evaluación mecánica del conector de acero –Prueba de tensión–</i>	34
3.9.2.1.	<i>Geometría circular</i>	35
3.9.2.2.	<i>Geometría rectangular</i>	35
3.9.2.3.	<i>Geometría angular</i>	35
3.10.	<i>Diseño preliminar del conector de fundición de hierro nodular ASTM A536</i> 36	
3.10.1.	<i>Requerimientos mínimos del conector de fundición de hierro nodular</i>	36
3.10.2.	<i>Análisis de los esfuerzos mecánicos del conector preliminar de fundición de hierro nodular por el método de elemento finito</i>	36
3.10.3.	<i>Fabricación de los conectores preliminares de fundición de hierro nodular</i> 38	
3.10.4.	<i>Evaluación mecánica del conector preliminar de fundición de hierro nodular –Prueba de tensión–</i>	40
3.10.4.1.	<i>Geometría circular</i>	40
3.10.4.2.	<i>Geometría rectangular</i>	41
3.10.4.3.	<i>Geometría angular</i>	41
3.11.	<i>Diseño final del conector</i>	42
3.11.1.	<i>Volumetría de los materiales</i>	42
3.11.2.	<i>Tipo de material utilizado en el diseño del conector</i>	42
3.11.3.	<i>Requerimientos del cuerpo del herraje</i>	42
3.11.4.	<i>Requerimientos del cuerpo del conector</i>	43
3.11.5.	<i>Análisis de esfuerzos mecánicos del conector por el método de elemento finito</i> 43	
3.11.6.	<i>Fabricación de los conectores</i>	46
3.11.7.	<i>Ensamble de los materiales</i>	47
3.11.8.	<i>Evaluación mecánica del conector final de fundición de hierro nodular – Prueba de tensión–</i>	47
3.11.8.1.	<i>Geometría circular</i>	48
3.11.8.2.	<i>Geometría rectangular</i>	48
3.11.8.3.	<i>Geometría angular de REFC</i>	49

3.11.8.4.	Geometría angular de RVEFV	49
3.11.8.5.	Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR	49
3.11.8.6.	Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR + tornillos	50
3.11.8.7.	Geometría rectangular híbrida de PRFV + tornillos	50
3.11.8.8.	Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR + adhesivo 4	51
3.11.8.9.	Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR + tornillos + adhesivo 4	51
3.11.8.10.	Geometría rectangular híbrida de PRFV + adhesivos 2 y 3	51
3.11.8.11.	Geometría rectangular de PRFV + tornillos	52
3.11.8.12.	Geometría angular híbrida de REFC + adhesivo tipo 2 + tornillos	52
3.11.8.13.	Geometría angular híbrida de REFC + tornillo	52
3.12.	Conclusión del capítulo	53
CAPÍTULO IV. Resultados de las pruebas		54
4.1.	Introducción	54
4.2.	Equipo universal de pruebas mecánicas	54
4.3.	Evaluación mecánica de los materiales compuestos –Prueba de flexión–	54
4.4.	Evaluación mecánica del conector de acero –Prueba de tensión–	57
4.4.1.	Geometría circular	57
4.4.2.	Geometría rectangular	58
4.4.3.	Geometría angular	60
4.4.4.	Análisis de los resultados de las pruebas mecánicas	62
4.5.	Evaluación mecánica del conector preliminar de fundición de hierro nodular – Prueba de tensión–	63
4.5.1.	Geometría circular	63
4.5.2.	Geometría rectangular	65
4.5.3.	Geometría angular	66
4.5.4.	Análisis de los resultados de las pruebas mecánicas	68
4.6.	Evaluación mecánica del conector final de fundición de hierro nodular – Prueba de tensión–	69
4.6.1.	Geometría circular	69
4.6.2.	Geometría rectangular	70
4.6.3.	Geometría angular de REFC	72
4.6.4.	Geometría angular de RVEFV	74
4.6.5.	Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR	76
4.6.6.	Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR + tornillos	78

4.6.7.	Geometría rectangular híbrida de PRFV + tornillos	80
4.6.8.	Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR + adhesivo 4	81
4.6.9.	Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR + tornillos + adhesivo 4	82
4.6.10.	Geometría rectangular híbrida de PRFV + adhesivos 2 y 3	84
4.6.11.	Geometría rectangular de PRFV + tornillos	85
4.6.12.	Geometría angular híbrida de REFC + adhesivo tipo 2 + tornillos	86
4.6.13.	Geometría angular híbrida de REFC + tornillo	88
4.7.	Conclusión del capítulo	89
CAPÍTULO V. Aplicación en campo		91
5.1.	Introducción	91
5.2.	Descripción de las torres de las líneas de transmisión	91
5.3.	Procedimiento para el retiro de los elementos redundantes de acero de la torre 91	
5.4.	Preparación y ensamble del sistema de conexión	93
5.4.1.	Procedimiento para la preparación de los materiales poliméricos de ingeniería	94
5.4.2.	Procedimiento para la preparación de los conectores de hierro nodular ... 94	
5.4.3.	Procedimiento para la aplicación del adhesivo	95
5.5.	Instalación de elementos redundantes de material polimérico de ingeniería .97	
5.6.	Solución a dificultades de diseño	102
5.7.	Comportamiento actual	103
5.8.	Impacto Psicosocial	108
5.9.	Estudio técnico y económico	110
5.9.1.	Estudio técnico	110
5.9.2.	Estudio Económico	111
5.10.	Conclusión del capítulo	115
CAPÍTULO VI. Conclusiones y trabajos futuros		116
6.1.	Introducción	116
6.2.	Conclusiones	116
6.3.	Trabajos futuros	117
BIBLIOGRAFÍA		119

Índice de figuras

Figura 2.2–1. Partes de una torre de transmisión.....	6
Figura 2.3–1. Elementos que integran el bottom panel.	7
Figura 2.3–2. Elementos sustraídos del bottom panel.....	8
Figura 2.3–3. Torres con elementos sustraídos (de izquierda a derecha [23][19][18][26]).	8
Figura 2.4–1. Torre típica colapsada en México [27].	9
Figura 2.5–1. Materiales compuestos seleccionados.....	11
Figura 2.6–1. Modos de falla: (a) Aplastamiento, (b) Sección neta, (c) Desgarre y (d) Grieta.....	11
Figura 2.8–1. Herrajes convencionales.	13
Figura 3.2–1. Estadística de elementos angulares de las torres de 115, 230 y 400 kV. ...	17
Figura 3.2–2. <i>Cuerpo básico de la torre EA4G23C+10+0, considerado en el análisis estructural.</i>	19
Figura 3.3–1. Deformación y porcentaje de utilización para los escenarios I y II para los casos a y b.	22
Figura 3.3–2. Deformación de la torre para el escenario II, caso c.	23
Figura 3.6–1. Fractura del material compuesto.....	27
Figura 3.7.3–1. Representación gráfica de la volumetría del adhesivo.....	28
Figura 3.8–1. Diámetro y longitud de contacto de un tornillo.	31
Figura 3.9.1–1. Conectores preliminares de acero AISI 1020.	34
Figura 3.10.2–1. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector circular.	37
Figura 3.10.2–2. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector rectangular.	37
Figura 3.10.2–3. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector angular.....	38
Figura 3.10.3–1. Partes del conector circular preliminar.	40
Figura 3.11.5–1. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector rectangular para perfil de 2m.	44
Figura 3.11.5–2. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector rectangular para perfil de 4 m.	44
Figura 3.11.5–3. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector circular para perfil de 2 m.	44
Figura 3.11.5–4. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector circular para perfil de 4 m.	45
Figura 3.11.5–5. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector angular para perfil de 2 m.....	45
Figura 3.11.5–6. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector angular para perfil de 4 m.....	45
Figura 3.11.5–7. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector angular para perfiles de 2 m.....	46
Figura 3.11.5–8. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector angular para perfil de 4 m.....	46
Figura 3.11.6–1. Conectores finales de fundición de hierro nodular.	47

Figura 4.2–1. Equipo universal para pruebas mecánicas.....	54
Figura 4.3–1. Prueba de flexión en materiales compuestos de 4 m de longitud.	56
Figura 4.4.1–1. Comportamiento de la junta adhesiva en el perfil circular de REFV y conector de acero adheridos con adhesivos tipo 1 y 2.	57
Figura 4.4.1–2. Conector de acero y perfil circular de REFV al final de la evaluación.	58
Figura 4.4.2–1. Comportamiento de la junta adhesiva en el perfil rectangular de PRFV y conector de acero adheridos con adhesivo tipo 1.....	59
Figura 4.4.2–2. Conector de acero y perfil rectangular de PRFV al final de la evaluación.	60
Figura 4.4.3–1. Comportamiento de la junta adhesiva en el perfil angular de RVEFV y conector de acero adheridos con adhesivo tipo 1.....	61
Figura 4.4.3–2. Conector de acero y perfil rectangular de RVEFV al final de la evaluación.	62
Figura 4.5.1–1. Comportamiento de la junta adhesiva en el perfil circular de REFV y conector de fundición de hierro nodular adheridos con adhesivo tipo 2.	63
Figura 4.5.1–2. Conector de fundición de hierro nodular y perfil circular de REFV al final de la evaluación.....	64
Figura 4.5.2–1. Comportamiento de la junta adhesiva en el perfil rectangular de PRFV y conector de acero adheridos con adhesivo tipo 2.....	65
Figura 4.5.2–2. Conector de fundición de hierro nodular y perfil rectangular de PRFV al final de la evaluación.	66
Figura 4.5.3–1. Comportamiento de la junta adhesiva en el perfil angular de RVEFV y conector de fundición de hierro nodular adheridos con adhesivo tipo 2.	67
Figura 4.5.3–2. Conector de fundición de hierro nodular y Perfil rectangular de RVEFV al final de la evaluación.	68
Figura 4.6.1–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2.....	69
Figura 4.6.1–2. Sustratos al final de la evaluación.	70
Figura 4.6.2–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2.....	71
Figura 4.6.2–2. Sustratos al final de la evaluación.	72
Figura 4.6.3–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2.....	73
Figura 4.6.3–2. Sustratos al final de la evaluación.	74
Figura 4.6.4–1. Fuerza de adhesión con adhesivo tipo 2 y área de contacto.....	75
Figura 4.6.4–2. Sustratos al final de la evaluación.	76
Figura 4.6.5–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2.....	77
Figura 4.6.5–2. Sustratos al final de la evaluación.	78
Figura 4.6.6–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2.....	79
Figura 4.6.6–2. Sustratos al final de la evaluación.	80
Figura 4.6.7–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2.....	80
Figura 4.6.7–2. Sustratos al final de la evaluación.	81
Figura 4.6.8–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 4.....	82
Figura 4.6.9–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 4.....	83
Figura 4.6.10–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2 y 3.	84
Figura 4.6.11–1. Mínima fuerza de tensión en materiales tipo PRFV con tornillo.....	85
Figura 4.6.11–2. Fractura del material de PRFV sujeta con tornillos.	86
Figura 4.6.12–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2 + tornillo. .	87

Figura 4.6.12–2. Sustratos al final de la evaluación.....	87
Figura 4.6.13–1. Mínima fuerza de tensión en materiales tipo PRFV con tornillo.....	88
Figura 4.6.13–2. Fractura del material de REFC sujeta con tornillos.....	89
Figura 5.3–1. Torres típicas de las líneas de transmisión.....	92
Figura 5.3–2. Retiro de los elementos redundantes de acero de la torre.....	93
Figura 5.4.1–1. Preparación de los materiales compuestos.....	94
Figura 5.4.2–1. Preparación de los conectores de hierro nodular.....	95
Figura 5.4.3–1. Aplicación del adhesivo.....	96
Figura 5.5–1. Instalación de los perfiles en la torre.....	98
Figura 5.5–2. Perfiles instalados de RVFC.....	99
Figura 5.5–3. Perfiles instalados de PRFV.....	100
Figura 5.5–4. Perfiles instalados de RVEFV.....	100
Figura 5.5–5. Perfiles instalados de RVEFV y REFV.....	100
Figura 5.5–6. Perfiles instalados de PRFV.....	101
Figura 5.5–7. Perfiles instalados de (a) PRFV y RVEFV, y (b) RVFC.....	101
Figura 5.5–8. Perfiles instalados de (a) RVEFV y (b) RVEFV y REFV.....	101
Figura 5.5–9. Perfiles instalados de (a) RVEFV y REFV, y (b) RVEFV y REFV.....	102
Figura 5.6–1. Elementos redundantes de acero no sustituidos en las torres.....	103
Figura 5.7–1. Conexión de 2 perfiles en un mismo punto de conexión.....	104
Figura 5.7–2. Torre 99 de la línea de transmisión YTP-A3640-TOP antes (a) y después (b) del robo de elementos y su rehabilitación (c).....	106
Figura 5.7–3. Torre 101 de la línea de transmisión YTP-A3640-TOP antes (a) y después (b) del robo de elementos y su rehabilitación (c).....	108
Figura 5.8–1. Comparación de elementos redundantes de material compuesto de RVFC y acero.....	109
Figura 5.9.1–1. Partes que integran un elemento redundante de material compuesto tipo RVEFV.....	111
Figura 5.9.2–1. Elemento redundante de material compuesto tipo REFV.....	112
Figura 5.9.2–2. Elemento redundante de material compuesto tipo RVEFV.....	112
Figura 5.9.2–3. Relación costo – pruebas de laboratorio.....	112

Índice de tablas

Tabla 2.8–1. Ventajas y desventajas de los adhesivos.....	14
Tabla 3.2–1. Caracterización de la estructura.....	17
Tabla 3.2–2. Propiedades mecánicas del acero estructural de los elementos angulares..	17
Tabla 3.2–3. Esfuerzos de compresión para los escenarios I y II.....	20
Tabla 3.2–4. Utilización máxima de compresión para los escenarios I y II.....	20
Tabla 3.2–5. Esfuerzo de compresión de los elementos principales de las piernas para los escenarios I y II.....	21
Tabla 3.2–6. Utilización máxima de compresión de los elementos principales de las piernas para los escenarios I y II.....	21
Tabla 3.3–1. Capacidad máxima de esfuerzo cortante y de aplastamiento de la conexión y esfuerzo máximo de compresión en los elementos redundantes y secundarios.....	24
Tabla 3.4–1. Evaluación de la relación de esbeltez para determinar la geometría y volumetría del perfil.....	25
Tabla 3.7.1–1. Propiedades mecánicas de los adhesivos seleccionados.....	27
Tabla 3.8–1. Valores máximos de esfuerzo cortante, aplastamiento y compresión.....	32
Tabla 3.8–2. Diámetro y longitud de contacto del tornillo.....	32
Tabla 3.9.1–1. Caracterización del conector.....	33
Tabla 3.9.2.1–1. Características del ensamble para una geometría circular.....	35
Tabla 3.9.2.2–1. Características del ensamble para una geometría rectangular.....	35
Tabla 3.9.2.3–1. Características del ensamble para una geometría angular.....	36
Tabla 3.10.1–1. Propiedades mecánicas de la fundición de hierro nodular.....	36
Tabla 3.10.2–1. Valor máximo de la tensión y desplazamiento de los conectores simulados.....	38
Tabla 3.10.3–1. Características de la fundición de hierro nodular.....	39
Tabla 3.10.3–2. Matriz de elementos químicos de la fundición de hierro nodular.....	39
Tabla 3.10.4.1–1. Características del ensamble para una geometría circular.....	40
Tabla 3.10.4.2–1. Características del ensamble para una geometría rectangular.....	41
Tabla 3.10.4.3–1. Características del ensamble para una geometría angular.....	41
Tabla 3.11.1–1. Volumetría de conectores de fundición de hierro nodular.....	42
Tabla 3.11.8.1–1. Características del ensamble para una geometría circular.....	48
Tabla 3.11.8.2–1. Características del ensamble para una geometría rectangular.....	48
Tabla 3.11.8.3–1. Características del ensamble para una geometría angular.....	49
Tabla 3.11.8.4–1. Características del ensamble para una geometría angular.....	49
Tabla 3.11.8.5–1. Características del ensamble para una geometría rectangular híbrida.....	50
Tabla 3.11.8.6–1. Características del ensamble para una geometría rectangular híbrida.....	50
Tabla 3.11.8.7–1. Características del ensamble para una geometría rectangular híbrida.....	50
Tabla 3.11.8.8–1. Características del ensamble para una geometría rectangular híbrida.....	51
Tabla 3.11.8.9–1. Características del ensamble para una geometría rectangular híbrida.....	51
Tabla 3.11.8.10–1. Características del ensamble para una geometría rectangular híbrida.....	51
.....	51
Tabla 3.11.8.11–1. Características del ensamble para una geometría rectangular híbrida.....	52
.....	52
Tabla 3.11.8.12–1. Características del ensamble para una geometría angular híbrida.....	52

Tabla 3.11.8.13–1. Características del ensamble para una geometría angular híbrida.	52
Tabla 4.3–1. Resultados de la prueba de flexión de los materiales compuestos.	55
Tabla 4.3–2. Resultados de la prueba de flexión en los perfiles rectangulares híbridos....	56
Tabla 4.4.1–1. Tipo de falla en la unión de los sustratos de perfil de REFV y conector de acero.....	58
Tabla 4.4.2–1. Tipo de falla en la unión de los sustratos de perfil de PRFV y conector de acero.....	59
Tabla 4.4.3–1. Tipo de falla en la unión de los sustratos de perfil de PRFV y conector de acero.....	61
Tabla 4.5.1–1. Tipo de falla en la unión de los sustratos de perfil de REFV y conector de fundición de hierro nodular.	64
Tabla 4.5.2–1. Tipo de falla en la unión de los sustratos de perfil de PRFV y conector de fundición de hierro nodular.	66
Tabla 4.5.3–1. Tipo de falla en la unión de los sustratos de perfil de RVEFV y conector de fundición de hierro nodular.	67
Tabla 4.6.1–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos de perfil de REFV y fundición de HN.....	70
Tabla 4.6.2–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos de perfil de PRFV y HN.	71
Tabla 4.6.3–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos de perfil de REFC y HN.	73
Tabla 4.6.3–2. Tipo de fallo en la unión de los sustratos de perfil de REFC y HN.	74
Tabla 4.6.4–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos de perfil de RVEFV y HN.	75
Tabla 4.6.5–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos híbridos.	77
Tabla 4.6.6–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos híbridos.	79
Tabla 4.6.7–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos híbridos.	81
Tabla 4.6.8–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos híbridos.	82
Tabla 4.6.9–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos híbridos.	83
Tabla 4.6.10–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos híbridos.	84
Tabla 4.6.11–1. Mínima fuerza de tensión y tipo de fallo.	85
Tabla 4.6.12–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos híbridos.	87
Tabla 4.6.13–1. Mínima fuerza de tensión y tipo de fallo.	88
Tabla 5.3–1. Características de las torres de transmisión involucradas.	92
Tabla 5.5–1. Equivalencia entre materiales compuestos y de acero para remplazar en las torres de transmisión de la CFE.....	97
Tabla 5.5–2. Número de elementos de material compuesto instalados por torre.	98
Tabla 5.9.2–1. Características de los materiales compuestos tipo poliméricos de ingeniería.	113
Tabla 5.9.2–2. Características de los conectores de fundición de hierro nodular.	113
Tabla 5.9.2–3. Costos de los materiales.	114
Tabla 5.9.2–4. Costo total por torre.....	114

Nomenclatura

Símbolo	Descripción
CFE	Comisión Federal de Electricidad
ENATREL	Empresa Nacional de Transmisión Eléctrica
EPE	Empresa Provincial de la Energía
ETED	Empresa de Transmisión Eléctrica Dominicana
EPR	Empresa Propietaria de la Red
H	Hora
HN	Hierro Nodular
kgf	Kilogramo Fuerza
kN	Kilo Newton
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascales
N	Newton
PTR	Perfil Tubular Rectangular
PRFV	Poliamida Reforzada con Fibra de Vidrio
RBi	Elemento Redundante en el Bottom Panel i
SBi	Elemento Secundario en el Bottom Panel i
SIEPAC	Sistema de Interconexión Eléctrico para los Países de América Central
REFC	Resina Epoxi con Fibra de Carbono
REFV	Resina Epoxi con Fibra de Vidrio
RVEFV	Resina Vinil Éster con Fibra de Vidrio

“El tiempo ganó, pero la actitud
decidió”

Alberto H. V.

CAPÍTULO I. Introducción

1.1. *Introducción*

Las torres para las líneas de transmisión utilizadas para el transporte de la energía eléctrica en 115, 230 y 400 kV, están hechas de elementos angulares de acero de diferentes calibres, longitudes y dimensiones, que por su peso pueden ser comercializadas en los mercados de desechos industriales y chatarreras a un valor monetario relativamente alto. Sin embargo, cuando los elementos principales, secundarios y redundantes son sustraídos de la zona del bottom panel, cerramiento o del cuerpo piramidal, la confiabilidad del sistema eléctrico se ve comprometida, ya que, la torre puede colapsar ante vientos mínimos o moderados, como ha ocurrido en México, República Dominicana, Nicaragua, Argentina, Honduras y El Salvador entre otros, provocando el corte en el suministro de energía eléctrica, dejando a miles de usuarios sin ella, representando una inversión significativa para la compañía suministradora de energía eléctrica.

Como parte importante de las pérdidas no técnicas que involucran el robo de perfiles de material de acero de las torres de las líneas de transmisión, se requiere de un cambio psicosocial que impacte en la reducción de este fenómeno, esto se podría lograr mediante la implementación de un sistema de conexión que incluya materiales diferentes al acero.

En algunos países como Estados Unidos, India y China se han construido torres completas para líneas de transmisión con materiales compuestos tipo polimérico de ingeniería. Se realizaron búsquedas bibliográficas a nivel mundial sobre el tema, sin embargo; no existe evidencia de materiales compuestos instalados en torres de transmisión existentes. Los materiales compuestos tienen excelentes propiedades mecánicas que pueden superar las del acero, por supuesto, estos materiales son costosos en su inversión inicial, pero puede ser una alternativa de solución viable para el robo de elementos angulares de acero.

1.2. *Antecedentes*

La investigación de los materiales compuestos tipo polimérico de ingeniería disponibles en el mercado, permitió identificar 17 materiales que pueden ser utilizados en las torres de transmisión, como opción para la sustitución de los elementos angulares metálicos en la zona del bottom panel. Las características mecánicas como tensión y flexión de las alternativas fueron evaluadas en el laboratorio y simuladas con software de análisis de

elemento finito. Asimismo, se evalúa la factibilidad de remplazar los elementos metálicos por materiales compuestos tipo polimérico de ingeniería, por medio del análisis estructural basado en los elementos redundantes y los elementos principales según las recomendaciones de la norma ASCE 10-97 que permite conocer las cargas actuantes de los elementos en una torre de transmisión. Esta metodología verifica que los elementos evaluados cumplan la relación de esbeltez, la resistencia a la compresión y la resistencia de los elementos horizontales sometidos a una carga perpendicular. En una primera etapa, las probetas de materiales poliméricos de ingeniería fueron probados en el laboratorio mecánico para la prueba de tensión sujetos de dos maneras: con tornillo, que implica la perforación de los materiales compuestos en sus extremos y mediante mordazas, las cuales solo presionan los extremos del material sin necesidad de perforarlos. Las probetas sujetas por tornillo presentaron desgarre en el orificio de la conexión.

Para evitar este efecto de desgarre en los materiales poliméricos de ingeniería, se propone el diseño de un conector, el cuál proporcionará ventajas como la conexión de los elementos redundantes de material compuesto con el resto de los elementos de la torre de transmisión, disminuyendo las pérdidas no técnicas a través de la minimización del material de acero involucrado.

1.3. Objetivo

El objetivo principal de este trabajo de tesis es proporcionar una alternativa de solución a la problemática del creciente fenómeno del robo de elementos metálicos de las torres de transmisión, mediante la reposición de los elementos metálicos por materiales menos atractivos y no comerciables por el mercado de desechos industriales, chatarreras o talleres metalúrgicos.

1.4. Objetivos específicos

- a) Diseñar, validar, fabricar y probar en laboratorio conectores de fundición de hierro nodular y adhesivo para conectar los elementos redundantes de material compuesto tipo polimérico de ingeniería con los elementos principales y secundarios de acero de las torres de transmisión.
- b) Sustituir los elementos redundantes de acero existentes, por el sistema de conexión fabricado, en la zona del bottom panel y cerramiento de 16 torres distribuidas en tres líneas de transmisión seleccionadas por la CFE.

- c) Dar seguimiento al sistema de conexión instalado en la zona del bottom panel y cerramiento de las 16 torres de las líneas de transmisión de 230 y 400 kV.

1.5. Justificación

En la actualidad, el robo de los elementos redundantes y secundarios en la zona del bottom panel de las torres de las líneas de transmisión se ha incrementado de forma notoria, generando el colapso de las torres ante la presencia de vientos moderados, como consecuencia, el corte en el suministro de energía eléctrica, involucrando costos significativos para la compañía suministradora.

Debido a lo anterior, el siguiente trabajo de tesis propone una alternativa de solución al problema del robo de elementos redundantes de acero de las torres de las líneas de transmisión de energía eléctrica del Sistema Eléctrico Nacional a través del diseño de un sistema de conexión que involucra un conector de fundición de hierro nodular adherido a un material compuesto tipo polimérico de ingeniería con un adhesivo.

1.6. Descripción del contenido de la tesis

A continuación, se describe el contenido de los capítulos de este trabajo de tesis:

El **Capítulo I**, proporciona un panorama general con introducción, objetivos del trabajo, justificación y descripción del contenido de los capítulos que se abordan en este trabajo.

El **Capítulo II** describe las partes principales de una torre perteneciente a una línea de transmisión de energía eléctrica en 230 y 400 kV, el planteamiento del robo de los elementos angulares de acero a nivel mundial, el colapso de las torres, como consecuencia de la sustracción de dichos elementos, la alternativa de solución, utilizando materiales compuestos tipo polimérico de ingeniería a nivel mundial, la problemática para conectarlos con los elementos principales y secundarios de las torres, la aplicación de la fundición de hierro nodular en la industria eléctrica y el uso de los adhesivos en las torres.

En el **Capítulo III** se describe la metodología para el diseño y fabricación del sistema de conexión para los elementos redundantes de material compuesto tipo polimérico de ingeniería.

El **Capítulo IV** muestra los resultados de la evaluación del sistema de conexión, mediante las pruebas mecánicas de aguante de tensión realizadas en el laboratorio.

El **Capítulo V** describe la aplicación del sistema de conexión en 16 torres de 400 kV de la Gerencia Regional de Transmisión Centro de la Comisión Federal de Electricidad, los

procedimientos utilizados durante el retiro de los elementos redundantes de acero y la instalación del sistema de conexión con elementos de material compuesto tipo polimérico de ingeniería. Tras once meses de su instalación, se muestra su desempeño y la implicación del impacto psicosocial del sistema de conexión instalado. Por último, se resume el estudio técnico y económico para los materiales que tuvieron mejor desempeño técnico.

El **Capítulo VI** presenta las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

Finalmente, se presenta la bibliografía utilizada en la realización de este trabajo de tesis.

CAPÍTULO II. Tópicos básicos

2.1. *Introducción*

En el siguiente capítulo se describen las partes principales de una torre de una línea de transmisión de energía eléctrica en 230 y 400 kV, el robo de los elementos angulares a nivel mundial, el colapso de las torres, la alternativa de solución utilizando materiales compuestos tipo polimérico de ingeniería, la problemática para conectarlos con los elementos principales y secundarios de las torres, la aplicación de la fundición de hierro nodular en la industria eléctrica y el adhesivo en la industria.

2.2. *Líneas de transmisión*

Las torres son las principales componentes de una línea de transmisión, las torres soportan el peso de los aisladores, amortiguadores, separadores, herrajes, accesorios, etc. Tienen la función de dar soporte mecánico a los conductores de fase para el transporte de la energía eléctrica, los hilos de guarda para la protección contra descargas atmosféricas y los cables de fibra óptica para la transmisión de voz y datos. Los conductores de fase están anclados a través de cadenas de aisladores de vidrio, porcelana o de material polimérico; desde hace dos décadas, este último material ha demostrado un excelente comportamiento ante la contaminación ambiental.

Las torres de transmisión para los tipos suspensión, deflexión y remate, están formadas por elementos principales, secundarios y un mallado de elementos redundantes que reducen la longitud no arriostrada de los elementos principales, proporcionando un soporte intermedio para la torre [1]. Los elementos anteriores están unidos mediante tornillos, arandelas y tuercas, formando extensiones, aumentos, cerramiento, cuerpo piramidal, cuerpo recto, crucetas para anclaje de hilos de guarda y conductores superiores, y crucetas para anclaje de conductores medios e inferiores, como se ilustra en la Figura 2.2–1.

El material de los elementos principales [2], secundarios y redundantes [3] es de acero estructural, galvanizado [4][5][6] y recubierto de material anticorrosivo. Los perfiles son de geometría angular, sus dimensiones están de acuerdo con el nivel de voltaje de la línea de transmisión y otras condiciones de diseño consideradas por las normas para elementos redundantes y principales [7][8]. La conexión de los perfiles que forman la torre se realiza con tornillos de acero, tipo 0 [8] de alta resistencia y cabeza hexagonal [9], galvanizados por inmersión en caliente [4][5][6] y recubiertos de material anticorrosivo; los

tornillos son del tipo conexión por aplastamiento, en la cual, la rosca puede quedar en el plano cortante y apretados con el método de tensión controlada por torque [8]. La dimensión de los tornillos se diseña de acuerdo con lo indicado en las normas [10][11]. El roscado de los tornillos debe cumplir con los requerimientos de las normas [12][13]. Se utilizan tuercas de forma hexagonal [14], arandelas de presión [15] y arandelas planas [16]. La longitud de los tornillos debe ser tal que después de apretada la tuerca, quede una longitud libre de 5 mm aproximadamente [8]. Se debe considerar la distancia a los bordes y los espaciamientos mínimos entre centros de orificios [17].

En la Figura 2.3–1 se ilustran los elementos principales, secundarios y redundantes de la zona del bottom panel.

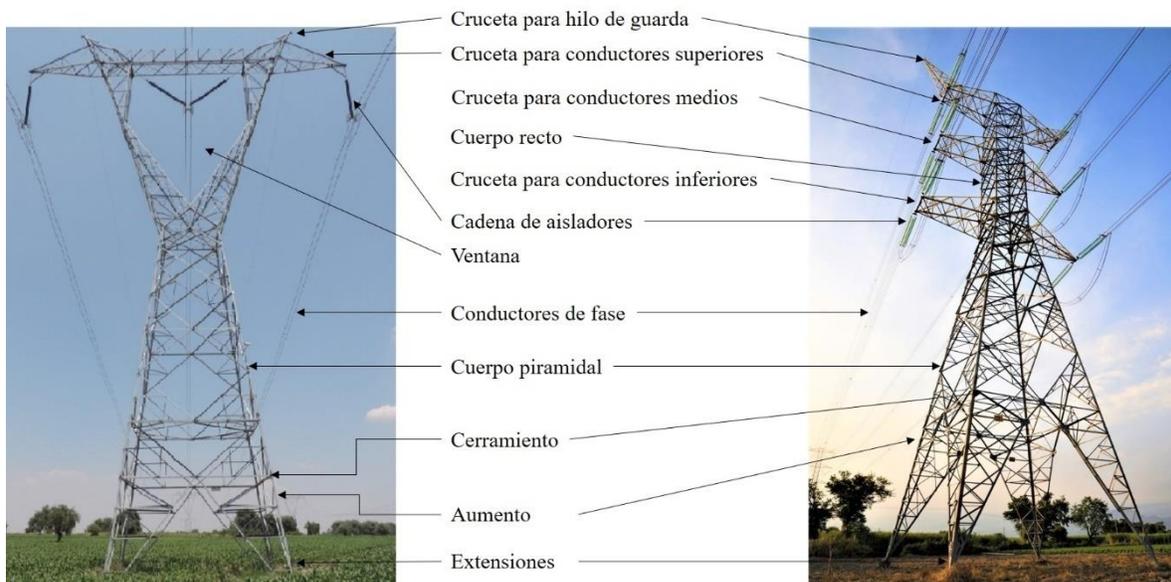


Figura 2.2–1. Partes de una torre de transmisión.

2.3. Robo de elementos angulares a nivel mundial

En la actualidad y a nivel mundial las pérdidas no técnicas son un problema evolutivo que involucra desde el robo de cable hasta elementos secundarios y redundantes de las torres de las líneas de transmisión. Los elementos angulares de acero robados o sustraídos de las torres de transmisión son adquiridos de forma ilícita por el mercado de desechos industriales, chatarrerías o algunos talleres metalúrgicos, los cuales procesan y transforman los elementos angulares de acero en otras piezas. La Empresa de Transmisión Eléctrica Dominicana (ETED) informó que del 2004 al 2012 fueron robadas alrededor de 200 toneladas de acero de las torres eléctricas de 138 y 169 kV, con un

costo aproximado de RD\$ 28 millones [18]. La Empresa Nacional de Transmisión Eléctrica (ENATREL) en Nicaragua, registró pérdidas superiores a los US\$2 millones de dólares del 2007 al 2012, debido al robo de angulares de las torres de las líneas de transmisión eléctrica [19][20][21].

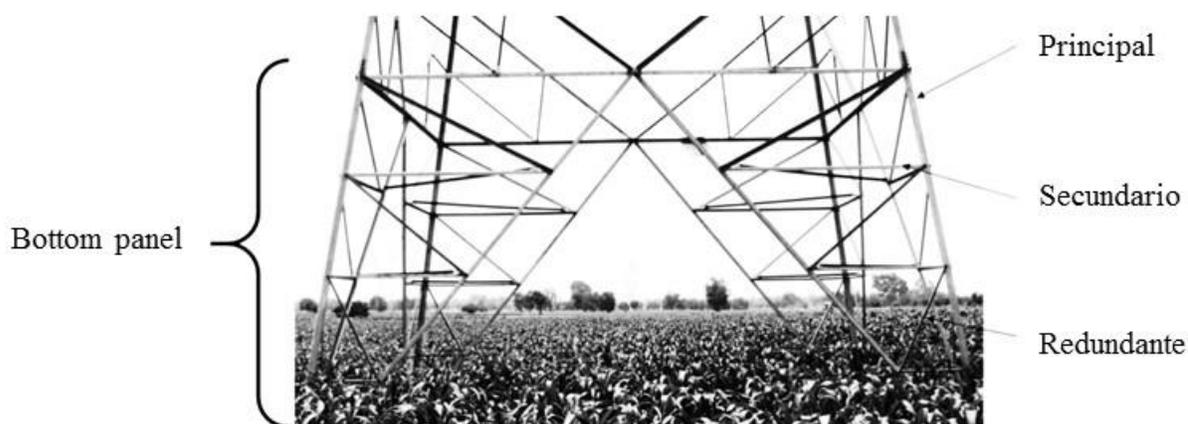


Figura 2.3–1. Elementos que integran el bottom panel.

La Empresa Provincial de la Energía (EPE) en Argentina, en el 2009 reportó el colapso de una torre de energía eléctrica de 132 kV, a la cual le fueron sustraídos componentes metálicos por actos de vandalismo; quedando sin servicio eléctrico, además del suroeste de la ciudad y Santo Tomé, el pueblo de San José del Rincón [22]. En la presentación del desarrollo del proyecto “Sistema de Interconexión Eléctrico para los Países de América Central (SIEPAC)” se mencionó que la Empresa Propietaria de la Red (EPR) deberá enfrentar diversos actos de vandalismo y sabotaje, entre otros el robo de piezas o elementos estructurales de las torres en Honduras y El Salvador [23]. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) en México, reportó que en la zona noroeste del país en el periodo comprendido entre el 2010 y 2014 fueron sustraídas 90.08 toneladas de piezas angulares de acero de las torres de transmisión, con un costo de \$ 13.192 millones [24]. A nivel nacional de enero de 2010 a septiembre de 2013 fueron robadas de las torres de las líneas de transmisión de 230 y 400 kV; 1,480 toneladas de acero [25]. En la Figura 2.3–2 se aprecia el faltante de los elementos principales, secundarios y redundantes de la zona del bottom panel de una torre de transmisión.

Cuando se sustraen los elementos angulares de las torres de las líneas que transportan la energía eléctrica desde las plantas generadoras, o directamente en las líneas del sistema interconectado, se puede provocar una interrupción del suministro eléctrico a nivel nacional o regional afectando la confiabilidad operativa de la línea. Por ejemplo, en el año

2014 el colapso de las torres por retiro de elementos angulares de acero de la Línea Victoria–Huehuetoca ocasionó la salida de operación de la S.E. Victoria, lo que afectó el suministro eléctrico de 122 mil 930 usuarios y varias empresas de la zona [26].



Figura 2.3–2. Elementos sustraídos del bottom panel.

En la Figura 2.3–3 se ilustran las torres de las líneas de transmisión con faltantes de elementos angulares.



Figura 2.3–3. Torres con elementos sustraídos (de izquierda a derecha [23][19][18][26]).

2.4. Colapso de torres de las líneas de transmisión

Cuando las fuerzas de viento impactan la torre en cualquier dirección, éstas provocan sobre las piernas de la torre una fuerza de tensión en dirección del viento. Sin embargo; en los elementos de las piernas que no son golpeadas directamente por las fuerzas de viento, se genera una fuerza de compresión que se transmite hacia los soportes de las piernas, presentándose el fenómeno de aplastamiento de los elementos angulares de las piernas sobre los soportes. Adicionalmente, es importante considerar, las fuerzas ejercidas por los componentes mismos de la torre, así como las que ejercen los elementos tales como cadenas de aisladores, conductores e hilos de guarda. Las fuerzas generadas por estos elementos, se proyectan hacia el centro de la tierra y tienen el efecto de la fuerza de compresión sobre la torre. Es por esto, que el fenómeno de la fuerza de tensión ocasionado por las cargas de viento se reduce de manera considerable por el fenómeno de compresión que ocurre en la torre [1].

Si uno de los elementos angulares es sustraído, la torre se vuelve inestable debido a la concentración de cargas en los elementos principales existentes, provocando el pandeo de éstos y por consiguiente el colapso de la torre. En la Figura 2.4–1, se ilustra una torre de transmisión colapsada.



Figura 2.4–1. Torre típica colapsada en México [27].

Para evitar la sustracción de elementos angulares de acero se implementaron algunos métodos como el patrullaje de las líneas con alto índice delictivo, el monitoreo de las torres con videocámaras, la aplicación de recubrimiento con poliméricos sobre los elementos metálicos y recientemente el probable monitoreo aplicando sensores en las torres de las líneas de transmisión. En el siguiente trabajo se propone una alternativa de solución implementada con el diseño de conectores de hierro nodular y adhesivo en materiales compuestos tipo polimérico de ingeniería.

2.5. Alternativa de solución mediante el uso de materiales compuestos

Algunos países como Estados Unidos [28][29], India [30][31] y China [32], han realizado investigaciones y construido torres de transmisión completas de material compuesto tipo polimérico de ingeniería. Sin embargo; a nivel mundial no se tiene experiencia en torres híbridas que contemplen la sustitución de perfiles metálicos por materiales compuestos tipo polimérico de ingeniería en la zona del bottom panel y cerramiento. De los 35 materiales compuestos tipo termoplásticos y termoestables estudiados [1], se seleccionaron 17 alternativas viables para sustituir los elementos redundantes de acero en las torres de transmisión, considerando como referencia las propiedades mecánicas de los elementos redundantes de acero estructural, resistencia a la tensión de 248 MPa, resistencia a la compresión de 248 MPa [3] y Resistencia a la flexión de 1,225 N [7]. Las 17 alternativas fueron evaluadas mediante un análisis estructural basado en los elementos redundantes y principales de acuerdo con las recomendaciones de la norma [7], la cual permite conocer las cargas actuantes de los elementos en una torre de transmisión. La metodología verifica que los elementos evaluados cumplan con la relación de esbeltez, la resistencia a la compresión y la resistencia a una carga de 1,225 N en los elementos horizontales. Encontrando que la longitud viable se incrementa a medida que aumenta el calibre del ángulo. Las longitudes viables que cubren las 17 alternativas van de 0.5 a 3 m, aunque para longitudes mayores se requiere utilizar elementos angulares muy robustos, por lo que se recomienda diseñar nuevas geometrías de perfil que permitan una mejor resistencia a la compresión [33]. De los 17 materiales compuestos viables para sustituir los elementos redundantes de acero, se seleccionaron las siguientes cuatro: (a) Resina Epoxi con Fibra de Vidrio (REFV), (b) Poliamida Reforzada con Fibra de Vidrio (PRFV), (c) Resina Vinil Éster con Fibra de Vidrio (RVEFV), (d) Resina Epoxi con Fibra de Carbono (REFC), como se ilustra en la Figura 2.5–1.

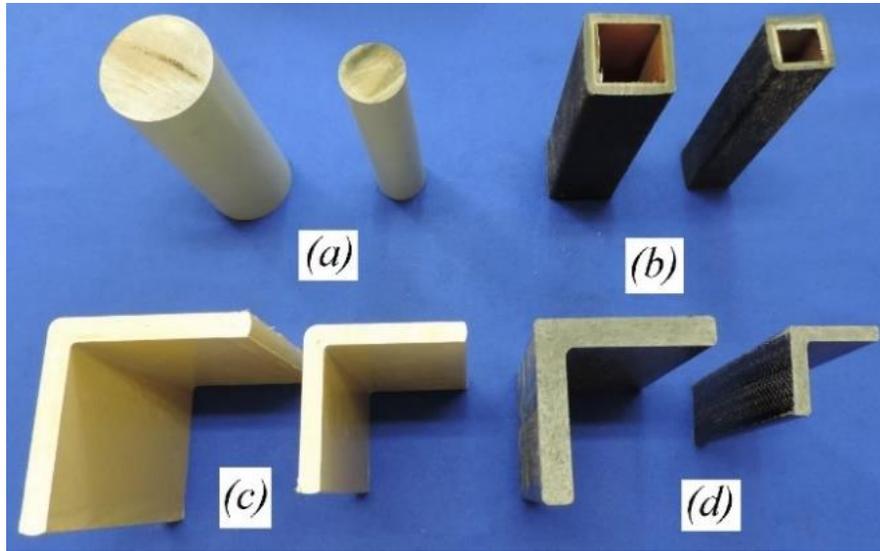


Figura 2.5-1. Materiales compuestos seleccionados

2.6. Problema de conexión con materiales compuestos

Pruebas experimentales demostraron que la unión convencional mediante tornillo reduce las propiedades mecánicas del material compuesto, provocando un modo de falla del material en el punto de unión. En consecuencia, se requiere diseñar, validar, fabricar y probar otra forma de conectar los perfiles de material compuesto con los angulares de acero de las torres existentes [35]. Los modos de falla más comunes en los materiales compuestos presentados por la conexión mecánica mediante tornillo se ilustra en la Figura 2.6-1 [34].

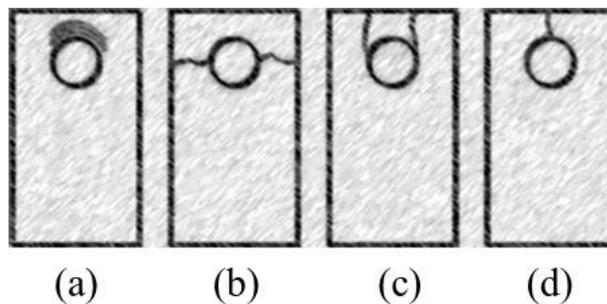


Figura 2.6-1. Modos de falla: (a) Aplastamiento, (b) Sección neta, (c) Desgarre y (d) Grieta.

2.7. Aplicación de la fundición de hierro nodular en la industria eléctrica

El ensamble entre los elementos principales, secundarios y redundantes en las torres de transmisión existentes, se realiza a través de perforación directa sobre los perfiles de

acero, los cuales son fijados con tornillo, tuerca y rondana, por esta razón, no se tiene un conector como tal para su interconexión.

De los más de 104 artículos consultados donde se emplean materiales compuestos, no se encontró el uso de herrajes y conectores para nuestra aplicación.

De los fabricantes de herrajes y conectores como: ANKER ELECTRIC, CONHESA, CECOHESA, HUMBRALL S.A. de C. V., PLP MÉXICO, DELTA CONECTORES S. A. de C. V. y PARTALUM S. A. de C. V., se encontraron los conectores que se muestran en la Figura 2.8–1. Sin embargo, la geometría de los perfiles de material compuesto requiere de otro tipo de conector.

Por otro lado, en el acervo bibliográfico consultado los herrajes y conectores utilizados en subestaciones y líneas son de material de acero, aluminio y fundición de hierro nodular de geometría diferente a la requerida.

En la práctica, la fundición de hierro nodular se utiliza en herrajes y conectores para subestaciones eléctricas, líneas de transmisión y distribución [36], piezas mecánicas, herramientas y otras, que dependiendo de sus propiedades mecánicas son fabricadas con diferentes grados [37]. De la misma manera algunos conectores y herrajes son fabricados de aluminio y son utilizados en subestaciones y líneas. Los conectores de acero requieren un costo de producción mayor, debido a que las condiciones de fundición son más exigentes. Los conectores de aluminio aun siendo más económicos en su producción, son más atractivos al robo y es precisamente lo que se quiere evitar.

2.8. Adhesivo en la industria

Para reemplazar los elementos redundantes de acero por material tipo polimérico de ingeniería, se requiere utilizar un conector que no involucre de forma directa el uso de tornillo sobre el material compuesto, una alternativa de solución podría ser el uso de adhesivos.

En la práctica, el adhesivo se utiliza principalmente en aplicaciones como la construcción, electrónica, ingeniería civil, naval, aeronáutica, aeroespacial, embalajes, automovilística, eólica y decoración, entre otras.

El término adhesivo describe a los adhesivos termoestables con módulo de elasticidad alto que se emplean en torres metálicas bajo carga. La norma define un adhesivo como

un "agente de unión empleado para transferir las cargas requeridas entre adherentes expuestos a las condiciones de servicio típicas de la torre implicada" [38].



Figura 2.8–1. Herrajes convencionales.

Los adhesivos más comúnmente utilizados son: poliuretano, acrílico y epoxi. En el caso específico de materiales poliméricos, cuando se escoge un adhesivo, el objetivo principal es seleccionar un adhesivo del mismo tipo químico que el material empleado como matriz. Las principales ventajas y desventajas en la aplicación de los diferentes adhesivos se muestran en la Tabla 2.8–1 [39].

Tabla 2.8-1. Ventajas y desventajas de los adhesivos.

Adhesivo	Ventajas	Desventajas
Uretano	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Buena flexibilidad ➤ Resistencia al impacto ➤ Adecuado para unir goma, plástico y madera 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ No se recomienda su uso en metales desnudos, ni cristales ➤ Tienen menor adhesión final que el adhesivo epóxico
Acrílico	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alta resistencia a la temperatura, al esfuerzo de corte y pelado en metales y plásticos ➤ Une rápidamente la mayoría de los metales ➤ Resistencia al impacto y durabilidad ➤ Fácil aplicación ➤ Excelente adhesión final ➤ Curado rápido ➤ Une un amplio rango de sustratos, desde acero inoxidable, gomas, plástico, hasta madera y cerámicas 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Preparación de la superficie de los sustratos ➤ Contracción del 7%
Epoxi	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mayor resistencia y fuerza a temperaturas elevadas ➤ La mejor combinación para unir metal, plástico y goma ➤ Para productos rígidos, flexibles o reforzados ➤ Alta adhesión final ➤ Durabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Exige la preparación de la superficie de los sustratos ➤ Los ciclos de curado dependen de los componentes del adhesivo ➤ Contracción del 2%

2.9. Conclusión del capítulo

Se proporciona un panorama general de los elementos principales que forman la línea de transmisión para el transporte de energía eléctrica en c.a. y la importancia de los elementos principales, secundarios y redundantes de las torres de transmisión. Se recopiló y analizó la información sobre el robo de elementos angulares secundarios y redundantes a nivel mundial y las consecuencias de la sustracción de dichos elementos, que pueden llegar hasta el colapso de la torre. Se propone una alternativa de solución mediante el uso de un conector y adhesivo estructural para unir los materiales tipo polimérico de ingeniería y fundición de hierro nodular; con la finalidad de formar elementos redundantes de material compuesto que sustituyan a los elementos redundantes de acero en las torres de transmisión existentes; para solucionar el fenómeno del robo de elementos de acero, haciéndolos no atractivos para la delincuencia y de esta forma evitar las salidas de las líneas de transmisión eléctrica por el colapso de las torres de transmisión, afectando el suministro de energía eléctrica a los usuarios.

CAPÍTULO III. Metodología

3.1. *Introducción*

En el siguiente capítulo se describe la metodología empleada para el diseño, validación, fabricación y pruebas de laboratorio de los conectores utilizados en los elementos redundantes de material compuesto (REFV, PRFV, RVEFV y REFC), unidos con un adhesivo estructural para la sustitución de los elementos redundantes de acero en la zona del bottom panel de la torre.

3.2. *Análisis de la importancia de los elementos redundantes en las torres de transmisión*

Se realizó el censo de los elementos redundantes que integran el bottom panel de 11 torres de transmisión de 115, 230 y 400 kV, obteniéndose los resultados mostrados en la gráfica de la Figura 3.2–1 [35]. Por sus dimensiones, los elementos con alta probabilidad de ser sustraídos de la sección del bottom panel son aquellos con longitud menor o igual que 4.6 m, que corresponden con el 95%. Con base en la estadística anterior, se establecieron como referencia longitudes de hasta 2 y 4 m para el diseño de los elementos redundantes de material compuesto tipo polimérico de ingeniería.

Debido al alto índice de robo de los elementos angulares y su consecuencia en el colapso de las torres de las líneas de transmisión; se realizó el análisis estructural asistido por computadora, mediante el Software Tower® [40]. Para el análisis, se utilizó la torre de transmisión tipo EA4G23C de 400kV, la cual se ilustra en la

Figura 3.2–2.

Para el análisis se tomó en cuenta el árbol de cargas con el que se diseñó la torre; en éste, se representan las fuerzas verticales, transversales y longitudinales de los hilos de guarda, los conductores de fase y la presión del viento sobre la torre.

La Tabla 3.2–1 y Tabla 3.2–2 [41] muestran la caracterización de la torre de transmisión. El análisis se realizó en modo de verificación de diseño del software; el cuál, determina si la torre presenta deformaciones debidas al porcentaje de utilización de carga para cada uno de los elementos que la componen. Así mismo, se establece la falla estructural si la deformación de la torre no alcanza el punto de equilibrio.

Estadística de elementos angulares

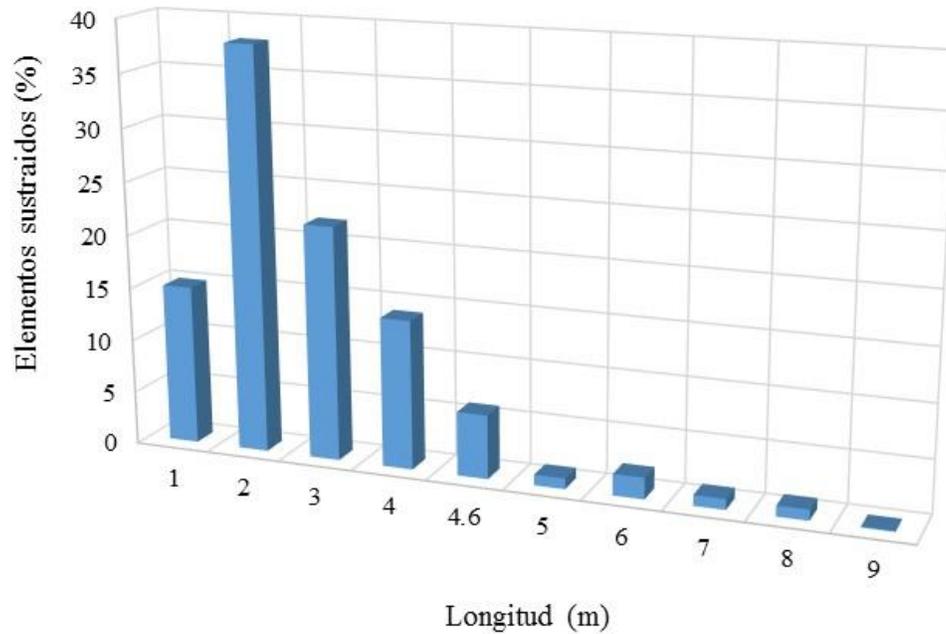


Figura 3.2–1. Estadística de elementos angulares de las torres de 115, 230 y 400 kV.

Tabla 3.2–1. Caracterización de la estructura.

Tipo de torre	EA4G23C
Código	(JO)
Uso	Suspensión 3°/550/750 m
Tensión eléctrica	400 kV-2 circuitos, 3 conductores por fase
Conductor	1113 ACSR/AW
Velocidad de viento	150 km/h
Altura de operación	1500 msnm (metros sobre el nivel del mar)

Tabla 3.2–2. Propiedades mecánicas del acero estructural de los elementos angulares.

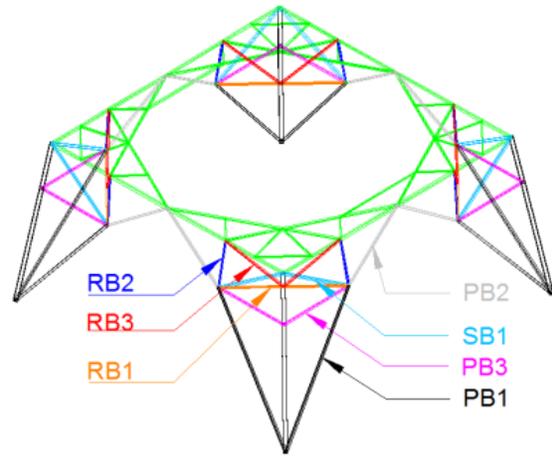
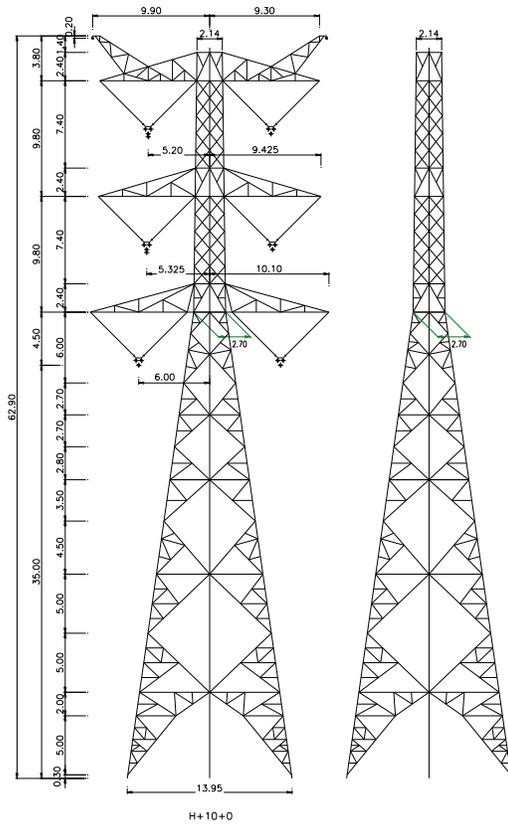
Propiedades	Acero A36	Acero A572-50
Módulo de Young [MPa]	200,000	200,000
Resistencia a la tensión [MPa]	400	450
Esfuerzo de cedencia [MPa]	250	345
Relación de Poisson	0.26	0.26

Los escenarios utilizados para el análisis estructural se enfocaron principalmente en la zona del bottom panel y son:

- I. Torre de transmisión completa (con todos los elementos principales, secundarios y redundantes de acero)
- II. Torre sin elementos principales, secundarios y redundantes, de acuerdo con los casos siguientes:
 - a. Torre sin elementos redundantes en la zona del bottom panel
 - b. Torre sin elementos en el cerramiento del bottom panel
 - c. Torre solo con angulares principales en las cuatro patas

En la Tabla 3.2–3 y Tabla 3.2–4 se muestran los esfuerzos y la utilización máxima de compresión respectivamente para los elementos principales, secundarios y redundantes en la zona del bottom panel. En la Tabla 3.2–5 y Tabla 3.2–6 se muestran los esfuerzos y la utilización máxima de compresión respectivamente para el elemento principal del bottom panel y cuerpo piramidal de la torre.

La gráfica de la Figura 3.3–1(a) muestra el porcentaje de utilización de los elementos de la torre, con todos los elementos de acero ante una presión de viento de 150 km/h. En este escenario, no se presenta deformación en el cuerpo de la torre, debido a que los esfuerzos se encuentran dentro de los límites de diseño inicial. La gráfica de la Figura 3.3–1(b) muestra la deformación y porcentaje de utilización de los elementos de la torre sin considerar los elementos redundantes de apoyo. La gráfica de la Figura 3.3–1(c) muestra la deformación y porcentaje de utilización de los elementos de la torre sin considerar los elementos internos de la parte superior del bottom panel. La Figura 3.3–2 muestra la secuencia del colapso de la torre sostenida únicamente con el elemento angular principal de la pata en el bottom panel.



PPi = Elemento principal de la pierna del elemento i

PBi = Elemento principal en el bottom panel del elemento i

SBi = Elemento secundario en el bottom panel del elemento i

RBi = Elemento redundante en el bottom panel del elemento i

(a) Elemento principal del bottom panel y cuerpo piramidal de la torre

(b) Elemento principal, secundario y redundante de la zona del bottom panel

Figura 3.2–2. Cuerpo básico de la torre EA4G23C+10+0, considerado en el análisis estructural.

Tabla 3.2–3. Esfuerzos de compresión para los escenarios I y II.

Elemento	Esfuerzo de compresión [kN]			
	Escenario I	Escenario II		
	Torre completa	Torre sin elementos redundantes	Torre sin elementos internos de la parte superior del bottom panel	Torre solo con los angulares principales para las cuatro patas
PB1	70.9	70.9	26	Figura 3.3–1
PB2	74.5	74.5	24	
PB3	8	8	0	
SB1	18.6	18.6	0	
RB1	16.7	16.7	0	
RB2	7	7	0	
RB3	9	9	0	

Redundantes de las patas: 23.09 kN (2.5% del valor que arriostran) [7]

Tabla 3.2–4. Utilización máxima de compresión para los escenarios I y II.

Elemento	Utilización máxima de compresión (%)			
	Escenario I	Escenario II		
	Torre completa	Torre sin elementos redundantes	Torre sin elementos internos de la parte superior del bottom panel	Torre solo con los angulares principales para las cuatro patas
PB1	46	605	-	Figura 3.3–1
PB2	48	660	245	
PB3	19	70	0	
SB1	18	185	0	
RB1	100	170	0	
RB2	34	85	49.5	
RB3	48	90	0	

Tabla 3.2–5. Esfuerzo de compresión de los elementos principales de las piernas para los escenarios I y II.

Elemento	Esfuerzo de compresión (kN)			
	Escenario I	Escenario II		
	Torre completa	Torre sin elementos redundantes	Torre sin elementos internos de la parte superior del bottom panel	Torre solo con los angulares principales para las cuatro patas
PP1	925	925	1000	Figura 3.3–1
PP2	925	925	1000	
PP3	925	925	1000	
PP4	870	870	820	
PP5	870	870	820	
PP6	830	830	860	
PP7	830	830	860	
PP8	808	808	800	
PP9	808	808	800	
PP10	775	775	790	
PP11	780	780	790	

Tabla 3.2–6. Utilización máxima de compresión de los elementos principales de las piernas para los escenarios I y II.

Elemento	Utilización máxima de compresión (%)			
	Escenario I	Escenario II		
	Torre completa	Torre sin elementos redundantes	Torre sin elementos internos de la parte superior del bottom panel	Torre solo con los angulares principales para las cuatro patas
PP1	97	410	420	Figura 3.3–2
PP2	97	100	100	
PP3	97	90	100	
PP4	88	85	80	
PP5	88	85	80	
PP6	84	80	83	
PP7	78	75	80	
PP8	80	79	80	
PP9	90	85	85	
PP10	99	100	90	
PP11	99	100	90	

3.3. Selección y caracterización de los materiales compuestos

Para utilizar los materiales compuestos del tipo polimérico de ingeniería como elementos redundantes, la norma [7] establece los siguientes criterios a cumplir:

- a) Una relación de esbeltez nominal mínima
- b) Soportar transversalmente la carga de una persona
- c) Tener la capacidad de resistir una fracción de las cargas de compresión (1-3%) de la pierna o los elementos principales de la torre

Los criterios anteriores fueron considerados en la metodología de análisis estructural de los elementos redundantes preliminares [33].

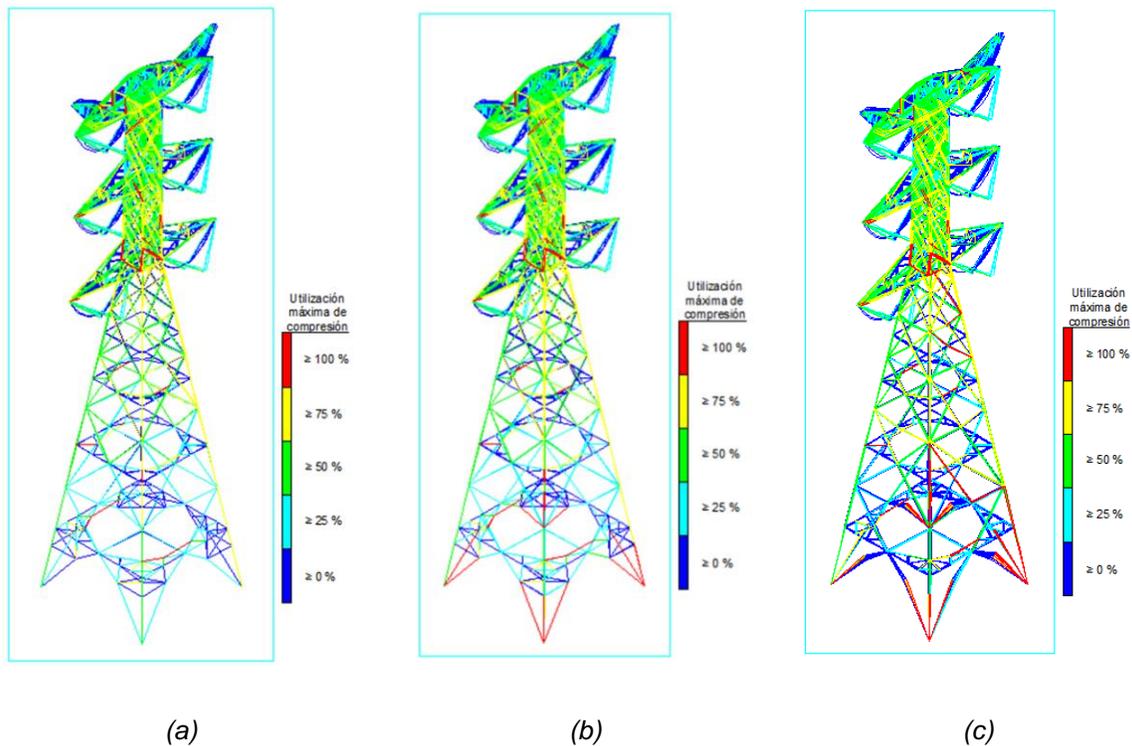


Figura 3.3-1. Deformación y porcentaje de utilización para los escenarios I y II para los casos a y b.

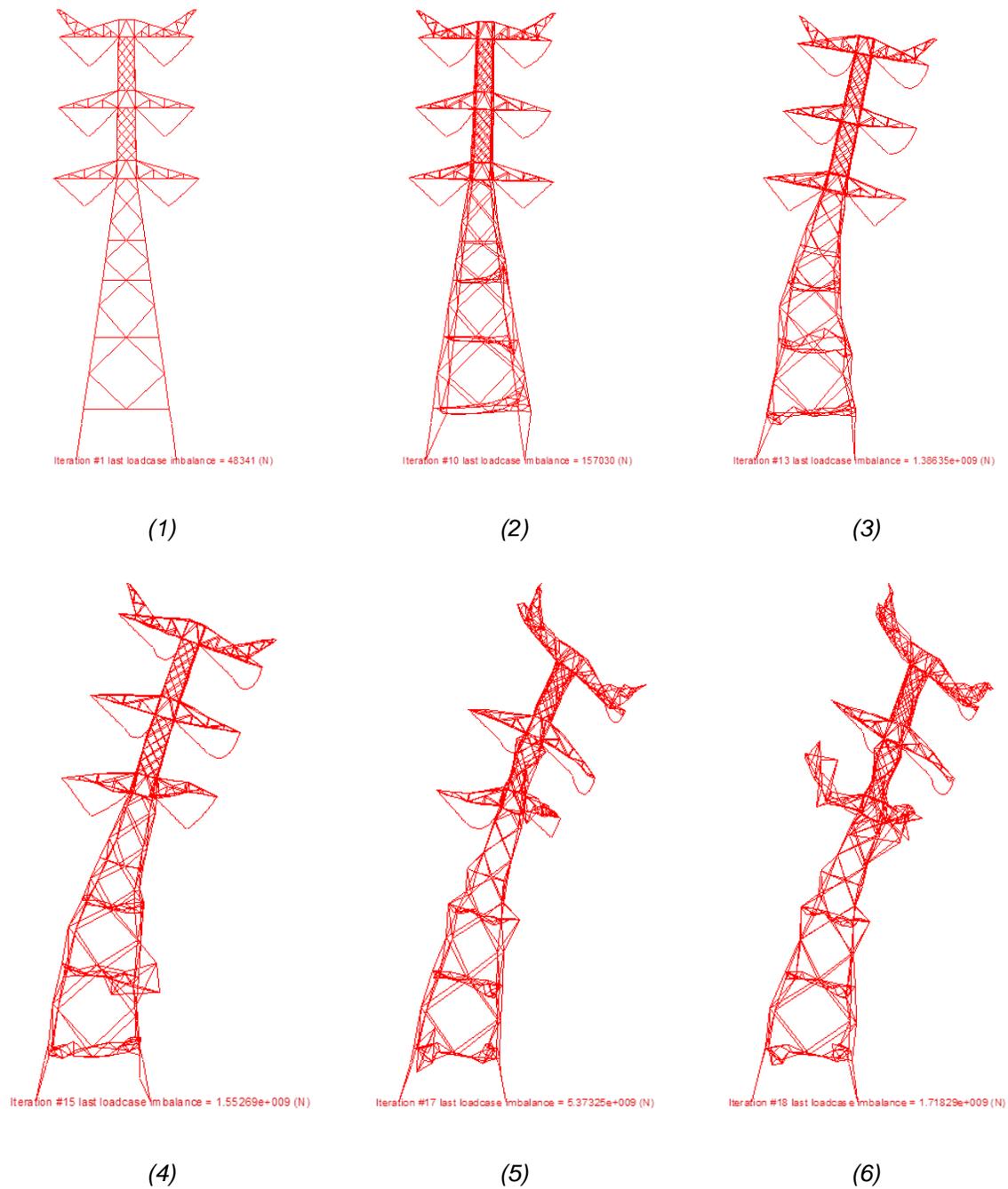


Figura 3.3–2. Deformación de la torre para el escenario II, caso c.

Las 17 alternativas de material compuesto fueron evaluadas por las normas [52][53] para determinar las propiedades mecánicas a la tensión y flexión respectivamente. De las 17 alternativas se seleccionaron las siguientes cuatro: (a) Resina Epoxi con Fibra de Vidrio (REFV), (b) Poliamida Reforzada con Fibra de Vidrio (PRFV), (c) Resina Vinil Éster con Fibra de Vidrio (RVEFV) y (d) Resina Epoxi con Fibra de Carbono (REFC).

Los materiales compuestos seleccionados fueron analizados para diferentes geometrías y dimensiones [35]. Las geometrías fueron evaluadas con base en los criterios de análisis estructurales y comparados contra las características mecánicas requeridas [33]. La evaluación consiste en determinar las dimensiones de cada geometría para cumplir con los requerimientos de carga mecánica y de esbeltez.

Los elementos fueron dimensionados para cada una de las 4 alternativas de material compuesto tipo polimérico de ingeniería. La Tabla 3.3–1 muestra los valores más altos en los elementos principales, secundarios y redundantes, así como, el valor más alto de resistencia en compresión en los elementos mencionados. Para efectos comparativos, la tabla también muestra los valores obtenidos para el caso de la torre con todos los elementos de acero en el bottom panel.

El análisis de esfuerzos mecánicos se llevó a cabo mediante simulaciones realizadas en Tower® con el modelo de la torre de transmisión típica de 400 kV utilizado para el análisis estructural. En las simulaciones, se determinaron los esfuerzos cortantes y de aplastamiento en las conexiones de los elementos que constituyen la zona del bottom panel de la torre. Lo anterior se realizó considerando la sustitución de los elementos de acero por elementos de cada una de las 4 alternativas de material compuesto tipo polimérico de ingeniería. Los resultados obtenidos muestran que los esfuerzos cortantes en la conexión son prácticamente los mismos entre los elementos de acero y los elementos de materiales compuestos, en la zona del bottom panel. Mientras que, la resistencia de aplastamiento depende del límite elástico (F_y) del material de los elementos: a mayor límite elástico mayor es la capacidad de aplastamiento. Estos resultados permitieron establecer los esfuerzos cortantes y de aplastamiento requeridos para el diseño del conector.

Tabla 3.3–1. Capacidad máxima de esfuerzo cortante y de aplastamiento de la conexión y esfuerzo máximo de compresión en los elementos redundantes y secundarios.

Zona del bottom panel		Capacidad máxima de esfuerzo cortante de la conexión (kN)	Capacidad máxima de aplastamiento de la conexión (kN)	Esfuerzo máximo de compresión en los elementos redundantes o secundarios (kN)
Acero A36 y A572-50	principales	198.39	213.44	74.45
	secundarios	148.79	342.81	18,61
	redundantes	49.60	38.09	23.09
REFC	principales	198.39	1,496.76	76.61
	secundarios	148.79	1,330.45	19.44

Zona del bottom panel		Capacidad máxima de esfuerzo cortante de la conexión (kN)	Capacidad máxima de aplastamiento de la conexión (kN)	Esfuerzo máximo de compresión en los elementos redundantes o secundarios (kN)
	redundantes	49.60	443.45	23.06
REFV	principales	198.39	702.37	75.85
	secundarios	148.79	597.02	19.06
	redundantes	49.60	199.05	23.07
PRFV	principales	198.39	654.83	76.35
	secundarios	148.79	561.28	18.85
	redundantes	49.60	187.10	23.08
RVEFV	principales	198.39	590.07	75.27
	secundarios	148.79	519.27	17.76
	redundantes	49.60	173.09	23.12

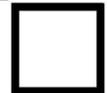
3.4. **Requerimientos mínimos del perfil de material compuesto**

Con base en el análisis lineal asistido por computadora, programado en una hoja de Excel, la cual incluye, la carga mínima de resistencia a la compresión del perfil igual que 509.335 kgf, los requerimientos mínimos de la norma [7] y la especificación [8] citados a continuación, se calcularon las dimensiones y geometrías de los diferentes materiales poliméricos de ingeniería mostradas en la Tabla 3.4–1 [41]:

- a) Relación de esbeltez no mayor que 250.
- b) Los elementos de la torre cuyo eje longitudinal forme con la horizontal un ángulo menor que 30° deben resistir una carga concentrada de 1,225 N (125 kgf) perpendicular al eje longitudinal y aplicada en cualquier punto de su longitud.
- c) Los elementos redundantes con esfuerzos no calculados deben ser capaces de soportar el 2.5% de la fuerza actuante en el elemento principal que arriostran.

Tabla 3.4–1. Evaluación de la relación de esbeltez para determinar la geometría y volumetría del perfil.

Propiedad mecánica	Material			
	RVEFV	PRFV	REFC	REFV
Resistencia mínima a la compresión del material (módulo de cedencia) (MPa)	340.57	450	1,200	506.8
Módulo mínimo de compresión del material (módulo de elasticidad) (MPa)	13,100	28,572	109,000	35862.8

Propiedad mecánica	Material			
	RVEFV	PRFV	REFC	REFV
Resistencia mínima a la compresión del perfil (kgf)	509.335	509.335	509.335	509.335
Relación de Poisson	0.35	0.3	0.31	0.3
Resistencia mínima a la flexión del perfil (kgf)	125	125	125	125
Longitud	Geometría			
2 m				
4 m				

3.5. *Evaluación mecánica de los materiales compuestos –Prueba de flexión–*

Cada uno de los perfiles de material polimérico de la Tabla 3.4–1, fue evaluado con la prueba de flexión por medio del Equipo Universal de Pruebas Mecánicas INSTRON de capacidad máxima de 10,000 kgf, para cumplir con los requerimientos de la norma [7], la cual, establece la restricción por carga del liniero, donde los elementos de la torre cuyo eje longitudinal forma un ángulo menor que 30° con respecto a la horizontal, deben resistir una carga concentrada de 1,225 N o 125 kgf perpendicular al eje longitudinal y aplicada en cualquier punto de su longitud.

El procedimiento para realizar las pruebas se describe a continuación [49]:

- ✓ Colocar el perfil en posición horizontal dentro de la prensa universal sobre los soportes.
- ✓ Ajustar la prensa universal a carga de 0 kg y programar la velocidad de compresión a 5 mm/minuto.
- ✓ Aplicar la carga a compresión gradualmente a la velocidad programada de compresión.
- ✓ La prueba se detiene de modo manual, si la carga supera los 125 kgf requeridos o automáticamente, si el perfil de prueba falla súbitamente o se alcanza la capacidad máxima de la prensa.
- ✓ Se registran en bitácora los valores de carga de resistencia, falla y la distancia de flexión, para cada perfil evaluado.

3.6. Perforación de los materiales compuestos

Los ensayos de las pruebas de tensión realizadas a las probetas de los materiales poliméricos de ingeniería demostraron, que los materiales compuestos no pueden ser perforados y conectados con tornillos a los elementos principales o secundarios de la torre; ya que, sus propiedades mecánicas son disminuidas, provocando que el material presente un modo de falla [25], como se ilustra en la Figura 3.6–1. Por lo tanto; se propuso un conector que no involucra la perforación de los materiales compuestos [42].



Figura 3.6–1. Fractura del material compuesto.

3.7. Adhesivo

3.7.1. Selección del adhesivo

Se analizaron diversos tipos de adhesivos y de acuerdo con sus características mecánicas, se seleccionó el adhesivo tipo acrílico por su excelente durabilidad, resistencia a la fatiga, agentes ambientales, propagación de la rotura, efecto de holgura de adhesión, diseño de la junta y al corto tiempo para maniobrar, comparado con otros tipos de adhesivos. En la Tabla 3.7.1–1 se muestran las propiedades mecánicas de los adhesivos tipo acrílico seleccionados.

Tabla 3.7.1–1. Propiedades mecánicas de los adhesivos seleccionados.

Características	Adhesivo			
	1	2	3	4
Módulo de Young [MPa] (psi)	750 (108,778)	750 (108,778)	896.3 (130,000)	609 (88,300)
Resistencia a la tensión [MPa] (psi)	19.3 (2,800)	19.3 (2,800)	18.6 (2,700)	23.4 (3,400)
Tiempo de gelado a 25°C [minutos]	48-72	48-72	12-17	15-18
Relación (resina: acelerador)	4:1	2:1	4:1	10:1
Tiempo de curado [H]	24	24	24	24

3.7.2. Requerimientos mínimos

El adhesivo seleccionado debe soportar la mínima fuerza de tensión de los elementos redundantes de acero que forman la malla del bottom panel de la torre analizada (29.05 kN o 2,948 kgf). De acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes de adhesivos, la junta adhesiva entre dos sustratos debe ser menor que 1 mm.

3.7.3. Junta adhesiva

El adhesivo ocupado para la unión de los sustratos fue modelado en 3D mediante el software AutoCAD® [43], con la finalidad de obtener la volumetría y la cantidad total de cartuchos de adhesivo a utilizar. La Figura 3.7.3–1 ilustra la representación gráfica de las geometrías típicas.

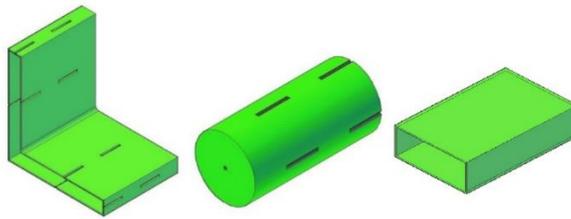
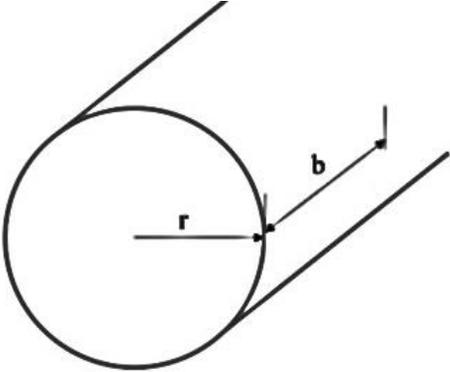
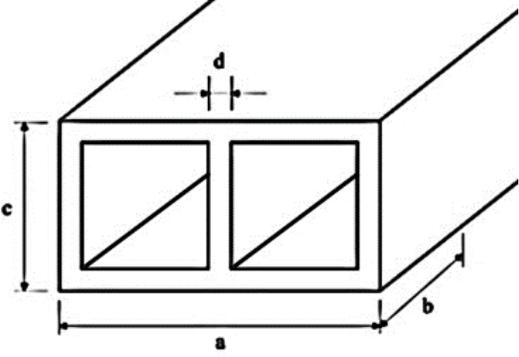
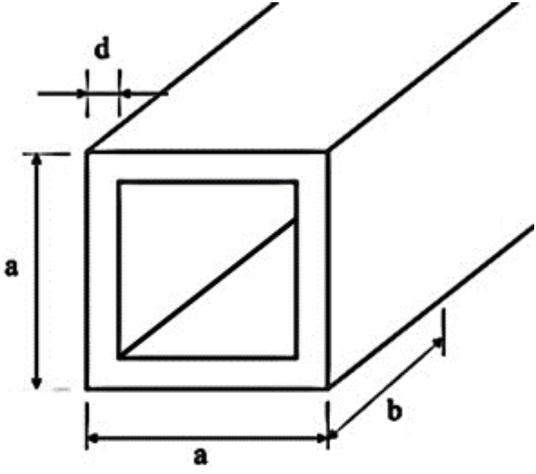
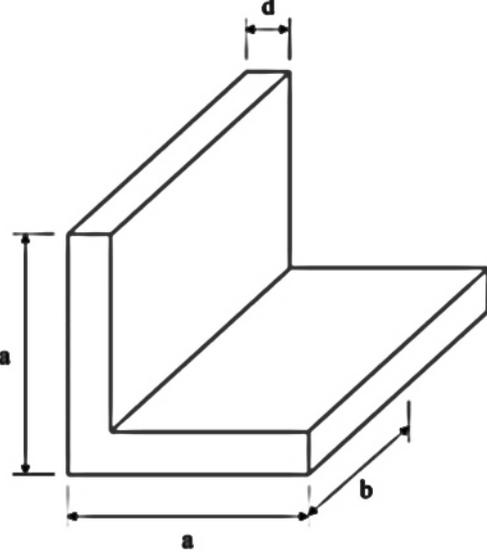


Figura 3.7.3–1. Representación gráfica de la volumetría del adhesivo.

3.7.4. Área de contacto

Se determinó para cada perfil de material compuesto la ecuación simplificada del área de contacto (A), con la finalidad de realizar ajustes posteriores en el diseño de los conectores.

<p>Área de contacto para perfil Circular</p>	<p>Área de contacto para perfil rectangular con refuerzo intermedio</p>
$A = \pi r(2b + r) \text{ [cm}^2\text{]}$	$A = 2b(a + c) + d(2a + 3c - 6d) \text{ [cm}^2\text{]}$
	
<p>Área de contacto para perfil cuadrado</p>	<p>Área de contacto para perfil angular</p>
$A = 4ab + 4d(a - d) \text{ [cm}^2\text{]}$	$A = 4ab + 2ad - d^2 \text{ [cm}^2\text{]}$
	

3.7.5. Tipo de sustrato

Los sustratos utilizados para las pruebas de adhesión fueron seleccionados de acuerdo con los resultados de las pruebas mecánicas de laboratorio previas [25], cumpliendo con los requerimientos técnicos especificados por la CFE [8] y las simulaciones por computadora [44]. Dichos sustratos se describen a continuación:

- Sustratos de material compuesto tipo polimérico de ingeniería: REFC, RVEFV, PRFV y REFV.
- Sustratos de material metálico: Acero AISI 1020 [45] y fundición de hierro nodular ASTM A536 [37].

3.7.6. Preparación de las superficies

La superficie de los sustratos a adherir se preparó bajo criterios de limpieza física o química; los grados de limpieza se definen a continuación [46]:

- Grado de limpieza bajo: consiste en limpiar el área de contacto de los sustratos con un paño seco.
- Grado de limpieza medio: consiste en limpiar el área de contacto de los sustratos con un paño y acetona o alcohol isopropílico.
- Grado de limpieza alto: consiste en limpiar el área de contacto de los sustratos con lija, carda o limatón y se limpia con un paño seco, acetona o alcohol isopropílico.

3.7.7. Tipo de falla en la junta adhesiva

La norma [38] establece los tipos de fallas que se pueden presentar en la junta adhesiva involucrada en los sustratos; esto es un indicador en la calidad de la preparación de la superficie de los sustratos. A continuación, se definen los tipos de falla en la junta adhesiva involucrada [47]:

- Falla por adhesión: esta falla se presenta en la interface sustrato – adhesivo; se identifica cuando el adhesivo se adhiere solo en uno de los sustratos.
- Falla cohesiva: esta falla se presenta por la ruptura del adhesivo, se identifica cuando el adhesivo permanece adherido uniformemente en ambas superficies de los sustratos involucrados.
- Falla del sustrato: esta falla se presenta en el sustrato y puede ser por desgarre o fractura del sustrato.

3.8. **Requerimientos mínimos para el diseño de los conectores**

Los esfuerzos mecánicos a los que estará trabajando el conector son el cortante, que permite determinar el diámetro adecuado del tornillo, y la capacidad de aplastamiento, que determina la longitud mínima de contacto del tornillo con la pared de las piezas a unir, como se ilustra en la Figura 3.8–1. Con base en lo anterior se establece el diámetro del orificio y el espesor requerido en los elementos del bottom panel.

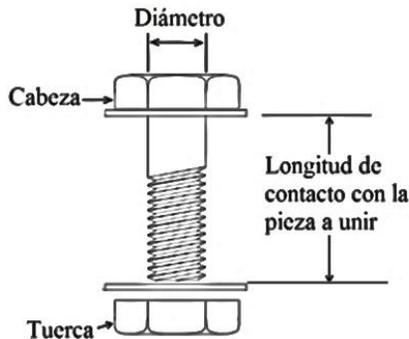


Figura 3.8–1. Diámetro y longitud de contacto de un tornillo.

Para los elementos angulares de acero en la zona del bottom panel de la torre de transmisión tipo EA4G23C+10+0 de 400 kV, se obtuvieron los valores de esfuerzo cortante y capacidad de aplastamiento mediante el análisis estructural asistido por computadora, utilizando el software Tower® [40]. De la misma manera, se obtuvieron los valores para cada uno de los materiales de REFV, PRFV, RVEFV y REFC para utilizarse en la zona del bottom panel [42].

En la Tabla 3.8–1 se muestra el resultado de la simulación, los máximos esfuerzos cortantes y la capacidad de aplastamiento en la conexión del perfil angular de acero y los perfiles de material compuesto, para elementos principales, secundarios y redundantes de la zona del bottom panel.

Los resultados obtenidos de la Tabla 3.8–1 muestran que los esfuerzos cortantes en la conexión son prácticamente los mismos entre los elementos de acero y los perfiles de material compuesto, por lo que el diámetro de los tornillos será el mismo para todos los elementos de la zona del bottom panel. Mientras que, la resistencia de aplastamiento depende del límite elástico del material de los elementos (F_y): a mayor límite elástico mayor es la capacidad de aplastamiento. Por lo tanto, la longitud mínima del tornillo para la conexión o zona de contacto con el conector será mayor para los elementos con valor más alto de límite elástico.

Tabla 3.8–1. Valores máximos de esfuerzo cortante, aplastamiento y compresión.

Material del elemento		Capacidad máxima (kN)		Esfuerzo máximo (kN)
		Esfuerzo cortante de la conexión	Aplastamiento de la conexión	Compresión en los elementos redundantes o secundario
Acero A36 y A572-50	principales	198.39	213.44	74.45
	secundarios	148.79	342.81	18,61
	redundantes	49.60	38.09	23.09
REFC	principales	198.39	1496.76	76.61
	secundarios	148.79	1330.45	19.44
	redundantes	49.60	443.45	23.06
REFV	principales	198.39	702.37	75.85
	secundarios	148.79	597.02	19.06
	redundantes	49.60	199.05	23.07
PRFV	principales	198.39	654.83	76.35
	secundarios	148.79	561.28	18.85
	redundantes	49.60	187.10	23.08
RVEFV	principales	198.39	590.07	75.27
	secundarios	148.79	519.27	17.76
	redundantes	49.60	173.09	23.12

La Tabla 3.8–2 muestra las dimensiones mínimas del tornillo de acero ordinario SAE grado 2 requeridas para la conexión de los elementos de acero y de material compuesto tipo polimérico de ingeniería en la zona del bottom panel de la torre.

Tabla 3.8–2. Diámetro y longitud de contacto del tornillo.

Material del elemento		Diámetro del tornillo (mm)	Longitud de contacto del tornillo con la conexión (mm)
Acero A36 y A572-50	principales	26.54	22.43
	secundarios	22.99	41.60
	redundantes	12.90	7.78
REFC	principales	26.54	157.28
	secundarios	22.99	161.43
	redundantes	12.90	90.62
REFV	principales	26.54	73.81
	secundarios	22.99	72.44
	redundantes	12.90	40.67
PRFV	principales	26.54	68.81
	secundarios	22.99	68.10

Material del elemento		Diámetro del tornillo (mm)	Longitud de contacto del tornillo con la conexión (mm)
	redundantes	12.90	38.23
RVEFV	principales	26.54	62.00
	secundarios	22.99	63.01
	redundantes	12.90	35.37

Los requerimientos mínimos para el diseño del conector son los siguientes:

- El diámetro de la perforación del conector metálico para unirlo con los perfiles angulares de la torre en el área del bottom panel será de 13.90 mm.
- El espesor mínimo del conector será de 7.78 mm.
- La resistencia a la tensión del conector será de 23.12 kN o 2,358 kgf por un factor de seguridad de 1.25, resultando de 29.05 kN o 2,948 kgf.
- El material del tornillo es acero ordinario SAE grado 2.

3.9. Diseño preliminar del conector de acero AISI 1020

3.9.1. Requerimientos mínimos del conector de acero

Con base en la capacidad de la junta adhesiva proporcionada por los fabricantes de adhesivos y propuestos en la *Sección 3.7.1* y los requerimientos mínimos para el diseño de los conectores de la *Sección 3.8*; se realizó el diseño y la fabricación de los conectores de acero con las propiedades mecánicas, características y matriz de elementos químicos mostrados en la Tabla 3.9.1–1.

Tabla 3.9.1–1. Caracterización del conector.

Propiedades mecánicas del Acero AISI 1020	
Propiedades	Acero AISI 1020
Resistencia a la tracción [MPa]	450 - 588
Límite elástico [MPa]	343
Características del Acero SAE 1020	
Características	Acero AISI 1020
Matriz	Normalizado
Dureza Brinell	150
Alargamiento	30 %
Matriz de elementos químicos del Acero SAE 1020	
Elemento químico	Porcentaje

Propiedades mecánicas del Acero AISI 1020	
Propiedades	Acero AISI 1020
Carbono	0.18 a 0.23 %
Silicio	0.15 a 0.3 % Máx.
Manganeso	0.3 % a 0.6 Máx.
Fósforo	0.04 % Máx.
Azufre	0.05 Máx.

Los diseños preliminares de los conectores de acero fueron modelados en 3D asistidos por computadora, mediante el software AutoCAD® [43], con la finalidad de obtener volumetría y dimensiones en el cuerpo del herraje, como se ilustra en la Figura 3.9.1–1.

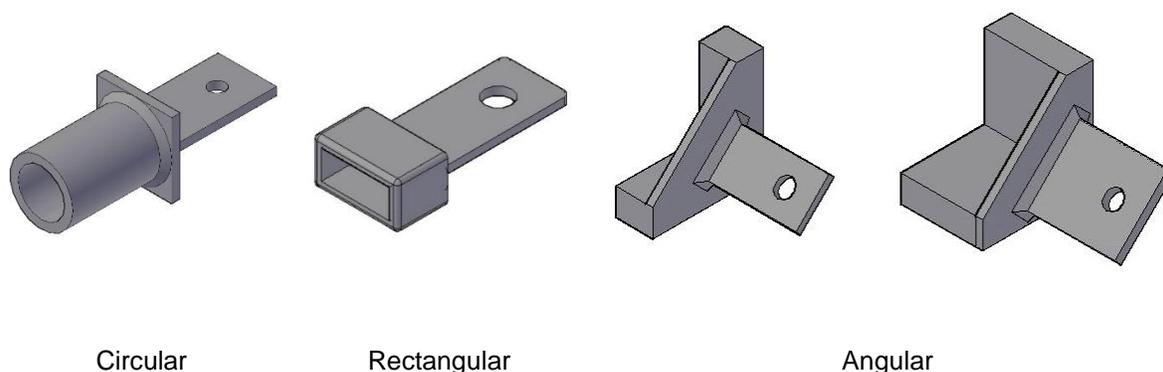


Figura 3.9.1–1. Conectores preliminares de acero AISI 1020.

3.9.2. Evaluación mecánica del conector de acero –Prueba de tensión–

El objetivo de la evaluación fue valorar si los conectores diseñados y la junta adhesiva, resisten el esfuerzo a la tensión que podría presentarse en el bottom panel de una torre de transmisión. La prueba de tensión se realizó con el Equipo Universal de Pruebas Mecánicas INSTRON de 10,000 kg.

A continuación, se describe el procedimiento para realizar las pruebas [49]:

- ✓ El ensamble conector-junta adhesiva-elemento polimérico se fija a la prensa universal con las mordazas y pernos.
- ✓ La prensa universal se ajusta a una carga de 0.0 kg y se programa la velocidad de tracción a 5 mm/minuto.
- ✓ Se inicia la aplicación gradual de la carga a tracción a la velocidad programada.

- ✓ La prueba se detiene automáticamente si la muestra falla súbitamente o alcanza la capacidad máxima de la prensa, o se detiene manualmente si se observa una separación gradual entre algunos de los conectores y el perfil de material compuesto tipo polimérico. Esta separación gradual también significa falla de la junta adhesiva.
- ✓ Se registran los valores de falla o de aguante de tensión, para cada muestra evaluada.

A continuación, se describen las características del ensamble para cada geometría.

3.9.2.1. Geometría circular

La Tabla 3.9.2.1–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo REFV, conector de acero y adhesivo estructural tipo 1 y 2.

Tabla 3.9.2.1–1. Características del ensamble para una geometría circular.

Substrato 1	Tipo de Adhesivo	Substrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor del adhesivo (mm)
REFV	1	Acero	Medio	24	1
			Alta	24	1
REFV	2	Acero	Medio	24	1
			Alta	24	1

3.9.2.2. Geometría rectangular

La Tabla 3.9.2.2–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo PRFV, conector de acero y adhesivo estructural tipo 1.

Tabla 3.9.2.2–1. Características del ensamble para una geometría rectangular.

Substrato 1	Adhesivo	Substrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor del adhesivo (mm)
PRFV	1	Acero	Alta	24	1
PRFV	1	Acero	Alta	24	1

3.9.2.3. Geometría angular

La Tabla 3.9.2.3–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo RVEFV, conector de acero y adhesivo estructural tipo 1.

Tabla 3.9.2.3–1. Características del ensamble para una geometría angular.

Substrato 1	Adhesivo	Substrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor del adhesivo (mm)
RVEFV	1	Acero	Alta	24	1
RVEFV	1	Acero	Alta	24	1
RVEFV	1	Acero	Alta	24	1
RVEFV	1	Acero	Alta	24	1

3.10. Diseño preliminar del conector de fundición de hierro nodular ASTM A536

3.10.1. Requerimientos mínimos del conector de fundición de hierro nodular

Tomando en cuenta el análisis de los resultados de las pruebas mecánicas obtenidas en los conectores de acero AISI 1020 y los requerimientos mínimos para el diseño de los conectores de la Sección 3.8; se realizó el diseño de los conectores de fundición de hierro nodular. La Tabla 3.10.1–1 muestra las propiedades mecánicas de la fundición de hierro nodular utilizada para el análisis de los conectores preliminares.

Tabla 3.10.1–1. Propiedades mecánicas de la fundición de hierro nodular.

Propiedades	Fundición hierro nodular ASTM A536
Resistencia a la cedencia [MPa]	276
Resistencia a la tensión [MPa]	414
Módulo de Young [GPa]	169
Módulo de Poisson	0.29

3.10.2. Análisis de los esfuerzos mecánicos del conector preliminar de fundición de hierro nodular por el método de elemento finito

Los conectores preliminares de fundición de hierro nodular fueron modelados con el método de elemento finito, mediante el Software Catia V5R21® [48], utilizando el módulo de análisis estático, las geometrías, dimensiones y características del material de fundición de hierro nodular. Adicionalmente se tomó en cuenta el resultado de las pruebas de laboratorio y el ensamble de los conectores preliminares de acero para el diseño. Se definió la ubicación de las cargas aplicadas sobre el conector y el aguante de tensión de 2,948 kgf requerida en el orificio de conexión. La Figura 3.10.2–1, Figura 3.10.2–2 y

Figura 3.10.2–3 ilustran la representación gráfica de las tensiones y desplazamientos del conector como resultado de las simulaciones.

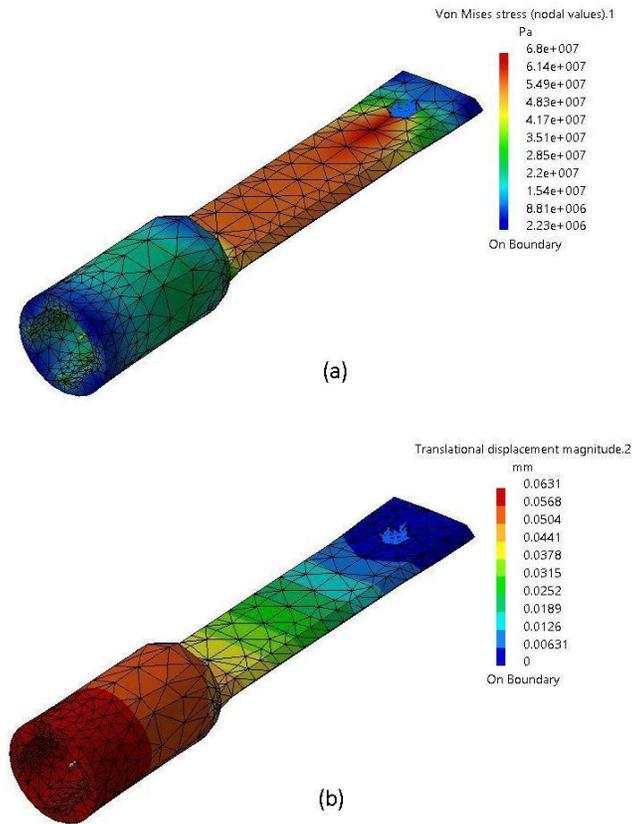


Figura 3.10.2–1. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector circular.

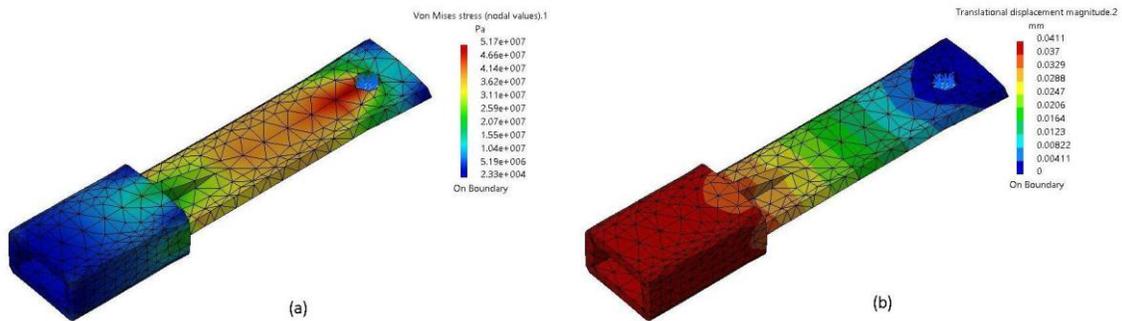


Figura 3.10.2–2. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector rectangular.

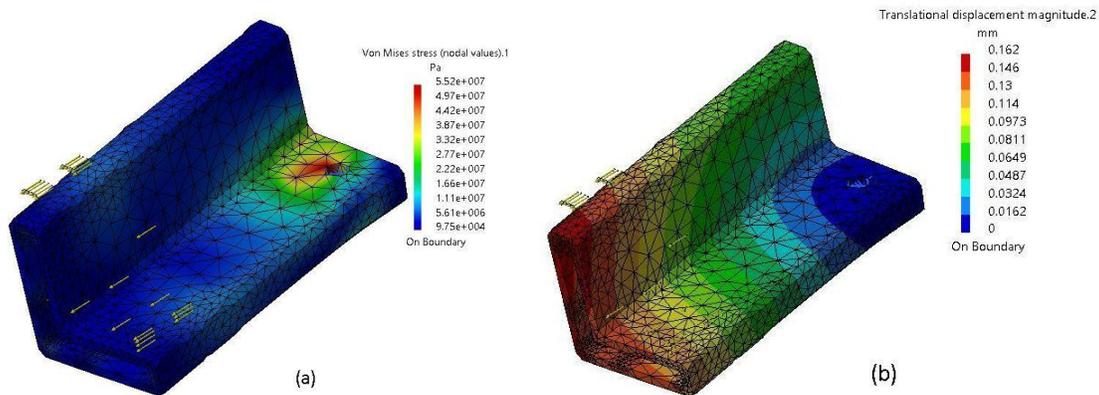


Figura 3.10.2–3. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector angular.

Con base en los resultados mostrados en la Tabla 3.10.2–1 se observa que los valores de tensión máxima obtenidos, no sobre pasan los 276 MPa de la resistencia a la cedencia de la fundición de hierro nodular; esto indica que los conectores no presentarán deformación plástica, también se observa que el desplazamiento máximo obtenido es mínimo, no afectando el desempeño del conector.

Tabla 3.10.2–1. Valor máximo de la tensión y desplazamiento de los conectores simulados.

Conector (mm)	Tensión máxima (Pa)	Desplazamiento máximo (mm)
Rectangular	5.17e ⁷	0.0411
Circular	6.80e ⁷	0.0631
Angular	5.52e ⁷	0.162

3.10.3. Fabricación de los conectores preliminares de fundición de hierro nodular

Con base en los resultados de las simulaciones y tomando en cuenta los requerimientos mínimos para el diseño de los conectores de la sección 3.8 se procedió con la fabricación de los conectores preliminares.

Los conectores se moldearon de una sola pieza de material de fundición de hierro nodular con las propiedades mecánicas, las características y matriz de elementos químicos de la fundición de hierro nodular de Tabla 3.10.1–1, Tabla 3.10.3–1 y Tabla 3.10.3–2.

Tabla 3.10.3–1. Características de la fundición de hierro nodular.

Características	ASTM A536
Matriz	Ferrítica
Grado	65-45-12
Resistencia (psi x 1000)	45000
Límite de Fluencia	32000
Dureza Brinell	170 – 207
Alargamiento	12 %

Tabla 3.10.3–2. Matriz de elementos químicos de la fundición de hierro nodular.

Elemento químico	Porcentaje
Carbono	3.3 a 3.8 %
Silicio	2.1 a 2.8 %
Manganeso	0.15 % Máx.
Fósforo	0.05 % Máx.
Azufre	1.03 Máx.

Con base en el análisis de los resultados de las pruebas mecánicas, la inspección y recomendaciones de los conectores de acero, se diseñó el conector preliminar de fundición de hierro nodular formado por el cuerpo del herraje y el cuerpo del conector. La longitud del cuerpo del herraje es de 182 mm, permitiendo su instalación con ángulo de inclinación requerido; el orificio en su extremo distal permite la conexión con los elementos principales o secundarios de la torre.

El cuerpo del conector para todas las geometrías consta de una cámara hueca de 80 mm de profundidad donde se aloja el adhesivo y el material compuesto. La parte interior de la cámara tiene 4 hilos guías de 20 mm de longitud y 1.0 mm de diámetro, distribuidos uniformemente en la periferia interna de la cámara. También contiene 4 orificios de 4.76 mm de diámetro, distribuidos uniformemente sobre la periferia media de la cámara para la inyección del adhesivo. La Figura 3.10.3–1 ilustra las partes del conector circular preliminar de fundición de hierro nodular. En el caso del conector rectangular, en el interior de la cámara tiene dos sellos de hierro nodular de 20 mm para evitar que el adhesivo fluya en el momento de su ensamble con el material compuesto.

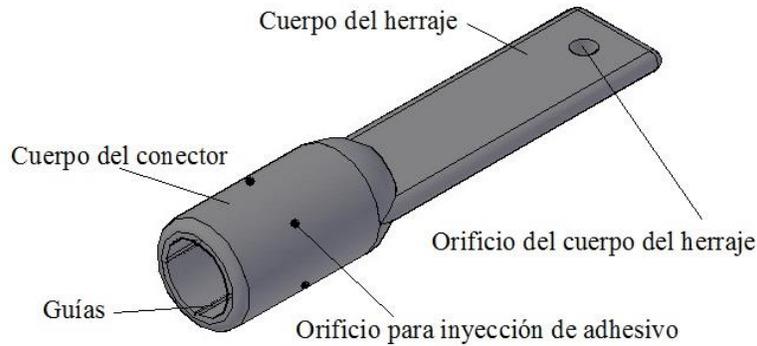


Figura 3.10.3–1. Partes del conector circular preliminar.

3.10.4. Evaluación mecánica del conector preliminar de fundición de hierro nodular –Prueba de tensión–

El objetivo de la evaluación fue valorar si los conectores diseñados y la junta adhesiva, resisten el esfuerzo a la tensión que podría presentarse en el bottom panel de una torre de transmisión. La prueba de tensión se realizó con el Equipo Universal de Pruebas Mecánicas INSTRON de 10,000 kg, bajo el procedimiento descrito en la sección 3.9.2.

A continuación, se describen las características del ensamble para cada geometría.

3.10.4.1. Geometría circular

La Tabla 3.10.4.1–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo REFV, conector de fundición de hierro nodular y adhesivo estructural tipo 2.

Tabla 3.10.4.1–1. Características del ensamble para una geometría circular.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
REFV	2	HN	Alta	1.3	1
			Alta	42	1
			Alta	576	1
REFV	2	HN	Alta	24	1
			Alta	24	1
			Alta	24	1
			Alta	24	1
			Alta	576	1
			Alta	42	1

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
			Alta	42	1
REFV	2	HN	Medio	24	1
			Medio	24	1
			Medio	24	1
			Alta	24	1
			Alta	42	1
			Alta	24	1
			Alta	168	1
			Alta	576	1

3.10.4.2. Geometría rectangular

La Tabla 3.10.4.2–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo PRFV, conector de fundición de hierro nodular y adhesivo estructural tipo 2.

Tabla 3.10.4.2–1. Características del ensamble para una geometría rectangular.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
PRFV	2	HN	Medio	24	1
			Medio	24	1
			Medio	24	1

3.10.4.3. Geometría angular

La Tabla 3.10.4.3–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo RVEFV, conector de fundición de hierro nodular y adhesivo estructural tipo 2.

Tabla 3.10.4.3–1. Características del ensamble para una geometría angular.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
RVEFV	2	HN	Medio	24	1
RVEFV	2	HN	Alta	24	1
RVEFV	2	HN	Alta	24	1

3.11. Diseño final del conector

3.11.1. Volumetría de los materiales

Con base en los resultados de laboratorio de los conectores preliminares de fundición de hierro nodular, la inspección realizada posteriormente y recomendaciones, se rediseñaron los conectores, obteniendo la volumetría mostrada en la Tabla 3.11.1–1.

Tabla 3.11.1–1. Volumetría de conectores de fundición de hierro nodular.

Geometría del conector	Material compuesto	Peso del diseño final (kg)	Peso del diseño preliminar (kg)
Angular	REFC	1.254	5.12
Angular	REFC	1.471	9.28
Angular	RVEFV	1.409	7.562
Angular	RVEFV	1.631	10.721
Rectangular	PRFV	1.163	1.784
Rectangular	PRFV	1.325	2.485
Circular	RVEFV	1.042	1.679
Circular	RVEFV	2.111	3.215

3.11.2. Tipo de material utilizado en el diseño del conector

Para el diseño de los conectores finales de fundición de hierro nodular se utilizaron las propiedades mecánicas, las características y matriz de elementos químicos de la fundición de hierro nodular de la Tabla 3.10.1–1, Tabla 3.10.3–1 y Tabla 3.10.3–2.

3.11.3. Requerimientos del cuerpo del herraje

El cuerpo del herraje para todas las geometrías fue diseñado con base en los requerimientos de la norma [7]. Todos los vértices del cuerpo del herraje fueron redondeados para facilitar su ensamble con los elementos principales y secundarios de la torre; también, para optimizar el material de fundición de hierro nodular, haciéndolos menos robustos y cumpliendo con las fuerzas de tensión especificadas por las simulaciones. El espesor y el grado de la fundición de hierro nodular fueron los utilizados para las simulaciones. El cuerpo del herraje cuenta con un orificio de 13.90 mm de diámetro ubicado en la parte distal del cuerpo del herraje, centrado y manteniendo las mínimas distancias a los extremos como se especifica en la norma; con la finalidad de utilizarse para la conexión con los elementos principales y secundarios de la torre.

Adicionalmente, se utilizaron como medio de sujeción en el equipo universal para las pruebas mecánicas de tensión.

3.11.4. Requerimientos del cuerpo del conector

Con base en la experiencia obtenida durante los ensambles del conector de acero, se propuso que en el interior del cuerpo del conector de fundición de hierro nodular se hicieran cuatro líneas guías de 20 mm de longitud y 0.75 mm de radio distribuidas uniformemente, con la finalidad de centrar el material polimérico de ingeniería durante su ensamble.

Con la experiencia obtenida durante el ensamble de los conectores preliminares de fundición de hierro nodular y el conector de acero, se propuso perforar el cuerpo del conector para inyectar el adhesivo y obtener una mejor distribución del mismo dentro del cuerpo del conector. El cuerpo del conector tiene 4 perforaciones de 4 mm de diámetro, distribuidas uniformemente sobre la periferia del conector.

3.11.5. Análisis de esfuerzos mecánicos del conector por el método de elemento finito

Los conectores finales fueron modelados con el método de elemento finito asistido por computadora, mediante el Software Catia V5R21[®] [48], utilizando el módulo de análisis estático, empleando las geometrías, valores volumétricos y la caracterización del material de fundición de hierro nodular. Adicionalmente, se tomó en cuenta el resultado de las pruebas de laboratorio y el ensamble de los conectores preliminares de fundición de hierro nodular para el diseño final. Se definió la ubicación de las cargas aplicadas sobre el conector y la tensión de aguante de 2,948 kgf requerida en el orificio de conexión. La Figura 3.11.5-1 a la Figura 3.11.5-8 muestran la representación gráfica de las tensiones y desplazamientos del conector como resultado de las simulaciones.

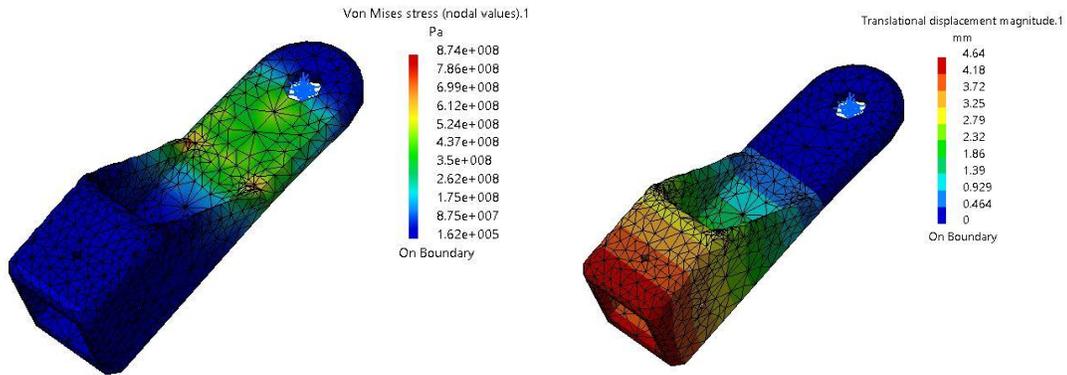


Figura 3.11.5–1. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector rectangular para perfil de 2m.

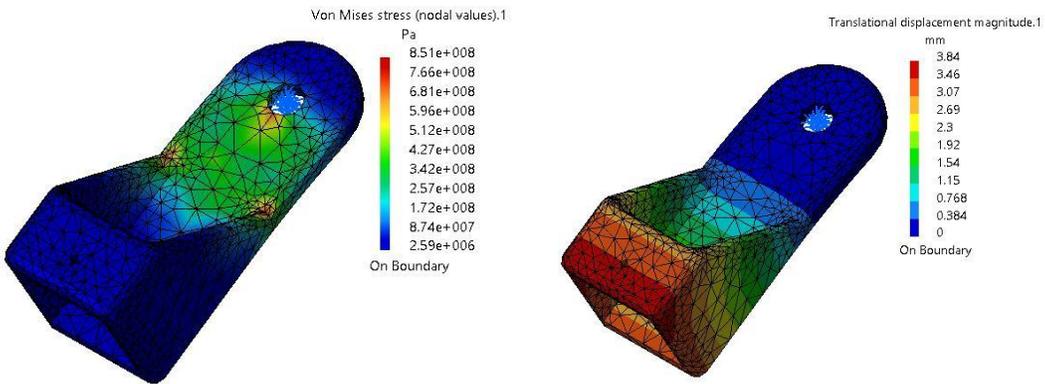


Figura 3.11.5–2. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector rectangular para perfil de 4 m.

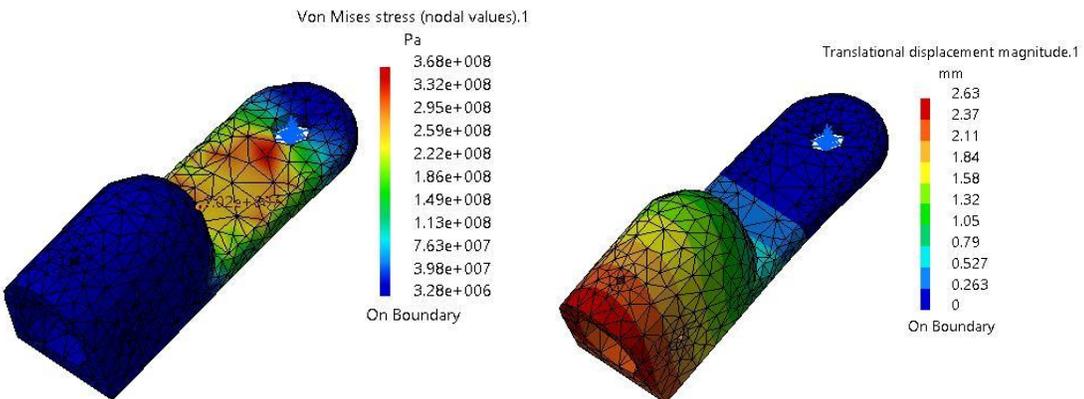


Figura 3.11.5–3. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector circular para perfil de 2 m.

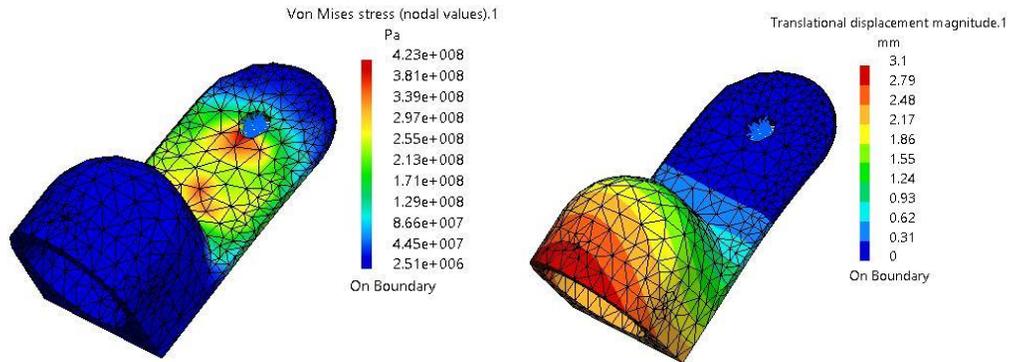


Figura 3.11.5-4. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector circular para perfil de 4 m.

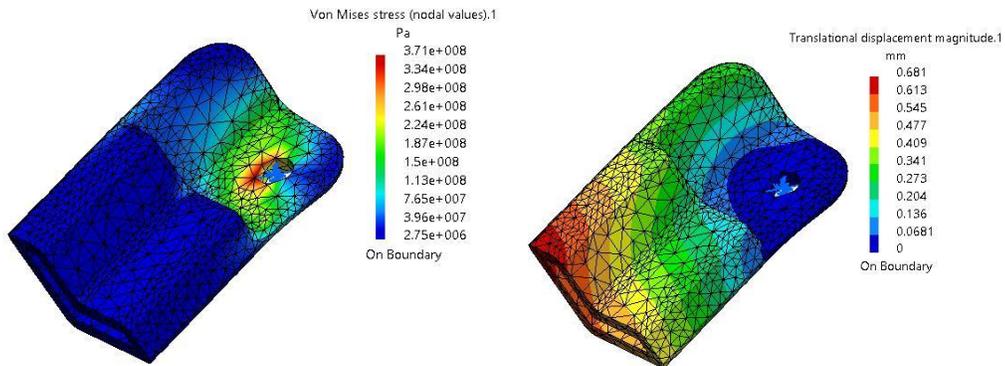


Figura 3.11.5-5. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector angular para perfil de 2 m.

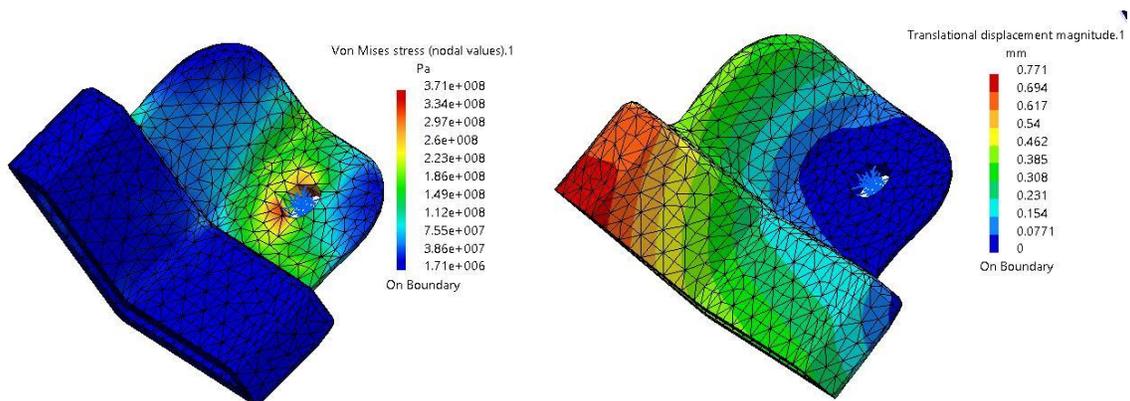


Figura 3.11.5-6. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector angular para perfil de 4 m.

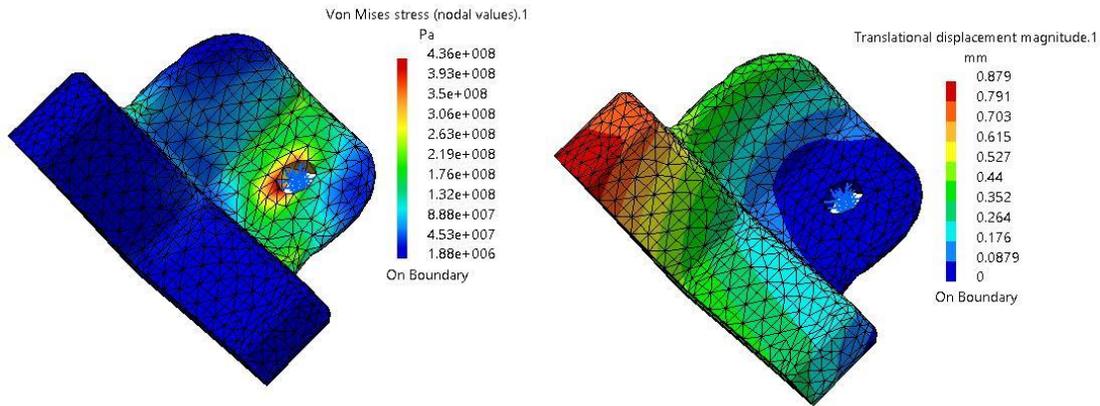


Figura 3.11.5–7. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector angular para perfiles de 2 m.

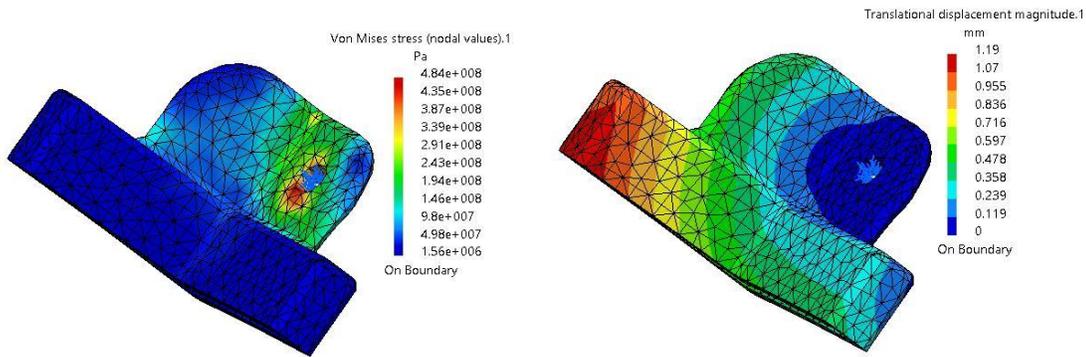


Figura 3.11.5–8. Representación gráfica de las tensiones (a) y desplazamientos (b) del conector angular para perfil de 4 m.

Con base en los resultados mostrados en las representaciones gráficas anteriores, se observa que los valores de tensión máxima obtenidos sobre pasan los 276 MPa de la resistencia a la cedencia de la fundición de hierro nodular; sin embargo, en las figuras se puede apreciar que estos esfuerzos se presentan en la parte cercana al orificio de instalación del cuerpo del herraje, esto indica que el cuerpo del conector presentará una mínima deformación plástica; también se observa que el desplazamiento máximo obtenido es mínimo, por lo tanto, esto no afectará el desempeño del conector.

3.11.6. Fabricación de los conectores

Con base en análisis de los resultados de los esfuerzos mecánicos del conector por el método de elemento finito de la Sección 3.11.5 y las consideraciones de las Secciones 3.11.3 y 3.11.4, se procedió a fabricar un lote de conectores de fundición de hierro nodular

con las características de la *Sección 3.11.2* y los requerimientos de la *Sección 3.8*, los cuales se ilustran en la *Figura 3.11.6–1*.



Figura 3.11.6–1. Conectores finales de fundición de hierro nodular.

3.11.7. Ensamble de los materiales

Los conectores de fundición de hierro nodular y los perfiles de material polimérico de ingeniería fueron limpiados de acuerdo con el grado de limpieza indicado en las tablas siguientes; la junta adhesiva entre el conector y el material compuesto es 0.75 mm; primero se depositó el adhesivo en el fondo de la cámara interior del cuerpo del conector y posteriormente, el adhesivo fue inyectado a través de los orificios hasta derramarse por la boca del conector.

3.11.8. Evaluación mecánica del conector final de fundición de hierro nodular –Prueba de tensión–

El objetivo de la evaluación fue valorar si los conectores diseñados y la junta adhesiva, resisten el esfuerzo a la tensión que podría presentarse en el bottom panel de una torre de transmisión. La prueba de tensión se realizó con el Equipo Universal de Pruebas Mecánicas INSTRON de 10,000 kg, bajo el procedimiento descrito en la *sección 3.9.2*.

A continuación, se describen las características del ensamble para cada geometría.

3.11.8.1. Geometría circular

La Tabla 3.11.8.1–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo REFV, conector de fundición de hierro nodular y adhesivo estructural tipo 2.

Tabla 3.11.8.1–1. Características del ensamble para una geometría circular.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
REFV	2	HN	Alta	24	0.75
			Alta	24	0.75
REFV	2	HN	Alta	24	0.75
			Alta	24	0.75

3.11.8.2. Geometría rectangular

La Tabla 3.11.8.2–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo PRFV, conector de fundición de hierro nodular y adhesivo estructural tipo 2.

Tabla 3.11.8.2–1. Características del ensamble para una geometría rectangular.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
PRFV	2	HN	Medio	24	0.75
			Medio	24	0.75
			Medio	24	0.75
			Medio	24	0.75
PRFV	2	HN	Medio	256	0.75
			Medio	46	0.75
			Medio	24	0.75
			Medio	24	0.75
			Medio	24	0.75
			Alta	48	0.75
			Alta	24	0.75
			Alta	24	0.75
			Alta	24	0.75

3.11.8.3. Geometría angular de REFC

La Tabla 3.11.8.3–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo REFC, conector de fundición de hierro nodular y adhesivo estructural tipo 2 y 4.

Tabla 3.11.8.3–1. Características del ensamble para una geometría angular.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
REFC	2	HN	Medio	24	0.75
			Alta	24	0.75
			Alta	96	0.75
			Alta	96	0.75
REFC	2	HN	Medio	24	0.75
			Medio	96	0.75
			Alta	72	0.75
			Alta	24	0.75
			Alta	72	0.75
REFC	4	HN	Alta	1:30	0.75
			Alta	1:30	0.75

3.11.8.4. Geometría angular de RVEFV

La Tabla 3.11.8.4–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo RVEFV, conector de fundición de hierro nodular y adhesivo estructural tipo 2.

Tabla 3.11.8.4–1. Características del ensamble para una geometría angular.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
RVEFV	2	HN	Medio	24	0.75
RVEFV	2	HN	Medio	24	0.75
RVEFV	2	HN	Medio	24	0.75
RVEFV	2	HN	Medio	24	0.75

3.11.8.5. Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR

La Tabla 3.11.8.5–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo PRFV + PTR, conector de fundición de hierro nodular y adhesivo estructural tipo 2.

Tabla 3.11.8.5–1. Características del ensamble para una geometría rectangular híbrida.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
PRFV + PTR	2	HN	Medio	46	0.75
			Medio	24	0.75
			Alta	46	0.75
			Alta	24	0.75

3.11.8.6. Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR + tornillos

La Tabla 3.11.8.6–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo PRFV + PTR + tornillo, conector de fundición de hierro nodular y adhesivo estructural tipo 2.

Tabla 3.11.8.6–1. Características del ensamble para una geometría rectangular híbrida.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
PRFV + PTR + Tornillo	2	HN	Medio	72	0.75
			Medio	72	0.75
			Medio	72	0.75
			Medio	24	0.75

3.11.8.7. Geometría rectangular híbrida de PRFV + tornillos

La Tabla 3.11.8.7–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo PRFV + tornillo, conector de fundición de hierro nodular y adhesivo estructural tipo 2.

Tabla 3.11.8.7–1. Características del ensamble para una geometría rectangular híbrida.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
PRFV + Tornillo	2	HN	Alta	24	0.75
			Alta	48	0.75
			Alta	48	0.75

3.11.8.8. Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR + adhesivo 4

La Tabla 3.11.8.8–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo PRFV + PTR, conector de fundición de hierro nodular y adhesivo estructural tipo 4.

Tabla 3.11.8.8–1. Características del ensamble para una geometría rectangular híbrida.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
PRFV + PTR	4	HN	Alta	1:30	0.75
			Alta	46	0.75
			Alta	21	0.75
			Alta	21	0.75

3.11.8.9. Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR + tornillos + adhesivo 4

La Tabla 3.11.8.9–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo PRFV + PTR + tornillo, conector de fundición de hierro nodular y adhesivo estructural tipo 4.

Tabla 3.11.8.9–1. Características del ensamble para una geometría rectangular híbrida.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
PRFV + PTR + Tornillo	4	HN	Medio	46	0.75
			Medio	46	0.75

3.11.8.10. Geometría rectangular híbrida de PRFV + adhesivos 2 y 3

La Tabla 3.11.8.10–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo PRFV, conector de fundición de hierro nodular y adhesivo estructural tipo 2 y 3.

Tabla 3.11.8.10–1. Características del ensamble para una geometría rectangular híbrida.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
PRFV	2 y 3	HN	Alta	96	0.75

3.11.8.11. Geometría rectangular de PRFV + tornillos

La Tabla 3.11.8.11–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo PRFV + tornillo, conector de fundición de hierro nodular y sin adhesivo estructural.

Tabla 3.11.8.11–1. Características del ensamble para una geometría rectangular híbrida.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
PRFV+ Tornillo	-	HN	-	-	-
			-	-	-

3.11.8.12. Geometría angular híbrida de REFC + adhesivo tipo 2 + tornillos

La Tabla 3.11.8.12–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo REFC + tornillo, conector de fundición de hierro nodular y adhesivo estructural tipo 2.

Tabla 3.11.8.12–1. Características del ensamble para una geometría angular híbrida.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
REFC + Tornillo	2	HN	Medio	96	0.75

3.11.8.13. Geometría angular híbrida de REFC + tornillo

La Tabla 3.11.8.13–1 muestra las características del ensamble para los sustratos de material tipo REFC + tornillo, conector de fundición de hierro nodular y sin adhesivo estructural.

Tabla 3.11.8.13–1. Características del ensamble para una geometría angular híbrida.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Grado de limpieza	Tiempo de curado (h)	Espesor de adhesivo (mm)
REFC + Tornillo	-	HN	-	-	-
REFC + Tornillo	-	HN	-	-	-

3.12. Conclusión del capítulo

En este capítulo se describe la metodología utilizada para el diseño del conector y junta adhesiva para los elementos redundantes de material compuesto (REFV, PRFV, RVEFV y REFC). Mediante la revisión de los elementos redundantes que integran una torre típica de 115, 230 y 400 kV, se determinó la longitud máxima y mínima de los elementos redundantes en la zona del bottom panel. Se describen los escenarios a simular con el análisis estructural obteniendo la caracterización de los esfuerzos para diseñar los elementos redundantes de material compuesto, su geometría, conectores y junta adhesiva, considerando la normativa, recomendaciones, pruebas de laboratorio y observación posterior a la prueba.

El modelado de los conectores con el método de elemento finito asistido por computadora, fue fundamental en la toma de decisiones para la fabricación de los conectores en sus diferentes etapas.

CAPÍTULO IV. Resultados de las pruebas

4.1. Introducción

En el siguiente capítulo, se muestran los resultados de la evaluación mecánica de los conectores, la junta adhesiva y los elementos redundantes de material compuesto de REFV, PRFV, RVEFV y REFC.

4.2. Equipo universal de pruebas mecánicas

Las pruebas de flexión y tensión se realizaron con el equipo universal de pruebas mecánicas INSTRON, modelo 5500R con capacidad de 10,000 kg con accesorios para ambas pruebas. La Figura 4.2–1 ilustra el equipo universal utilizado para pruebas mecánicas de laboratorio.



Figura 4.2–1. Equipo universal para pruebas mecánicas.

4.3. Evaluación mecánica de los materiales compuestos –Prueba de flexión–

Se realizó la prueba de flexión a los materiales compuestos tipo poliméricos de ingeniería de REFV, PRFV, RVEFV y REFC seleccionados. Con la finalidad de evaluar la restricción por carga del liniero establecida en la norma [7]. Esta restricción menciona que el elemento de la torre cuyo eje longitudinal forma un ángulo menor que 30° con respecto a la horizontal, debe resistir una carga concentrada de 1,225 N o 125 kgf perpendicular al

aje longitudinal y aplicada en cualquier punto de su longitud. La Tabla 4.3–1 muestra los resultados de la prueba de flexión realizada a los materiales poliméricos de ingeniería.

Tabla 4.3–1. Resultados de la prueba de flexión de los materiales compuestos.

Geometría	Material	Carga máx. aplicada (kgf)	Flexión (cm)	Evaluación de la prueba	Observaciones
Angular para perfil de 2 m de largo	REFC	144	11.9	Cumple	La muestra falla, sin embargo el valor requerido es 125 kgf
Angular para perfil de 4 m de largo	REFC	140	3.0	Cumple	No se observa deformación ni fractura
Circular para perfil de 2 m de largo	REFV	150	6.0	Cumple	No se observa deformación ni fractura
Circular para perfil de 4 m de largo	REFV	150	5.0	Cumple	No se observa deformación ni fractura
Rectangular para perfil de 2 m de largo	PRFV	125	20.0	Cumple	Se observa una deformación de aprox. 1.2 cm, sin mostrar fractura
Rectangular para perfil de 4 m de largo	PRFV	125	40.0	Cumple	Se observa una deformación de aprox. 2.8 cm, sin mostrar fractura
Angular para perfil de 2 m de largo	RVEFV	150	1.8	Cumple	No se observa deformación ni fractura
Angular para perfil de 4 m de largo	RVEFV	150	5.1	Cumple	No se observa deformación ni fractura

Para reducir la flexión del perfil rectangular de PRFV, se incorporó durante su fabricación un alma de acero de Perfil Tubular Rectangular (PTR), de tal forma que no se afectarían sus dimensiones iniciales, quedando de la siguiente manera:

- a) Para el perfil rectangular de PRFV de 2 m de largo + PTR de 1.6 mm
- b) Para el perfil rectangular de PRFV de 4 m de largo + PTR de 1.9 mm

Se evaluaron los perfiles rectangulares híbridos de 2 y 4 m de longitud para la prueba de flexión, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 4.3–2.

Tabla 4.3–2. Resultados de la prueba de flexión en los perfiles rectangulares híbridos.

Geometría	Material	Carga máx. aplicada (Kgf)	Flexión (cm)	Evaluación de la prueba	Observaciones
Rectangular para perfil de 2 m de largo	PRFV + PTR	125	11.2	Cumple	Se observa una deformación de aprox. 4.6 cm, sin mostrar fractura
Rectangular para perfil de 4 m de largo	PRFV + PTR	125	30.8	Cumple	Se observa una deformación de aprox. 15 cm, sin mostrar fractura

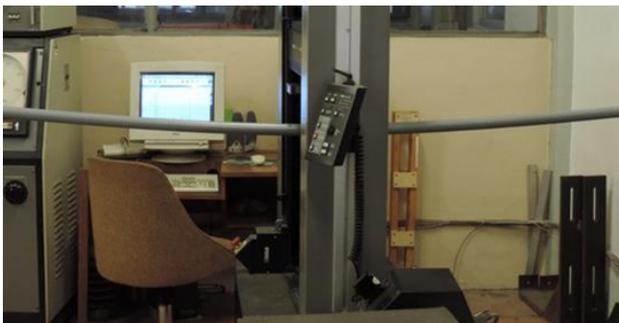
La Figura 4.3–1 ilustra la prueba de flexión al final de la carga máxima aplicada para los perfiles de material compuesto tipo REFC, PRFV, REFV y RVEFV, para 4 m de longitud.



REFC



PRFV



REFV



RVEFV

Figura 4.3–1. Prueba de flexión en materiales compuestos de 4 m de longitud.

4.4. Evaluación mecánica del conector de acero –Prueba de tensión–

Los conectores ensamblados con los materiales compuestos por medio de la junta adhesiva fueron evaluados mediante las pruebas de tensión, con la finalidad de comprobar que soportan la mínima fuerza de tensión de 29.05 kN ó 2,948 kgf presentada por los elementos redundantes angulares de acero en la zona del bottom panel de la torre de transmisión.

4.4.1. Geometría circular

La gráfica de la Figura 4.4.1–1 muestra el comportamiento de la junta adhesiva (líneas negras), obtenidos mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil circular de material de REFV y conector circular de acero, adheridos con adhesivo estructural tipo 1 y 2. La línea discontinua (roja) representa la mínima fuerza de tensión requerida.

La Tabla 3.9.2.1–1 muestra las características del ensamble; la Tabla 4.4.1–1 muestra el tipo de falla obtenida, de acuerdo con las pruebas de tensión realizadas en el ensamble de material tipo REFV, conector de acero y adhesivo estructural.

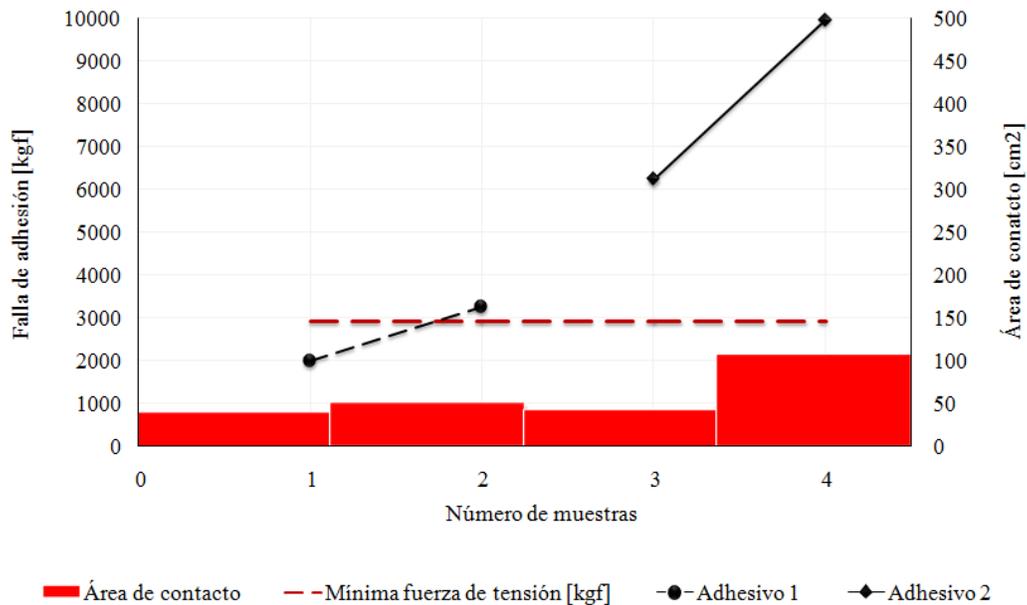


Figura 4.4.1–1. Comportamiento de la junta adhesiva en el perfil circular de REFV y conector de acero adheridos con adhesivos tipo 1 y 2.

Tabla 4.4.1–1. Tipo de falla en la unión de los sustratos de perfil de REFV y conector de acero.

Substrato 1	Adhesivo	Substrato 2	Falla de la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla	Figura
REFV	1	Acero	2,000	Adhesión	Figura 4.4.1–2(a)
			3,252	Adhesión	
REFV	2	Acero	6,237	Adhesión	Figura 4.4.1–2(b)
			10,000	No hay falla	

La Figura 4.4.1–2 ilustra la condición típica de los sustratos de perfil circular de REFV y conector de acero al final de la prueba de tensión evaluada en el laboratorio.

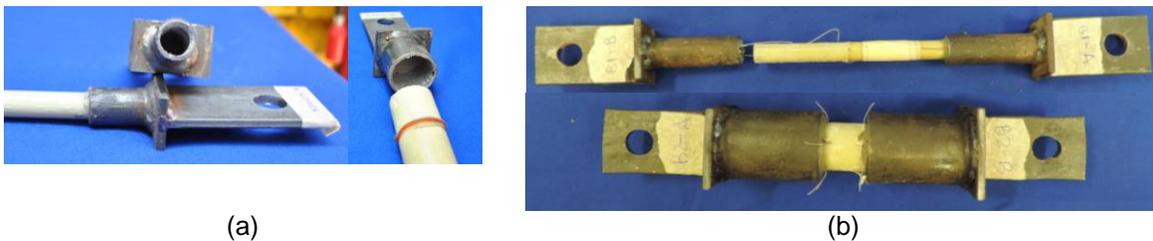


Figura 4.4.1–2. Conector de acero y perfil circular de REFV al final de la evaluación.

4.4.2. Geometría rectangular

La gráfica de la Figura 4.4.2–1 muestra el comportamiento de la junta adhesiva (líneas negras), obtenidos mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil rectangular de material de PRFV y conector rectangular de acero, adheridos con adhesivo estructural tipo 1. La línea discontinua (roja) representa la mínima fuerza de tensión requerida.

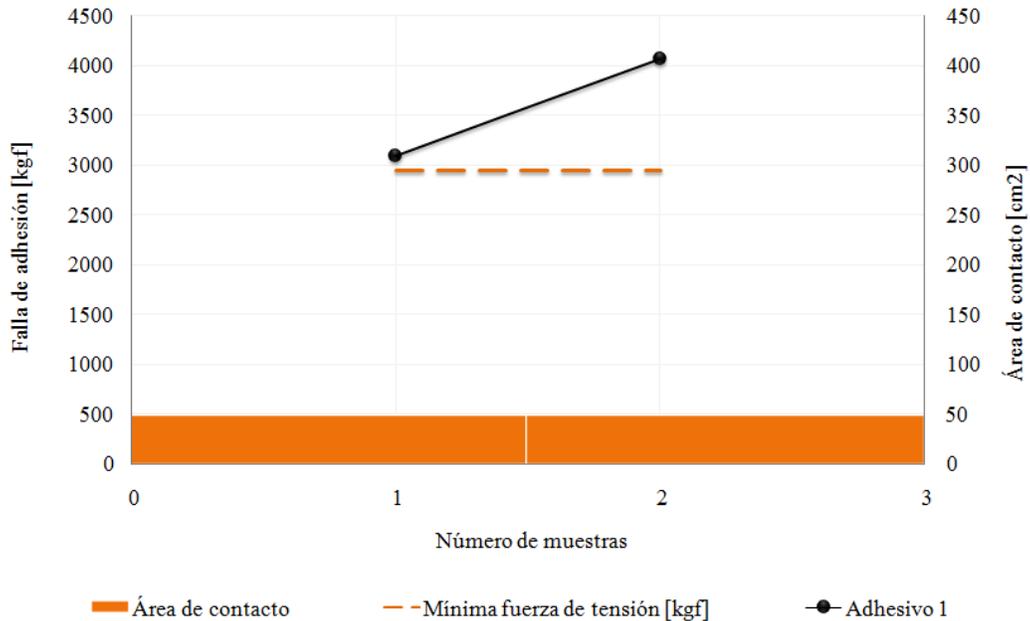


Figura 4.4.2-1. Comportamiento de la junta adhesiva en el perfil rectangular de PRFV y conector de acero adheridos con adhesivo tipo 1.

La Tabla 3.9.2.2-1 muestra las características del ensamble; la Tabla 4.4.2-1 muestra el tipo de falla obtenida, de acuerdo con las pruebas de tensión realizadas en el ensamble de material tipo PRFV, conector de acero y adhesivo estructural tipo 1.

Tabla 4.4.2-1. Tipo de falla en la unión de los sustratos de perfil de PRFV y conector de acero.

Substrato 1	Adhesivo	Substrato 2	Falla de la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla
PRFV	1	A	3094	Adhesión
PRFV	1	A	4060	Adhesión

La Figura 4.4.2-2 ilustra la condición típica de los sustratos de perfil rectangular de PRFV y conector de acero al final de la prueba de tensión evaluada en el laboratorio.



Figura 4.4.2–2. Conector de acero y perfil rectangular de PRFV al final de la evaluación.

4.4.3. Geometría angular

La gráfica de la Figura 4.4.3–1 muestra el comportamiento de la junta adhesiva (líneas negras), obtenidos mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil angular de material de RVEFV y conector angular de acero, adheridos con adhesivo estructural tipo 1. La línea discontinua (roja) representa la mínima fuerza de tensión requerida.

La Tabla 3.9.2.3–1 muestra las características del ensamble; la Tabla 4.4.3–1 muestra el tipo de falla obtenida, de acuerdo con las pruebas de tensión realizadas en el ensamble conector de acero, material tipo RVEFV y adhesivo estructural tipo 1.

La Figura 4.4.3–2 ilustra la condición típica de los sustratos del conector de acero y perfil rectangular de RVEFV al final de la prueba de tensión evaluada en el laboratorio.

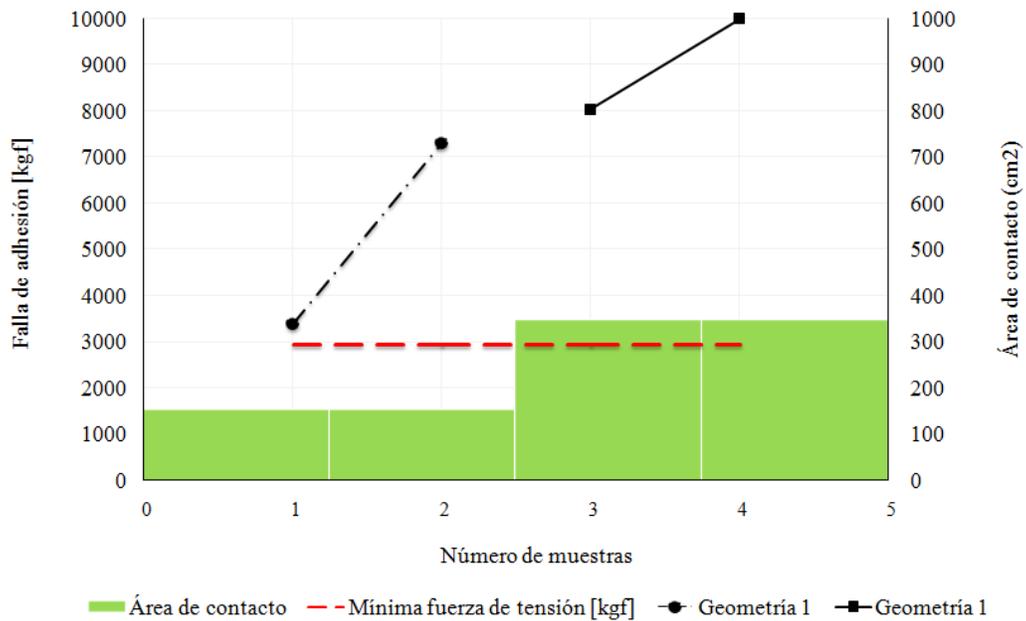


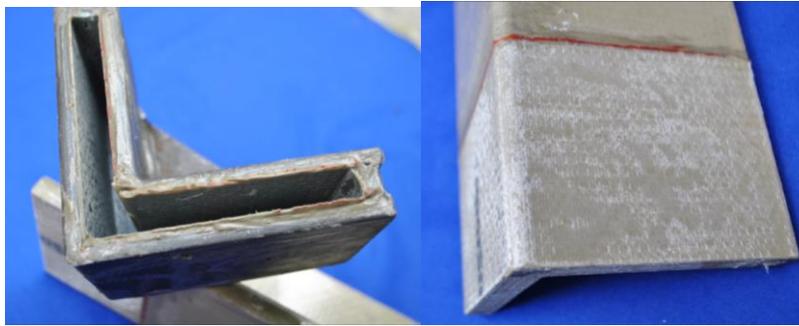
Figura 4.4.3-1. Comportamiento de la junta adhesiva en el perfil angular de RVEFV y conector de acero adheridos con adhesivo tipo 1.

Tabla 4.4.3-1. Tipo de falla en la unión de los sustratos de perfil de PRFV y conector de acero.

Substrato 1	Adhesivo	Substrato 2	Falla de la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla	Figura
RVEFV	1	A	3375	Adhesión	Figura 4.4.3-2(a)
RVEFV	1	A	7294	Adhesión	
RVEFV	1	A	8036	Adhesión	Figura 4.4.3-2(b)
RVEFV	1	A	10000	No hay falla	



(a)



(b)

Figura 4.4.3–2. Conector de acero y perfil rectangular de RVEFV al final de la evaluación.

4.4.4. Análisis de los resultados de las pruebas mecánicas

Para los tres tipos de geometrías, las pruebas de laboratorio demostraron que las fuerzas de tensión del ensamble formado por los conectores, la junta adhesiva y el material compuesto, están por arriba de la mínima fuerza de tensión requerida de 2,948 kgf.

También se observó durante la inspección de los ensambles lo siguiente:

- ✓ Geometría del conector. Se asume que el conector debe tener la geometría del perfil de material compuesto.
- ✓ Gap. El espaciamiento entre el material compuesto y el conector debe ser igual o menor que 1 mm.
- ✓ Guías. Se requiere de hilos guías en el interior de la cámara del cuerpo del conector para el centrado del perfil de material compuesto; el radio de los hilos guías se recomienda de 1 mm o menor y distribuidos uniformemente en la periferia interior de la cámara; por ejemplo: para las geometrías redonda y rectangular se recomiendan 4 hilos guías, para la geometría angular se recomiendan de 4 a 6 hilos guías.
- ✓ Orificios para inyección de adhesivo. Se requiere de orificios que atraviesen las paredes del cuerpo del conector, con la finalidad de inyectar el adhesivo en la cámara interior del cuerpo del conector. Se recomienda que los orificios sean de diámetro igual que la boquilla despachadora del adhesivo, esto es, de hasta 5 mm de diámetro y distribuidos uniformemente en la periferia del cuerpo del conector; por ejemplo, para las geometrías redonda y rectangular se recomiendan 4 orificios, y para la geometría angular de 4 a 6 orificios.

- ✓ La ubicación de los orificios en el cuerpo del herraje y del conector debe estar de acuerdo con los lineamientos de la norma [7].

4.5. Evaluación mecánica del conector preliminar de fundición de hierro nodular –Prueba de tensión–

4.5.1. Geometría circular

La gráfica de la Figura 4.5.1–1 muestra el comportamiento de la junta adhesiva (línea negra), obtenida mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil circular de material de REFV y perfil circular de fundición de hierro nodular, adheridos con adhesivo estructural tipo 2. La línea discontinua (roja) representa la mínima fuerza de tensión requerida.

La Tabla 3.10.4.1–1 muestra las características del ensamble; la

Tabla 4.5.1–1 muestra el tipo de falla obtenida, de acuerdo con las pruebas de tensión realizadas en el ensamble del conector de fundición de hierro nodular, material tipo REFV y adhesivo estructural.

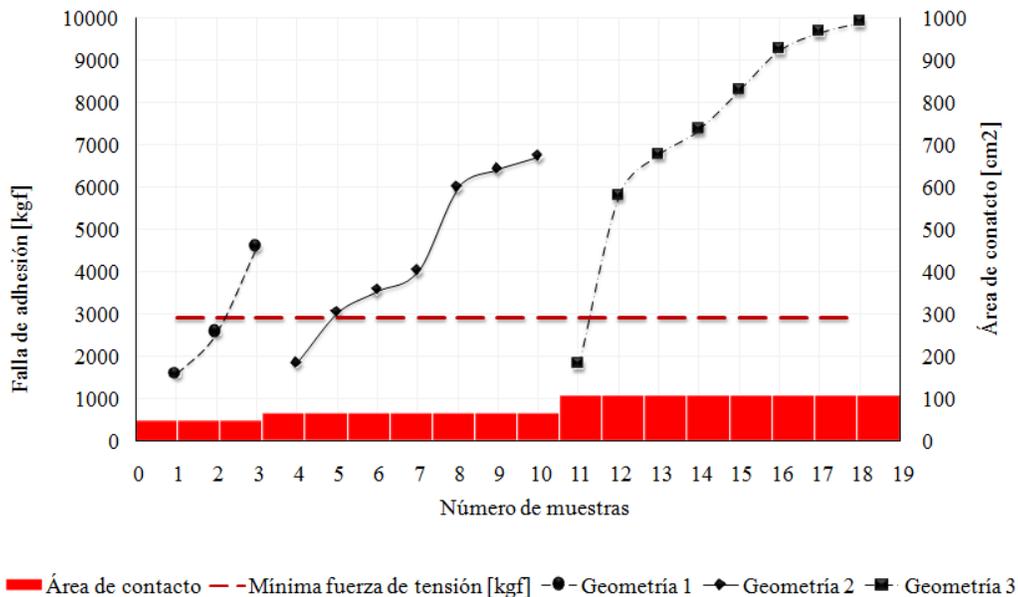


Figura 4.5.1–1. Comportamiento de la junta adhesiva en el perfil circular de REFV y conector de fundición de hierro nodular adheridos con adhesivo tipo 2.

Tabla 4.5.1–1. Tipo de falla en la unión de los sustratos de perfil de REFV y conector de fundición de hierro nodular.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla
REFV	2	HN	1,599 2,595 4,621	Adhesión Adhesión Adhesión
REFV	2	HN	1,874 3,042 3,563 4,029 5,988 6,432 6,737	Adhesión Adhesión Adhesión Adhesión Adhesión Adhesión Adhesión
REFV	2	HN	1,820 5,808 6,784 7,376 8,309 9,269 10,000 10,000	Adhesión Adhesión Adhesión Adhesión Sustrato (fractura en la fundición de hierro nodular) Adhesión No hay falla No hay falla

La Figura 4.5.1–2 ilustra la condición típica de los sustratos del conector de fundición de hierro nodular y perfil circular de REFV al final de la prueba de tensión evaluada en el laboratorio.



Figura 4.5.1–2. Conector de fundición de hierro nodular y perfil circular de REFV al final de la evaluación.

4.5.2. Geometría rectangular

La gráfica de la Figura 4.5.2–1 muestra el comportamiento de la junta adhesiva (líneas negras), obtenida mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil rectangular de material de PRFV y conector rectangular de fundición de hierro nodular, adheridos con adhesivo estructural tipo 2. La línea discontinua (roja) representa la mínima fuerza de tensión requerida.

La Tabla 3.10.4.2–1 muestra las características del ensamble; la Tabla 4.5.2–1 muestra el tipo de falla obtenida, de acuerdo con las pruebas de tensión realizadas en el ensamble conector de fundición de hierro nodular, elemento de material tipo PRFV y adhesivo estructural tipo 2.

La Figura 4.5.2–2 ilustra la condición típica de los sustratos del conector de fundición de hierro nodular y perfil rectangular de PRFV al final de la prueba de tensión evaluada en el laboratorio.

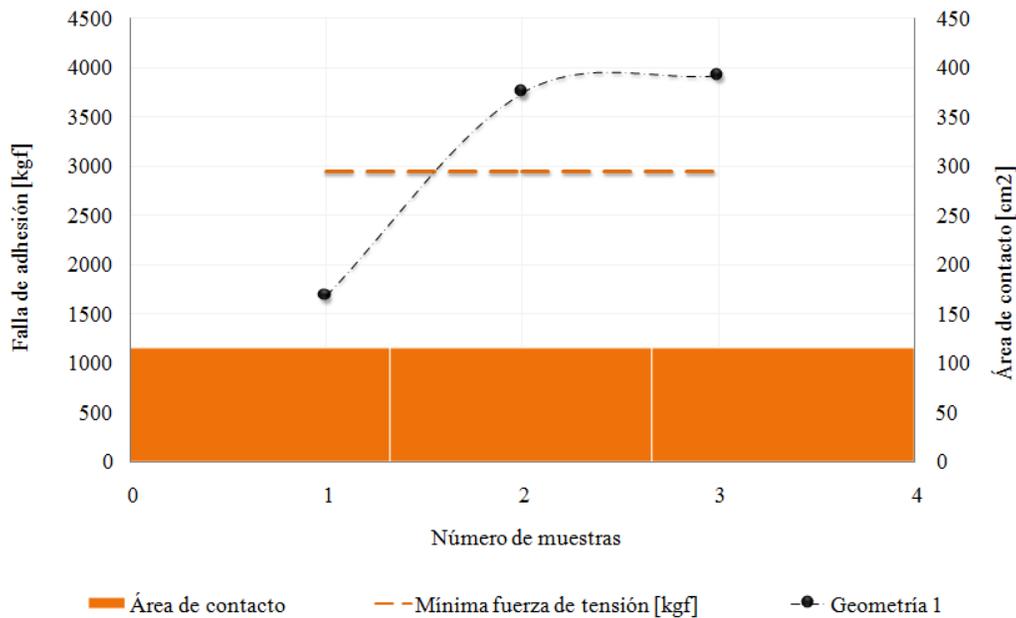


Figura 4.5.2–1. Comportamiento de la junta adhesiva en el perfil rectangular de PRFV y conector de acero adheridos con adhesivo tipo 2.

Tabla 4.5.2–1. Tipo de falla en la unión de los sustratos de perfil de PRFV y conector de fundición de hierro nodular.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla
PRFV	2	HN	1680	Adhesión
			3747	Sustrato (fractura en el material de PRFV)
			3923	Sustrato (fractura en el material de PRFV)



Figura 4.5.2–2. Conector de fundición de hierro nodular y perfil rectangular de PRFV al final de la evaluación.

4.5.3. Geometría angular

La gráfica de la Figura 4.5.3–1 muestra el comportamiento de la junta adhesiva (línea negra), obtenida mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil angular de material de RVEFV y conector angular de fundición de hierro nodular, adheridos con adhesivo estructural tipo 2. La línea discontinua (roja) representa la mínima fuerza de tensión requerida.

La Tabla 3.10.4.3–1 muestra las características del ensamble; la Tabla 4.5.3–1 muestra el tipo de falla obtenida, de acuerdo con las pruebas de tensión realizadas en el ensamble de material tipo RVEFV, conector de fundición de hierro nodular y adhesivo estructural tipo 2.

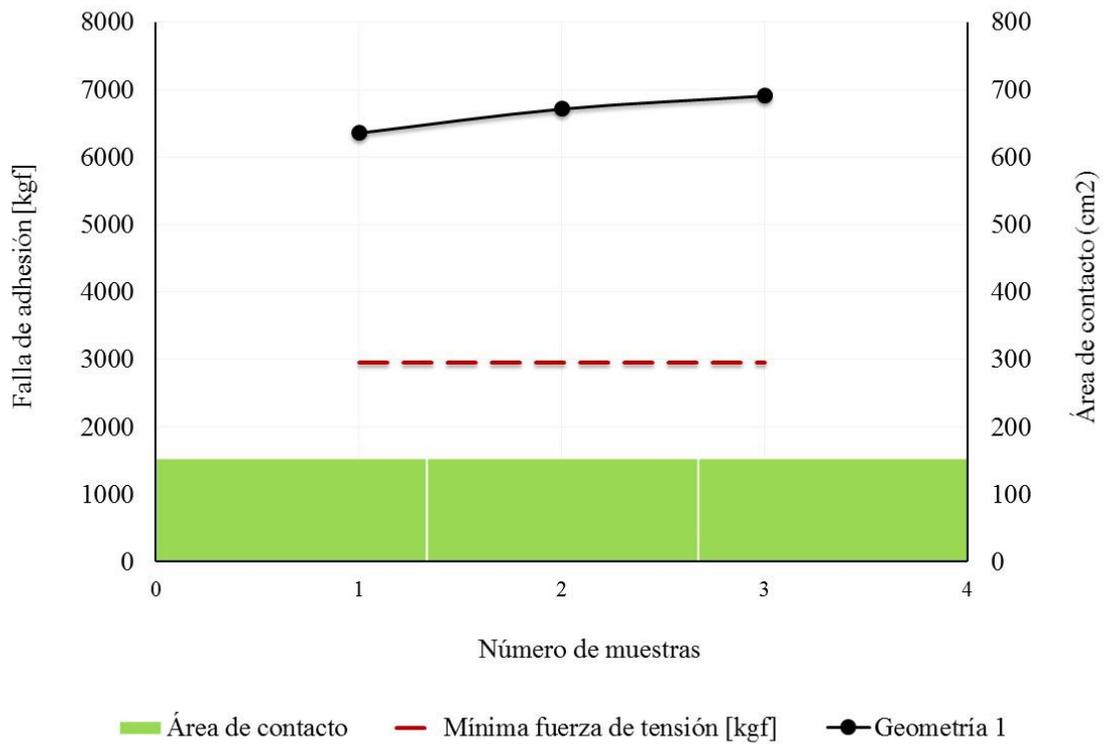


Figura 4.5.3–1. Comportamiento de la junta adhesiva en el perfil angular de RVEFV y conector de fundición de hierro nodular adheridos con adhesivo tipo 2.

Tabla 4.5.3–1. Tipo de falla en la unión de los sustratos de perfil de RVEFV y conector de fundición de hierro nodular.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla
RVEFV	2	HN	6356	Sustrato (fractura el hierro nodular)
RVEFV	2	HN	6713	Sustrato (fractura el hierro nodular)
RVEFV	2	HN	6906	Adhesión

La Figura 4.5.3–2 ilustra la condición típica de los sustratos del conector de fundición de hierro nodular y el perfil angular de RVEFV al final de la prueba de tensión evaluada en el laboratorio.



Figura 4.5.3–2. Conector de fundición de hierro nodular y Perfil rectangular de RVEFV al final de la evaluación.

4.5.4. Análisis de los resultados de las pruebas mecánicas

Las pruebas de aguante de tensión de laboratorio para las geometrías circular, rectangular y angular, demostraron que la fuerza aplicada al conector está por arriba de la mínima fuerza de tensión requerida de 2,948 kgf. Esto significa que se puede recalcular el área de contacto de las geometrías, para disminuir la profundidad de la cámara del cuerpo del conector.

En el proceso de inspección durante las pruebas, se observó que los conectores no sufrieron fractura ni deformación en el orificio y cuerpos del herraje y conector.

Considerando que en el perfil angular principal de la torre se conectarán dos elementos redundantes por cara (uno en la cara anterior y otro en la cara posterior), entonces, la longitud del cuerpo del herraje del conector se puede reducir a un mínimo.

De acuerdo con los resultados de las pruebas de laboratorio y observaciones realizadas durante la inspección de los materiales y ensamble, se presentan las recomendaciones siguientes:

- ✓ El acabado exterior del cuerpo del herraje y conector deben estar libres de porosidad superficial, cavidades de contracción, rebordes filosos, protuberancias, grietas, enmendaduras, deformaciones, fisuras, golpes y residuos sólidos que afecten las propiedades mecánicas de la fundición de hierro nodular y su apariencia.
- ✓ El acabado de la cámara interior del cuerpo del conector debe estar libre de rebordes filosos, protuberancias, grietas, enmendaduras, deformaciones, fisuras,

golpes y residuos sólidos que afecten las propiedades mecánicas del hierro nodular e impidan el acoplamiento perfecto con el material compuesto.

- ✓ Para la limpieza de la cámara interior del conector se deberá tratar con arena 50-60 para mejorar el área de contacto.
- ✓ Tanto los conectores de hierro nodular como los materiales compuestos se deben limpiar antes de su ensamble.

Como consecuencia del análisis de los resultados de la prueba de tensión, se puede obtener conectores de geometría y dimensión menor; optimizando en los materiales (hierro nodular y adhesivo) y haciéndolos menos atractivos al robo, sin sacrificar los requerimientos mínimos necesarios.

4.6. **Evaluación mecánica del conector final de fundición de hierro nodular –Prueba de tensión–**

4.6.1. **Geometría circular**

La Figura 4.6.1–1 ilustra el comportamiento de la fuerza de adhesión (línea negra), obtenida mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil circular de material de REFV y fundición de HN, adheridos mediante un adhesivo estructural tipo 2. La línea discontinua (roja) representa la mínima fuerza de tensión requerida.

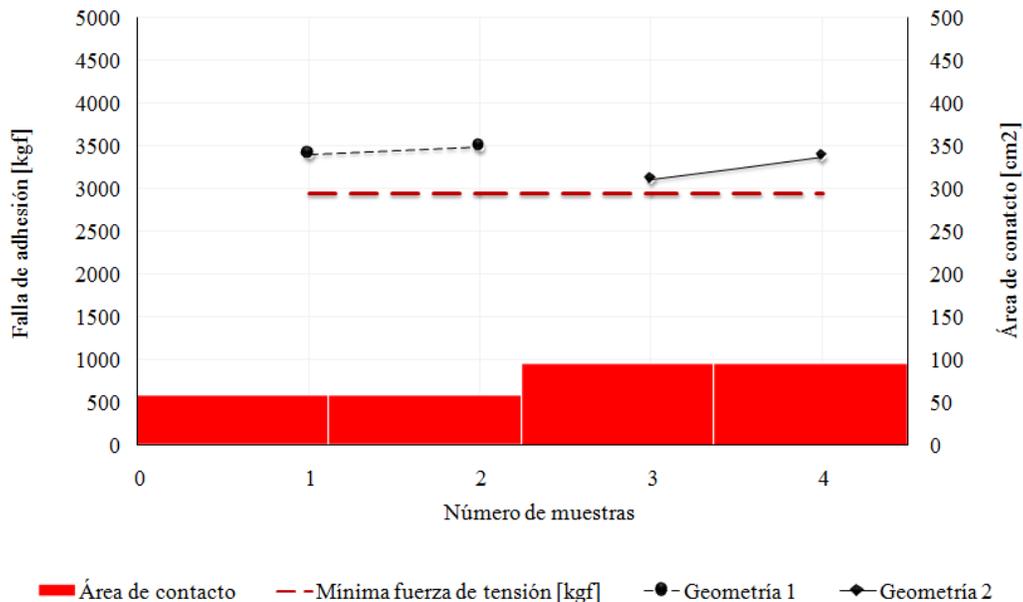


Figura 4.6.1–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2.

La Tabla 4.6.1–1 muestra las características del adhesivo utilizado en la unión de los sustratos, la fuerza de adhesión máxima y el tipo de fallo de acuerdo con las pruebas de laboratorio.

Tabla 4.6.1–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos de perfil de REFV y fundición de HN.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla
REFV	2	HN	3411 3494	Adhesión Adhesión
REFV	2	HN	3114 3385	Adhesión Adhesión

La Figura 4.6.1–2 ilustra la condición típica de los sustratos del conector de hierro nodular y el perfil angular de REFV al final de la evaluación en el laboratorio.



Figura 4.6.1–2. Sustratos al final de la evaluación.

4.6.2. Geometría rectangular

La Figura 4.6.2–1 ilustra el comportamiento de la fuerza de adhesión (líneas negras), obtenida mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil rectangular

de material de PRFV y fundición de HN, adheridos mediante un adhesivo estructural tipo 2. La línea discontinua (naranja) representa la mínima fuerza de tensión requerida.

La Tabla 4.6.2–1 muestra las características del adhesivo utilizado en la unión de los sustratos, la fuerza de tensión máxima y el tipo de falla de acuerdo con las pruebas de laboratorio.

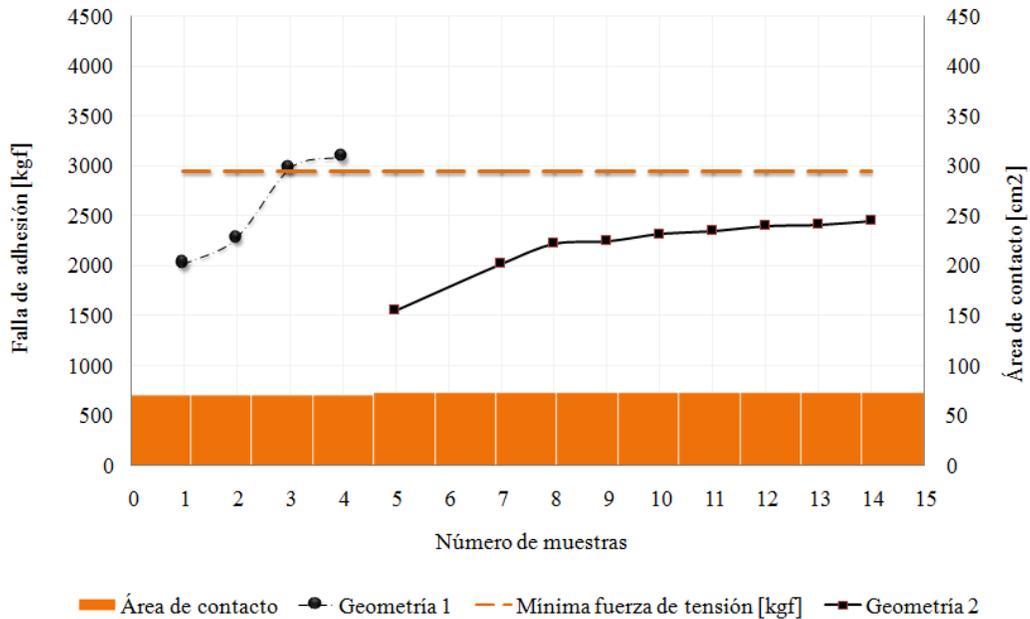


Figura 4.6.2–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2.

Tabla 4.6.2–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos de perfil de PRFV y HN.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla	Figura No.
PRFV	2	HN	2023	Sustrato (fractura del material de PRFV)	Figura 4.6.2–2(a)(b)
			2286	Adhesión	
			2977	Adhesión	
			3096	Adhesión	
PRFV	2	HN	1553	Adhesión	Figura 4.6.2–2(b)
			1683	Adhesión	
			2023	Adhesión	
			2223	Adhesión	
			2247	Adhesión	

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla	Figura No.
			2315	Adhesión	
			2350	Adhesión	
			2400	Adhesión	
			2410	Adhesión	
			2449	Adhesión	

La Figura 4.6.2–2 ilustra la condición típica de los sustratos del conector de hierro nodular y el perfil rectangular de PRFV al final de la evaluación en el laboratorio.



Figura 4.6.2–2. Sustratos al final de la evaluación.

4.6.3. Geometría angular de REFC

La Figura 4.6.3–1 ilustra el comportamiento de la fuerza de adhesión (líneas negras), obtenida mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil angular de material de REFC y fundición de HN, adheridos mediante un adhesivo estructural tipo 2. La línea discontinua (roja) representa la mínima fuerza de tensión requerida.

La Tabla 4.6.3–1 muestra las características del adhesivo utilizado en la unión de los sustratos, la fuerza de tensión máxima y el tipo de falla de acuerdo con las pruebas de laboratorio.

La Figura 4.6.3–2 ilustra la condición típica de los sustratos del conector de hierro nodular y el perfil angular de REFC adheridas con adhesivo tipo 2 al final de la evaluación en el laboratorio.

De la misma manera, se obtuvo el comportamiento de la fuerza de adhesión y área de contacto mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil angular de material de REFC y perfil angular de HN, adheridos mediante un adhesivo estructural tipo

4. La Tabla 4.6.3–2 muestra los resultados de las pruebas de laboratorio, el valor máximo y mínimo de la fuerza de adhesión y área de contacto, y el fallo típico.

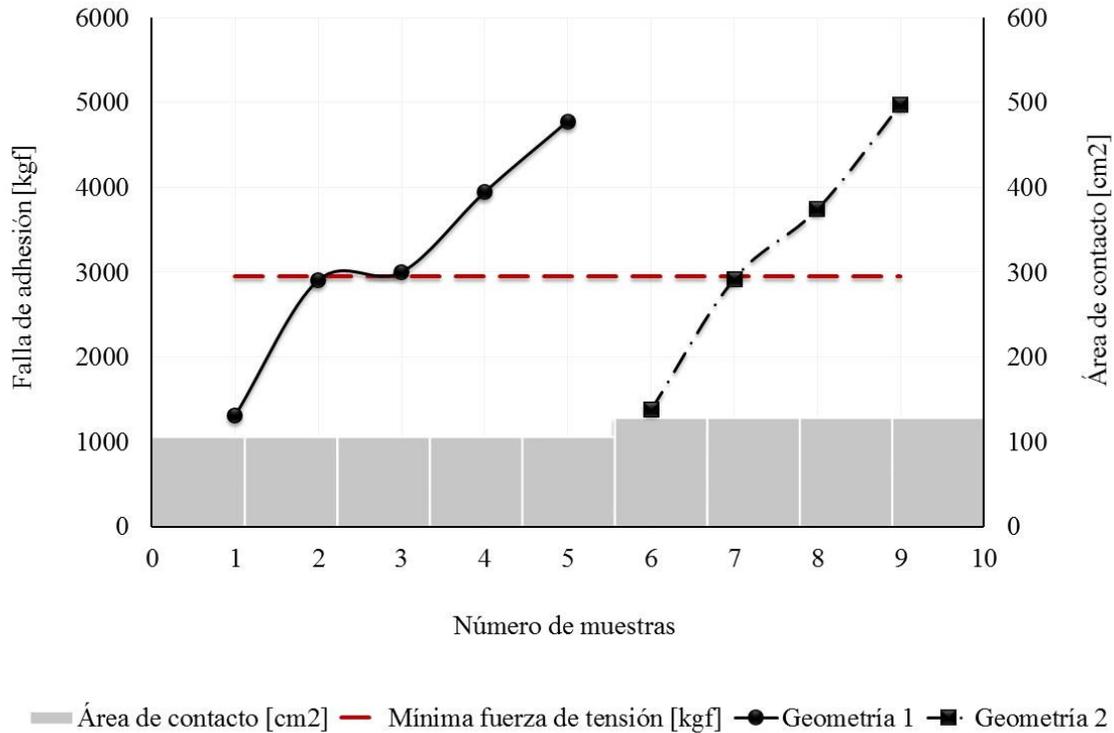


Figura 4.6.3–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2.

Tabla 4.6.3–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos de perfil de REFC y HN.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla	Figura No.
REFC	2	HN	1375.6	Adhesión	Figura 4.6.3–2(a)
			2921	Adhesión	
			3744	Adhesión	
			4979	Adhesión	
REFC	2	HN	1314	Adhesión	Figura 4.6.3–2(b)
			2907	Adhesión	
			3000	Equipo universal	
			3942	Sustrato (fractura del material de REFC)	
			4778	Sustrato (fractura del material de REFC)	

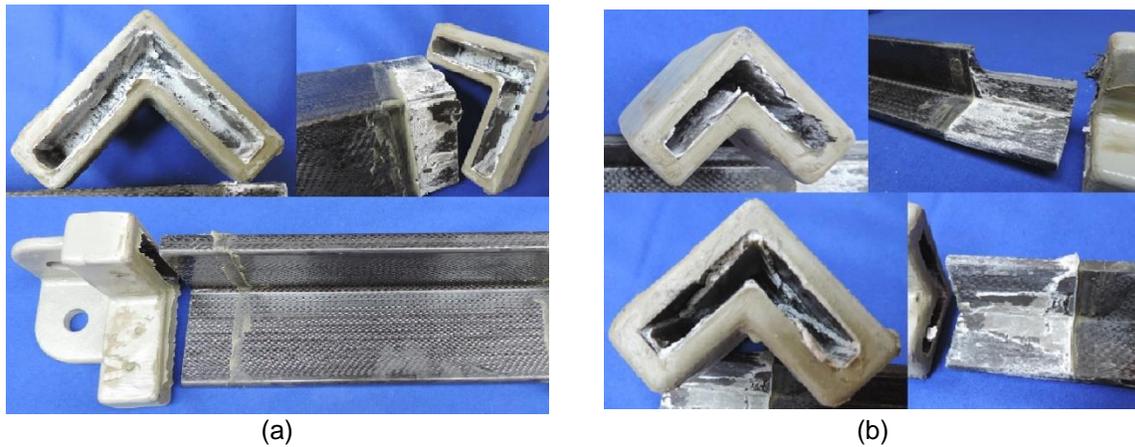


Figura 4.6.3-2. Sustratos al final de la evaluación.

Tabla 4.6.3-2. Tipo de fallo en la unión de los sustratos de perfil de REFV y HN.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla
REFV	4	HN	3598	Adhesión
			4203	Adhesión

4.6.4. Geometría angular de RVEFV

La Figura 4.6.4-1 ilustra el comportamiento de la falla en la junta adhesiva (líneas negras), obtenida mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil angular de material de RVEFV y fundición de HN, adheridos mediante un adhesivo estructural tipo 2. La línea discontinua (roja) representa la mínima fuerza de tensión requerida.

La Tabla 4.6.4-1 muestra las características del adhesivo utilizado en la unión de los sustratos, la fuerza de tensión máxima y el tipo de falla de acuerdo con las pruebas de laboratorio.

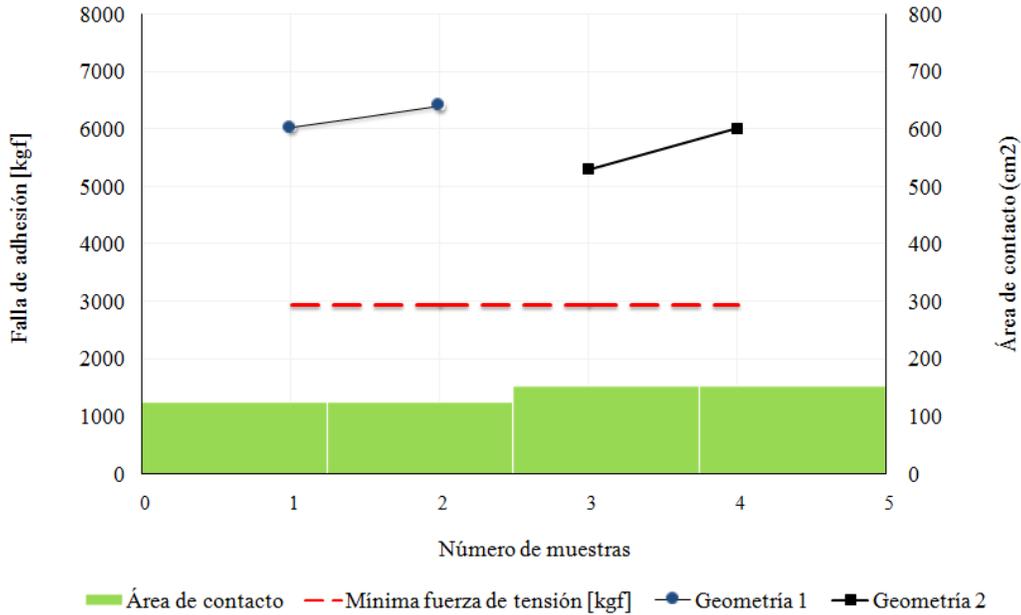


Figura 4.6.4-1. Fuerza de adhesión con adhesivo tipo 2 y área de contacto.

Tabla 4.6.4-1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos de perfil de RVEFV y HN.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla
RVEFV	2	HN	6034	Adhesión
RVEFV	2	HN	6417	Adhesión
RVEFV	2	HN	5300	Adhesión
RVEFV	2	HN	6011	Adhesión

La Figura 4.6.4-2 ilustra las condiciones típicas de los sustratos de perfil angular de material compuesto tipo RVEFV y los conectores angulares de fundición de HN al final de la evaluación en el laboratorio mecánico.



Figura 4.6.4–2. Sustratos al final de la evaluación.

4.6.5. Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR

La Figura 4.6.5–1 ilustra el comportamiento de la fuerza de adhesión (línea negra), obtenida mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil rectangular de material de PRFV y fundición de HN, adheridos mediante un adhesivo estructural tipo 2. Adicionalmente se refuerza el ensamble con PTR. La línea discontinua (roja) representa la mínima fuerza de tensión requerida.

La Tabla 4.6.5–1 muestra las características del adhesivo utilizado en la unión de los sustratos, la fuerza de tensión máxima y el tipo de falla de acuerdo con las pruebas de laboratorio.

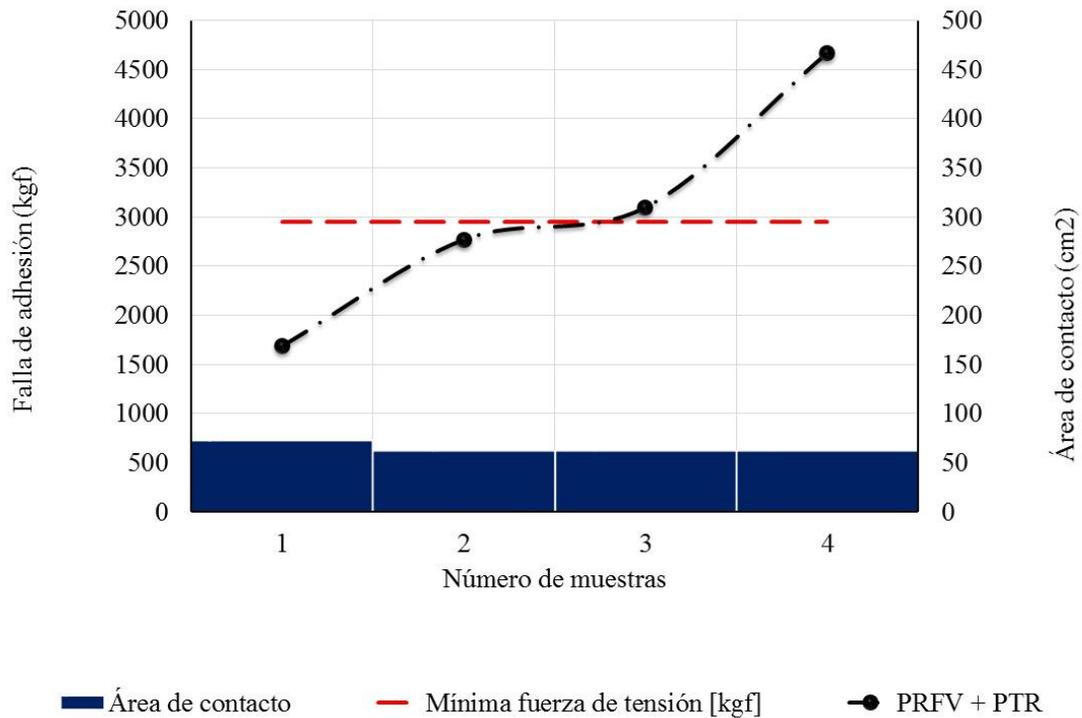


Figura 4.6.5-1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2.

Tabla 4.6.5-1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos híbridos.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla
PRFV+PTR	2	HN	1683	Sustrato (desgarre de material PRFV)
			2767	Adhesión
			3096	Sustrato (desgarre de material PRFV)
			4666	Sustrato (fractura de material PRFV)

La Figura 4.6.5-2 ilustra las condiciones típicas de los sustratos de perfil rectangular de material compuesto tipo PRFV y los conectores angulares de fundición de HN al final de la evaluación en el laboratorio mecánico.



Figura 4.6.5-2. Sustratos al final de la evaluación.

4.6.6. Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR + tornillos

La Figura 4.6.6-1 ilustra el comportamiento de la junta adhesiva (línea negra), obtenida mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil rectangular de material de PRFV y fundición de HN, adheridos mediante un adhesivo estructural tipo 2. Adicionalmente se refuerza el ensamble con PTR y tornillos. La línea discontinua (roja) representa la mínima fuerza de tensión requerida.

La Tabla 4.6.6-1 muestra las características del adhesivo utilizado en la unión de los sustratos, la fuerza de tensión máxima y el tipo de falla de acuerdo con las pruebas de laboratorio.

La Figura 4.6.6-2 ilustra las condiciones típicas de los sustratos de perfil rectangular de material compuesto tipo PRFV y los conectores angulares de fundición de HN al final de la evaluación en el laboratorio mecánico.

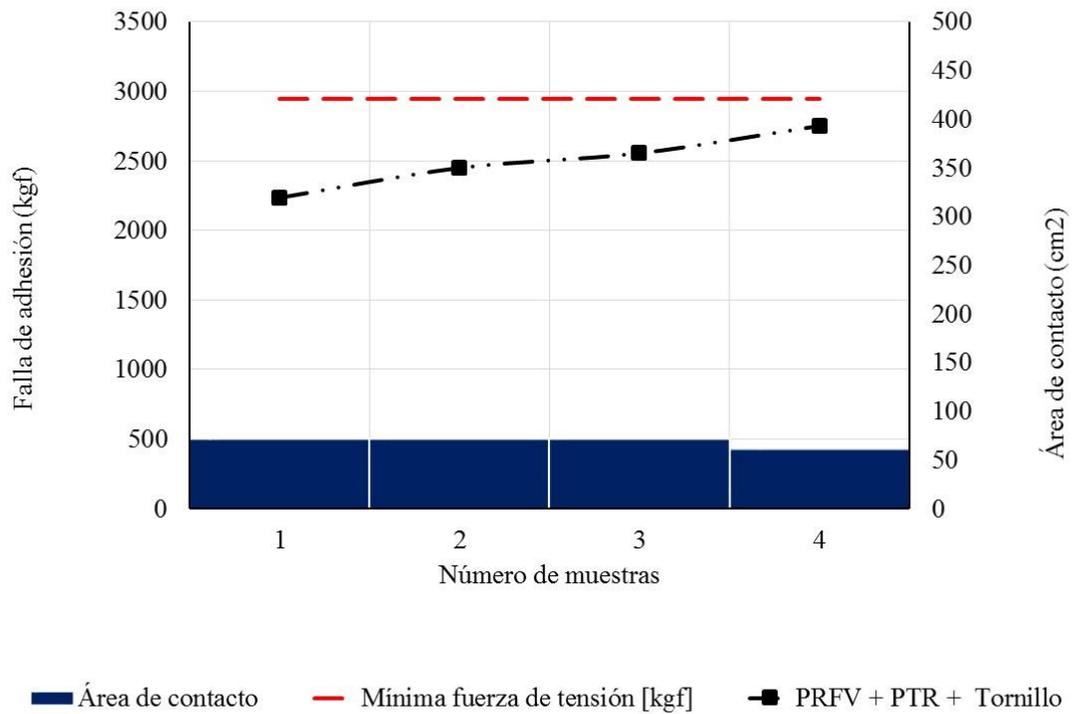


Figura 4.6.6–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2.

Tabla 4.6.6–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos híbridos.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla
PRFV+ PTR + Tornillo	2	HN	2237	Adhesión
			2450	Sustrato (desgarre de material PRFV)
			2556	Sustrato (desgarre de material PRFV)
			2751	Sustrato (desgarre de material PRFV)



Figura 4.6.6–2. Sustratos al final de la evaluación.

4.6.7. Geometría rectangular híbrida de PRFV + tornillos

La Figura 4.6.7–1 ilustra el comportamiento de la junta adhesiva (línea negra), obtenida mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil rectangular de material de PRFV y fundición de HN, adheridos mediante un adhesivo estructural tipo 2. Adicionalmente se refuerza el ensamble con tornillos. La línea discontinua (roja) representa la mínima fuerza de tensión requerida.

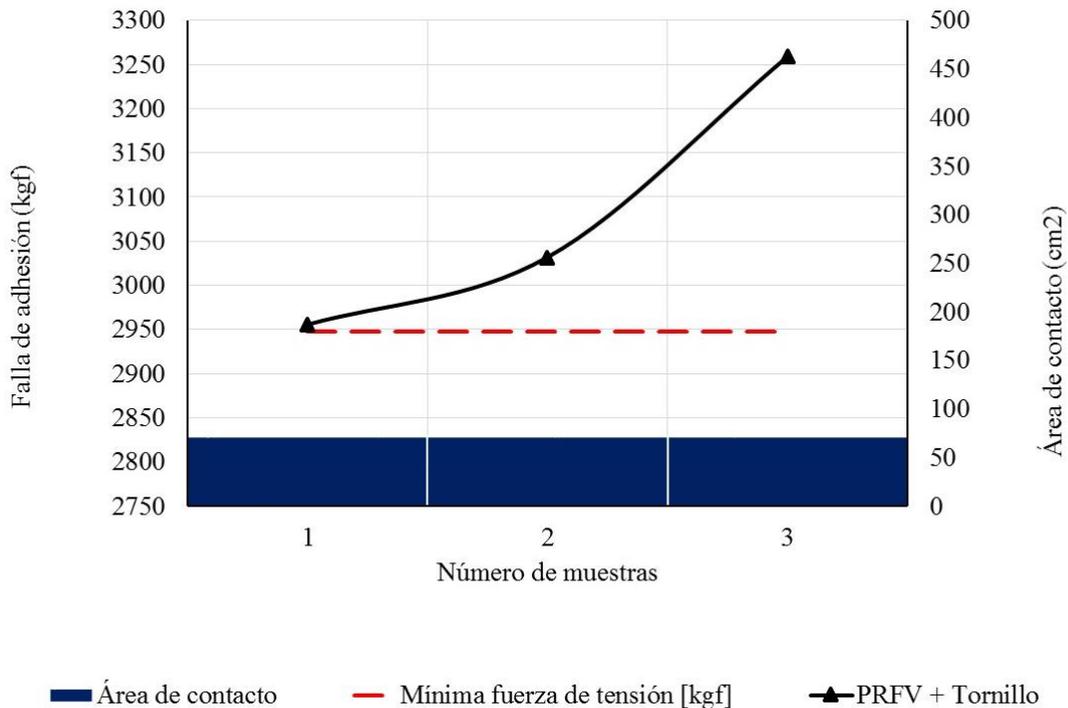


Figura 4.6.7–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2.

La Tabla 4.6.7–1 muestra las características del adhesivo utilizado en la unión de los sustratos, la fuerza de tensión máxima y el tipo de falla de acuerdo con las pruebas de laboratorio.

Tabla 4.6.7–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos híbridos.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla
PRFV+ Tornillo	2	HN	2955	Sustrato (desgarre de material PRFV)
			3031.6	Sustrato (desgarre de material PRFV)
			3259.66	Sustrato (desgarre de material PRFV)

La Figura 4.6.7–2 ilustra las condiciones típicas de los sustratos de perfil rectangular de material compuesto tipo PRFV y los conectores angulares de fundición de HN al final de la evaluación en el laboratorio mecánico.



Figura 4.6.7–2. Sustratos al final de la evaluación.

4.6.8. Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR + adhesivo 4

La Figura 4.6.8–1 ilustra el comportamiento de la junta adhesiva (línea discontinua negra), obtenida mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil rectangular de material de PRFV y perfil rectangular de fundición de HN, adheridos mediante un adhesivo estructural tipo 4. Adicionalmente se refuerza el ensamble con PTR. La línea discontinua roja representa la mínima fuerza de tensión requerida.

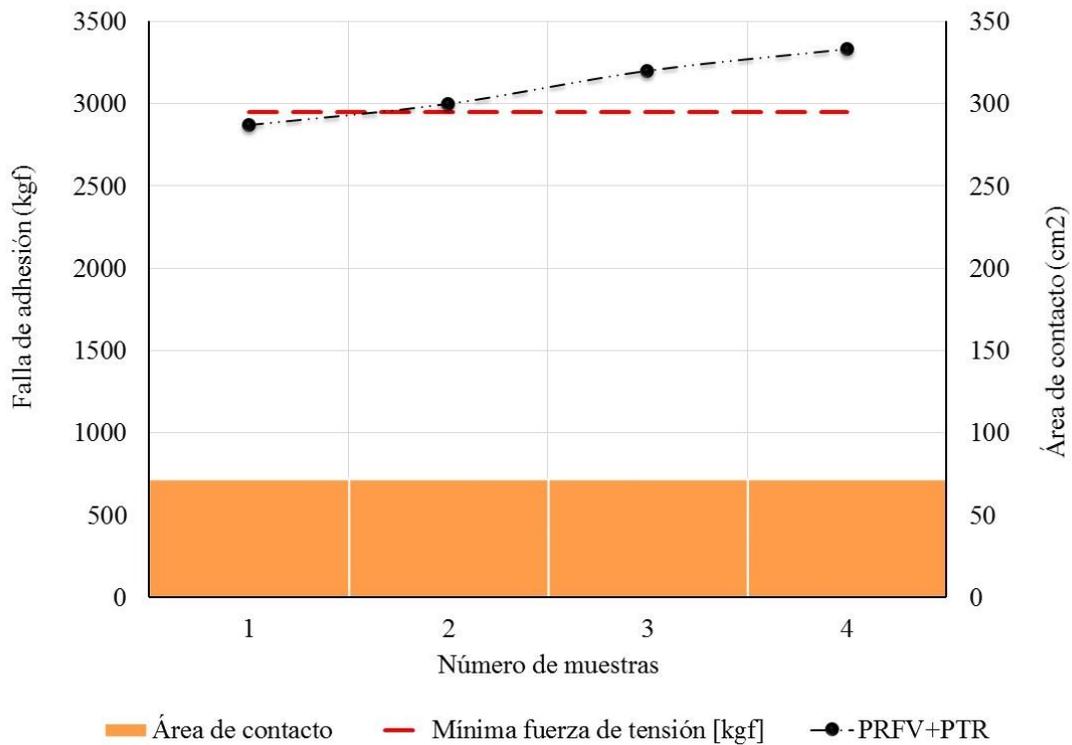


Figura 4.6.8-1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 4.

La Tabla 4.6.8-1 muestra las características del adhesivo utilizado en la unión de los sustratos, la fuerza de tensión máxima y el tipo de falla de acuerdo con las pruebas de laboratorio.

Tabla 4.6.8-1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos híbridos.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla
PRFV + PTR	4	HN	2873	Sustrato (fractura material PRFV)
			3001	Sustrato (fractura material PRFV)
			3200	Sustrato (fractura material PRFV)
			3330	Sustrato (fractura material PRFV)

4.6.9. Geometría rectangular híbrida de PRFV + PTR + tornillos + adhesivo 4

La Figura 4.6.9-1 ilustra el comportamiento de la junta adhesiva (línea discontinua negra), obtenida mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil

rectangular de material de PRFV y fundición de HN, adheridos mediante un adhesivo tipo 4. Adicionalmente se refuerza el ensamble con PTR + Tornillos. La línea discontinua roja representa la mínima fuerza de tensión requerida.

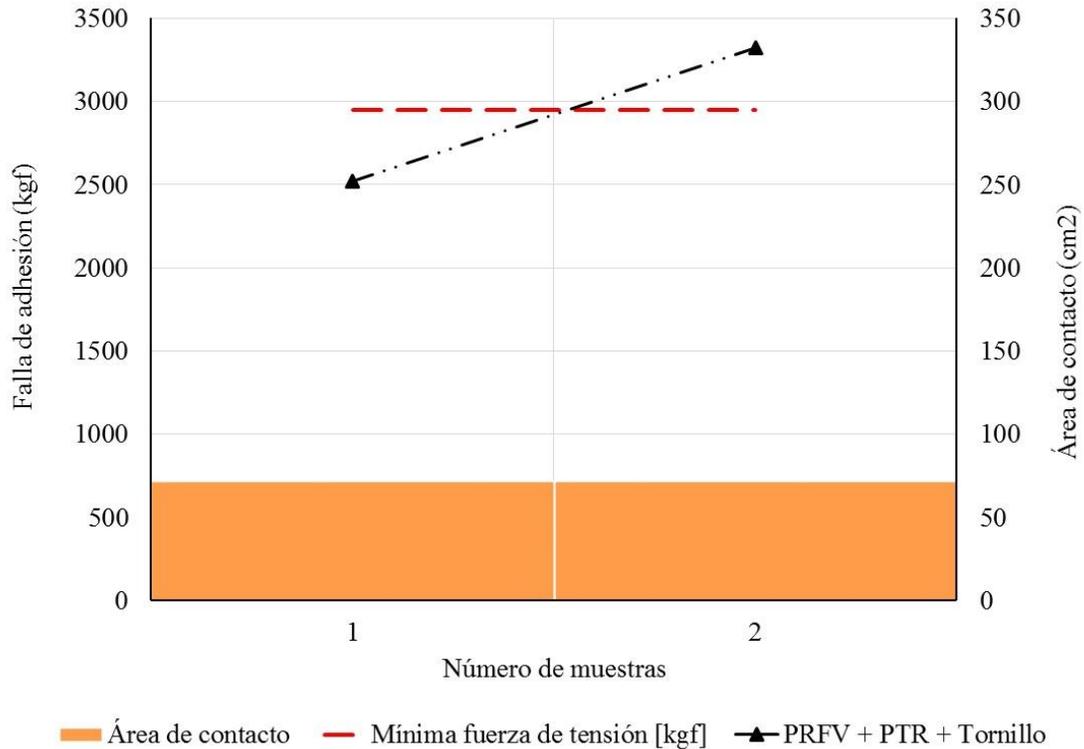


Figura 4.6.9-1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 4.

La Tabla 4.6.9-1 muestra las características del adhesivo utilizado en la unión de los sustratos, la fuerza de tensión máxima y el tipo de falla de acuerdo con las pruebas de laboratorio.

Tabla 4.6.9-1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos híbridos.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla
PRFV + PTR + Tornillo	4	HN	2521	Sustrato (desgarra material PRFV)
			3326	Sustrato (fractura material PRFV)

4.6.10. Geometría rectangular híbrida de PRFV + adhesivos 2 y 3

La Figura 4.6.10–1 ilustra en área gris el comportamiento de la junta adhesiva, obtenida mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil rectangular de material de PRFV y fundición de HN, de los cuales un conector fue adherido con adhesivo estructural tipo 2 y en el otro extremo con adhesivo tipo 3. El área verde representa la mínima fuerza de tensión requerida por el adhesivo.

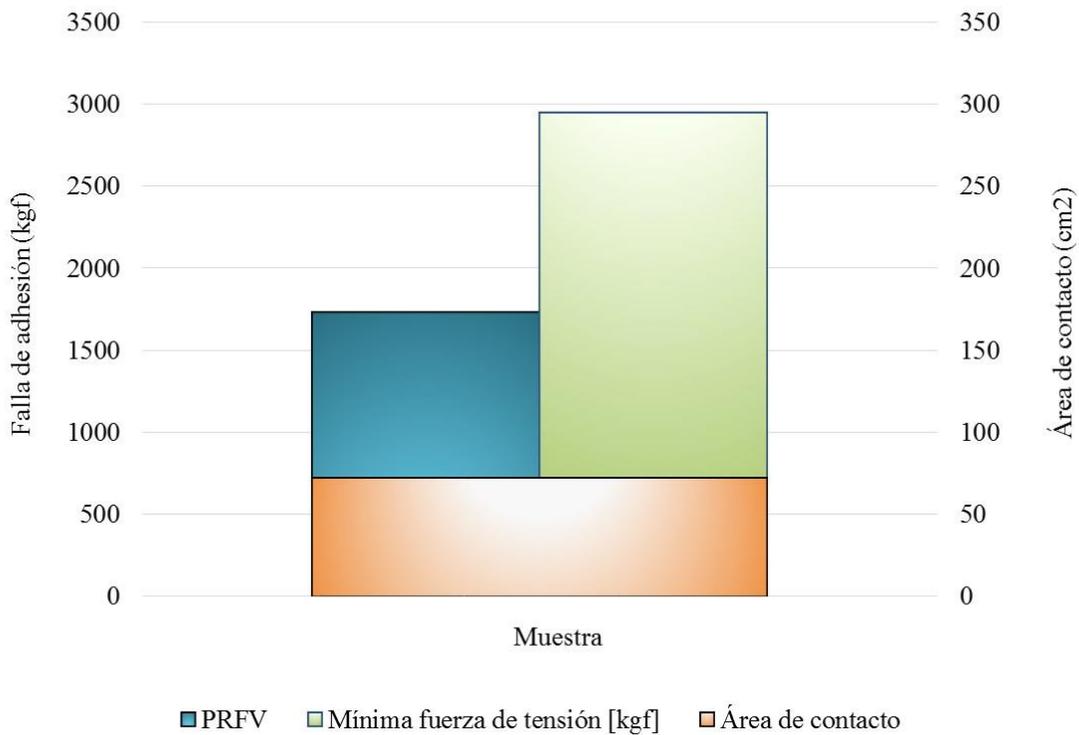


Figura 4.6.10–1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2 y 3.

La Tabla 4.6.10–1 muestra las características del adhesivo utilizado en la unión de los sustratos, la fuerza de tensión máxima y el tipo de falla de acuerdo con las pruebas de laboratorio.

Tabla 4.6.10–1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos híbridos.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla
PRFV	2 + 3	HN	1729	Adhesión

4.6.11. Geometría rectangular de PRFV + tornillos

La Figura 4.6.11–1 ilustra en área roja el comportamiento del material compuesto, obtenido mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil rectangular de material de PRFV y fundición de HN, por medio de tornillos. El área en azul representa la mínima fuerza de tensión requerida.

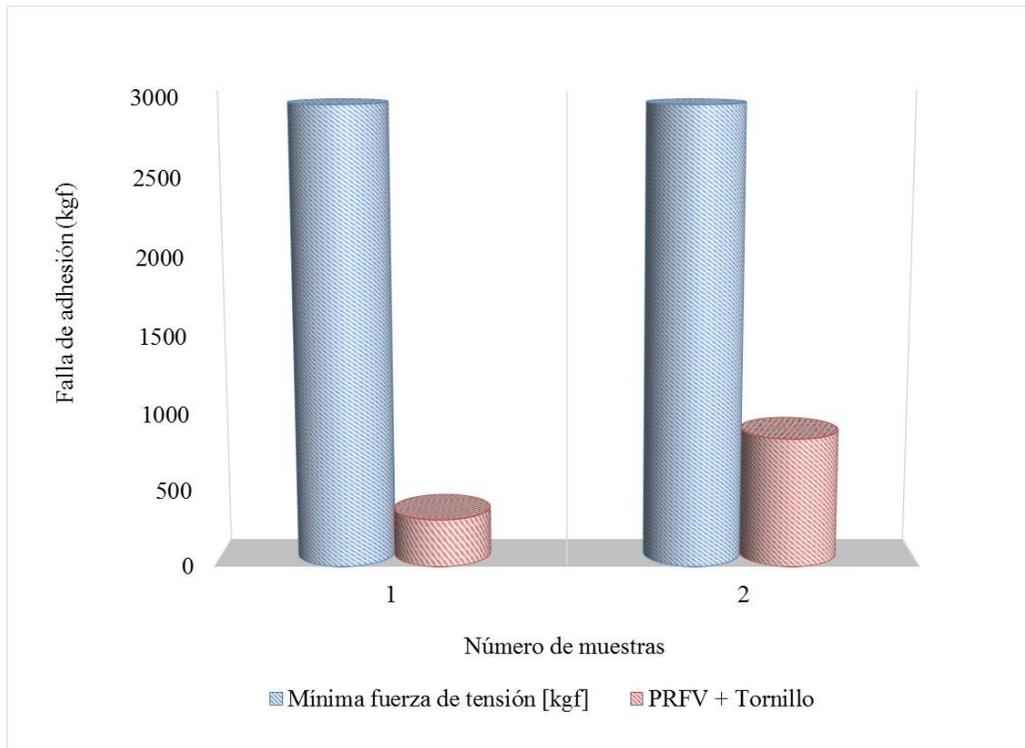


Figura 4.6.11–1. Mínima fuerza de tensión en materiales tipo PRFV con tornillo.

La Tabla 4.6.11–1 muestra la mínima fuerza de tensión obtenida por la unión de los sustratos a base de tornillos y el tipo de fallo de acuerdo con las pruebas de laboratorio.

Tabla 4.6.11–1. Mínima fuerza de tensión y tipo de fallo.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla
PRFV+ Tornillo	-	HN	309	Sustrato (desgarra material PRFV en conexión)
			838.35	Sustrato (fractura material PRFV en conexión)

La Figura 4.6.11–2 ilustra las condiciones típicas de los sustratos de perfil rectangular de material compuesto tipo PRFV y los conectores angulares de fundición de HN al final de la evaluación en el laboratorio mecánico.



Figura 4.6.11–2. Fractura del material de PRFV sujeta con tornillos.

4.6.12. Geometría angular híbrida de REFC + adhesivo tipo 2 + tornillos

La Figura 4.6.12–1 ilustra en área azul el comportamiento de la junta adhesiva, obtenida mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil angular de material de REFC y fundición de HN, adheridos mediante un adhesivo estructural tipo 2. Adicionalmente se refuerza el ensamble con tornillos. El área verde representa la mínima fuerza de tensión requerida.

La Tabla 4.6.12–1 muestra las características del adhesivo utilizado en la unión de los sustratos, la fuerza de tensión máxima y el tipo de falla de acuerdo con las pruebas de laboratorio.

La Figura 4.6.12–2 ilustra las condiciones típicas de los sustratos de perfil angular de material compuesto tipo REFC y los conectores angulares de fundición de HN al final de la evaluación en el laboratorio mecánico.

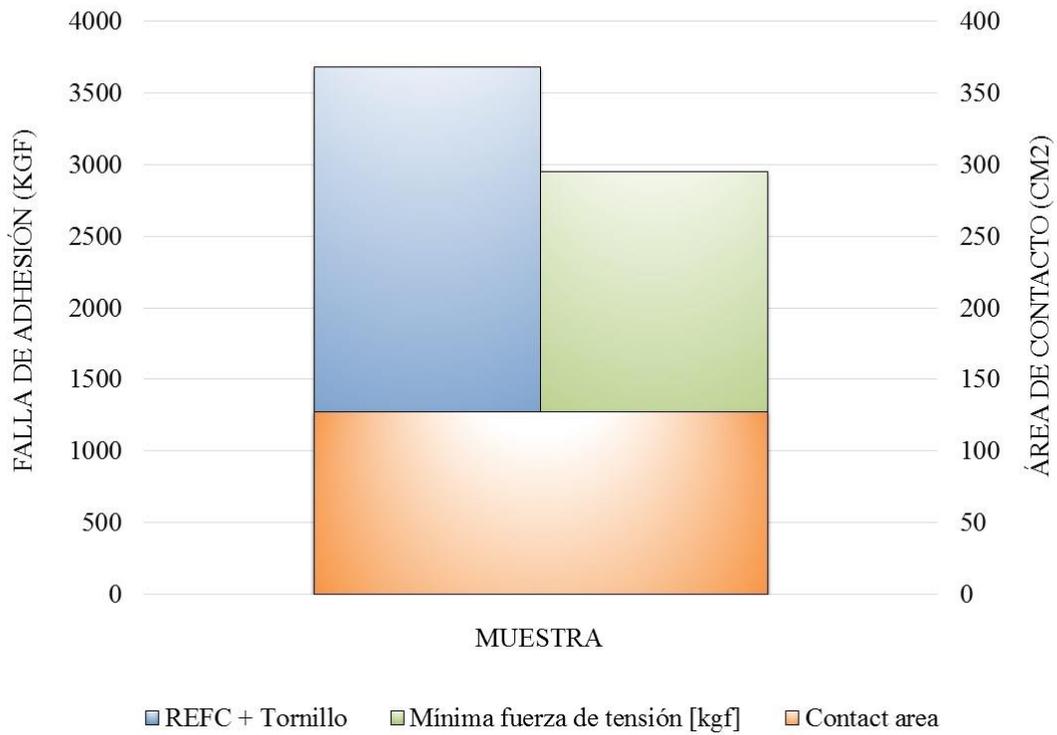


Figura 4.6.12-1. Fuerza de adhesión y área de contacto con adhesivo tipo 2 + tornillo.

Tabla 4.6.12-1. Tipo de fallo en la unión de los sustratos híbridos.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla
REFC + Tornillo	2	HN	3684	Desgarre del material de REFC

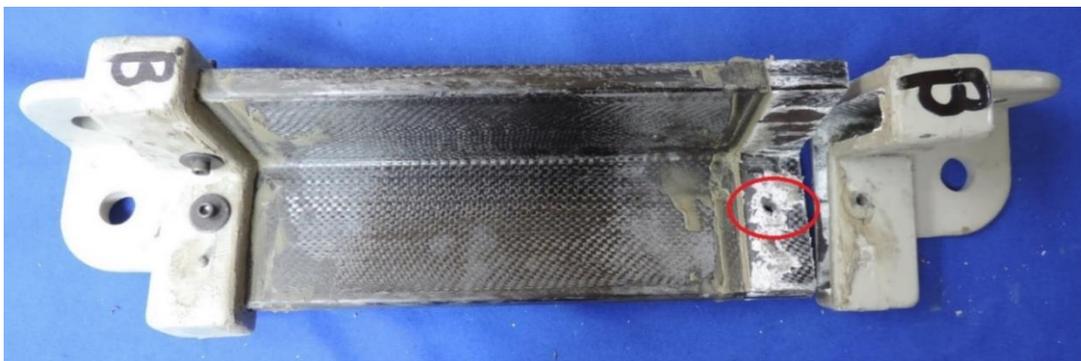


Figura 4.6.12-2. Sustratos al final de la evaluación.

4.6.13. Geometría angular híbrida de REFC + tornillo

La Figura 4.6.13–1 ilustra en área roja el comportamiento del material compuesto, obtenido mediante pruebas mecánicas de laboratorio entre sustratos de perfil rectangular de material de REFC y fundición de HN por medio de tornillos. El área en azul representa la mínima fuerza de tensión requerida.

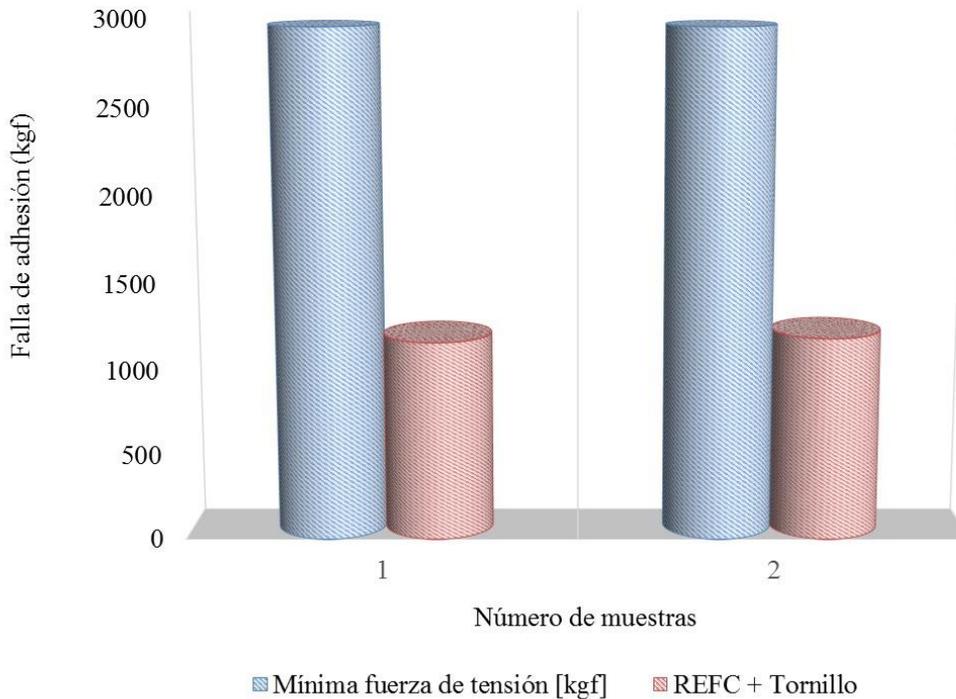


Figura 4.6.13–1. Mínima fuerza de tensión en materiales tipo PRFV con tornillo.

La Tabla 4.6.13–1 muestra la mínima fuerza de tensión obtenida por la unión de los sustratos a base de tornillos y el tipo de fallo de acuerdo con las pruebas de laboratorio.

Tabla 4.6.13–1. Mínima fuerza de tensión y tipo de fallo.

Sustrato 1	Adhesivo	Sustrato 2	Falla en la junta adhesiva (kgf)	Tipo de falla	Figura No.
REFC + Tornillo	-	HN	1160	Desgarre del material de REFC	Figura 4.6.13–2(a)
REFC + Tornillo	-	HN	1183	Desgarre del material de REFC	Figura 4.6.13–2(b)

La Figura 4.6.13–2 ilustra las condiciones típicas de los sustratos de perfil angular de material compuesto tipo PRFV y los conectores angulares de fundición de HN al final de la evaluación en el laboratorio mecánico.



(a)



(b)

Figura 4.6.13–2. Fractura del material de REFC sujeta con tornillos.

4.7. Conclusión del capítulo

Los resultados de la evaluación mecánica de laboratorio para los conectores, junta adhesiva y los perfiles de materiales compuesto, validan que las alternativas propuestas cumplen con los valores de resistencia mecánica requeridos para sustituir elementos de acero en el bottom panel de torres de transmisión de energía eléctrica.

En 7 de los 8 perfiles de las 4 alternativas de materiales compuestos poliméricos, el cumplimiento de la resistencia mecánica a la tensión, se logra utilizando el sistema de conexión con adhesivo estructural. Únicamente en el perfil tubular cuadrado de poliamida reforzada con fibra de vidrio es necesario utilizar adicionalmente un tornillo de acero de 3/16" grado 5 en cada uno de sus herrajes para cumplir con el requerimiento mecánico a la tensión.

La flexión que presentan las geometrías de los 4 materiales compuestos resisten los 125 kgf que solicita la norma ASCE 10 [7]. El sistema de conexión unido con los perfiles con

adhesivo acrílico supera la resistencia mecánica a la tensión determinada en el análisis estructural (2,948 kgf) para elementos redundantes en la zona de bottom panel de una torre de transmisión.

La distancia de flexión en los perfiles angulares de resina epoxi con fibra de carbono, barra redonda de resina epoxi con fibra de vidrio y angulares de resina vinil éster con fibra de vidrio es menor o igual a 12 cm. Esta distancia no se considera relevante para las actividades que realizan los linieros en las torres de transmisión.

En los perfiles tubulares cuadrados de poliamida reforzada con fibra de vidrio, las distancias de flexión fueron significativas (20 cm para tramos de 2 m de largo y 40 cm para tramos de 4 m de largo) y, en consecuencia, podrían representar un riesgo para los trabajos de los linieros. Por lo tanto, estos diseños se mejoraron con la inclusión de un alma de acero mediante la utilización de un PTR (Perfil Tubular Rectangular). De esta manera se redujo la distancia de flexión en 44% en el perfil para tramos de 2 m de largo y en 23% en el perfil para tramos de 4 m de largo. Las distancias de flexión resultantes fueron de 11.2 cm para tramos de 2 m de largo y de 30.8 cm para tramos de 4 m de largo. Para los tramos de 2 m la distancia de flexión se considera aceptable, pero para los tramos de 4 m se considera de alto riesgo. Por lo tanto, esta característica de flexión debe ser tomada en cuenta por los linieros cuando la torre tiene instalados perfiles de este material polimérico con longitudes de 4 metros.

CAPÍTULO V. Aplicación en campo

5.1. *Introducción*

En el siguiente capítulo, se describen los procedimientos utilizados durante el retiro de los elementos redundantes de acero, hasta la instalación de los elementos redundantes de material compuesto tipo polimérico de ingeniería. También se describen las características de las torres de las líneas de transmisión donde fueron instalados. Se muestra, cuál ha sido el impacto psicosocial de los elementos de material compuesto instalados. Por último, se realiza el estudio técnico y económico para los dos tipos de elementos redundantes de material compuesto que tuvieron el mejor desempeño en las pruebas de tensión y flexión en el laboratorio.

5.2. *Descripción de las torres de las líneas de transmisión*

Los perfiles de material compuesto tipo polimérico de ingeniería fueron instalados en 16 torres de transmisión de 400 kV de la Gerencia Regional de Transmisión Centro de la Comisión Federal de Electricidad. La Figura 5.3–1 ilustra la torre típica para cada una de las líneas de transmisión involucradas. En la Tabla 5.3–1 se muestra la línea de transmisión y el número de la torre utilizada para la sustitución de los elementos redundantes de acero por los de material compuesto.

5.3. *Procedimiento para el retiro de los elementos redundantes de acero de la torre*

Los elementos redundantes de acero a ser sustituidos por los elementos redundantes de material compuesto fueron retirados por los linieros de la CFE. Cada uno de los elementos fue identificado y retirado de forma ordenada de acuerdo con el procedimiento siguiente:



Línea de transmisión
Yautepec-A3640-Topilejo
-E102



Línea de transmisión
Temascal Dos-A3460-Puebla
Dos - E646



Línea de transmisión Ojo de
Agua Potencia-A3920-Puebla
Dos - E242

Figura 5.3–1. Torres típicas de las líneas de transmisión.

Tabla 5.3–1. Características de las torres de transmisión involucradas.

Línea de transmisión	No. de torre
Yautepec-A3640-Topilejo (YTP-A3640-TOP)	90
Yautepec-A3640-Topilejo (YTP-A3640-TOP)	98
Yautepec-A3640-Topilejo (YTP-A3640-TOP)	99
Yautepec-A3640-Topilejo (YTP-A3640-TOP)	100
Yautepec-A3640-Topilejo (YTP-A3640-TOP)	101
Yautepec-A3640-Topilejo (YTP-A3640-TOP)	102
Yautepec-A3640-Topilejo (YTP-A3640-TOP)	105
Yautepec-A3640-Topilejo (YTP-A3640-TOP)	106
Temascal Dos-A3460-Puebla Dos (TMD-A3460-PBD)	628
Temascal Dos-A3460-Puebla Dos (TMD-A3460-PBD)	641
Temascal Dos-A3460-Puebla Dos (TMD-A3460-PBD)	632
Temascal Dos-A3460-Puebla Dos (TMD-A3460-PBD)	642
Temascal Dos-A3460-Puebla Dos (TMD-A3460-PBD)	646
Temascal Dos-A3460-Puebla Dos (TMD-A3460-PBD)	648
Ojo de Agua Potencia-A3920-Puebla Dos (OJP-A3920-PBD)	242
Ojo de Agua Potencia-A3920-Puebla Dos (OJP-A3920-PBD)	243

- ✓ Se identificó la torre de la línea de transmisión seleccionada previamente para los trabajos de remplazo de elementos redundantes dentro de la zona del bottom panel.
- ✓ Se identificaron los posibles elementos redundantes de acero a ser sustituidos en la zona del bottom panel, esto es debido a que los materiales compuestos no pueden ser perforados, por lo tanto, el elemento a sustituir debe ser conectado únicamente en los extremos, es decir, sin ninguna conexión intermedia.
- ✓ Los elementos redundantes de acero fueron retirados por cada pata de la torre.
- ✓ Cada elemento retirado fue marcado con una identificación tomando en cuenta el número de la pata.
- ✓ Se midió la longitud de cada elemento redundante retirado.



Figura 5.3–2. Retiro de los elementos redundantes de acero de la torre.

5.4. Preparación y ensamble del sistema de conexión

Previo a la instalación, el personal del INEEL y el proveedor del adhesivo, capacitaron al personal de la CFE para la preparación de los materiales poliméricos de ingeniería y los conectores de hierro nodular, además del manejo y aplicación adecuada del adhesivo utilizado en el armado de los elementos redundantes de material compuesto. A continuación, se presentan dichos procedimientos.

5.4.1. Procedimiento para la preparación de los materiales poliméricos de ingeniería

Se recomienda que los materiales solventes como el alcohol o la acetona se mantengan bien cerrados y en un lugar fresco para evitar evaporación o daño a terceros. El procedimiento es el siguiente:

- ✓ Cortar los perfiles poliméricos de ingeniería de acuerdo con la longitud del perfil de acero retirado de la torre, tomando en cuenta la longitud total de los conectores.
- ✓ Marcar los perfiles de material compuesto con su equivalente de material de acero.
- ✓ Marcar el área de contacto y retiro de la capa de material protector contra los rayos ultra violeta del material compuesto.
- ✓ Desbastar con lija de forma superficial el material compuesto para generar cierta rugosidad.
- ✓ Limpiar el material compuesto con un paño impregnado con acetona o alcohol isopropílico.



Figura 5.4.1–1. Preparación de los materiales compuestos.

5.4.2. Procedimiento para la preparación de los conectores de hierro nodular

- ✓ Identificación del conector de geometría adecuada para el perfil requerido.
- ✓ Lijado de la cámara interior del cuerpo del conector para retirar las impurezas del material de fundición de hierro nodular.
- ✓ Limpieza de la cámara interior del cuerpo del conector con paño impregnado con acetona o alcohol isopropílico.



Figura 5.4.2–1. Preparación de los conectores de hierro nodular.

5.4.3. Procedimiento para la aplicación del adhesivo

El personal de la CFE fue capacitado para el manejo y aplicación adecuada del adhesivo utilizado en el armado de los elementos redundantes de material compuesto.

Aunque cada fabricante de adhesivos tiene un manual genérico de instrucciones para la aplicación del adhesivo, se recomienda utilizar el siguiente procedimiento específico para la aplicación del adhesivo utilizado en la unión del sistema de conexión y los elementos redundantes de material compuesto, ya que esto fue obtenido con la experiencia en el armado del sistema de conexión antes, durante y después de las pruebas de laboratorio. La Figura 5.4.3–1 ilustra la aplicación del adhesivo.

- ✓ El material adhesivo se debe transportar dentro de una bolsa de nailon y a su vez en el interior de una caja con hielos (hielera) con la finalidad de mantenerlos a una temperatura adecuada; es importante evitar el contacto del agua de hielo con el material adhesivo.
- ✓ El material adhesivo se debe extraer de la hielera unos minutos antes de su aplicación.
- ✓ Una vez preparados los conectores y el material compuesto; se debe montar el cartucho de adhesivo en la pistola.
- ✓ Ajustar el émbolo hasta presionar la tapa posterior móvil del cartucho de adhesivo.
- ✓ Destapar el cartucho de adhesivo y poner la punta mezcladora.

- ✓ Purgar la punta mezcladora activando la salida de adhesivo; detener el purgado hasta obtener a la salida una mezcla homogénea del material de resina y catalizador.
- ✓ Aplicar el adhesivo de forma homogénea en el fondo del interior de la cámara del cuerpo del conector hasta antes de cubrir los orificios dedicados para la inyección del adhesivo; la capa de adhesivo debe cubrir totalmente los vértices interiores, procurando evitar la formación de burbujas de aire o aire atrapado entre los vértices.
- ✓ Introducir el material polimérico de ingeniería preparado previamente dentro del conector de fundición de hierro nodular hasta el tope; se puede marcar el elemento polimérico a la profundidad que tiene la cámara interior del cuerpo del conector para su identificar cuando llegue al tope.
- ✓ Inyectar el adhesivo por los orificios del cuerpo del conector hasta observar la salida del material adhesivo por el cuello del ensamble.
- ✓ Poner los materiales sobre una superficie plana para evitar movimientos durante el tiempo de trabajo para la manipulación de los elementos, éste depende del fabricante del adhesivo y recomiendan entre 10 y 30 min.



Figura 5.4.3–1. Aplicación del adhesivo.

5.5. *Instalación de elementos redundantes de material polimérico de ingeniería*

La instalación se llevó a cabo con el apoyo del Ingeniero y los linieros de la CFE responsables de atender las líneas de transmisión consideradas para la instalación de los elementos redundantes de material compuesto tipos RVEFV, PRFV, REFC y REFV. Se instalaron 4 diferentes alternativas en un total de 16 torres de transmisión, instalando cada alternativa en 4 torres designadas por la CFE. Como se muestra en la Figura 5.5–1, cada perfil de material compuesto considera 2 tamaños de sección transversal; el perfil de menor sección sustituye los elementos de acero de hasta 2 m de longitud, mientras que el perfil de mayor sección sustituye los elementos de acero mayores que 2 m, pero menores que 4 m de largo.

La Figura 5.5–1 ilustra la instalación de los elementos redundantes de material compuesto en las torres designadas, de arriba hacia abajo, redundante de geometría circular, geometría rectangular y geometría angular.

La Tabla 5.5–1 muestra los elementos de material compuesto instalados en cada una de las 16 torres pertenecientes a las líneas de transmisión TMD-A3460-PBD, OJP-A3960-PBD y YTP-A3640-TOP indicadas en la Tabla 5.5–2, así como el número de elementos redundantes instalados para longitudes de elementos menores o iguales que 2 m, así como para longitudes de 2 a 4 m.

Tabla 5.5–1. Equivalencia entre materiales compuestos y de acero para remplazar en las torres de transmisión de la CFE.

Material	Sección transversal del perfil
Ángulo de resina epoxi con fibra de carbono (REFC)	Para sustituir elementos con longitud menor o igual a 2 m
	Para sustituir elementos con longitud mayor 2 m, pero menor a 4m
Barra circular de resina epoxi con fibra de vidrio (REFV)	Para sustituir elementos con longitud menor o igual a 2 m
	Para sustituir elementos con longitud mayor 2 m, pero menor a 4m
Tubo cuadrado de Poliamida reforzada con Fibra de Vidrio (PRFV)	Para sustituir elementos con longitud menor o igual a 2 m
	Para sustituir elementos con longitud mayor 2 m, pero menor a 4m
Ángulo de resina vinil éster con fibra de vidrio (RVEFV)	Para sustituir elementos con longitud menor o igual a 2 m
	Para sustituir elementos con longitud mayor 2 m, pero menor a 4m



Figura 5.5–1. Instalación de los perfiles en la torre.

Tabla 5.5–2. Número de elementos de material compuesto instalados por torre.

Torre	Línea de Transmisión	Material	Geometría	Longitud	No. de elementos instalados	
					Por tamaño	Total
90	YTP-A3640-TOP	RVEFV	Angular	2	4	20
		RVEFV	Angular	4	8	
		REFV	Circular	2	8	
98	YTP-A3640-TOP	REFV	Circular	2	8	20
		REFV	Circular	4	12	
99	YTP-A3640-TOP	REFV	Circular	2	12	20
		REFV	Circular	4	8	
100	YTP-A3640-TOP	REFV	Circular	2	10	26
		REFV	Circular	4	16	
101	YTP-A3640-TOP	REFV	Circular	2	8	24
		RVEFV	Angular	2	8	
		RVEFV	Angular	4	8	
102	YTP-A3640-TOP	RVEFV	Angular	2	8	24
		RVEFV	Angular	4	8	
		REFV	Circular	2	8	
105	YTP-A3640-TOP	RVEFV	Angular	2	20	28
		RVEFV	Angular	4	8	
106	YTP-A3640-TOP	RVEFV	Angular	2	8	24
		RVEFV	Angular	4	7	

Torre	Línea de Transmisión	Material	Geometría	Longitud	No. de elementos instalados	
					Por tamaño	Total
		REFV	Circular	2	8	
		REFV	Circular	4	1	
641	TMD-A3460-PBD	PRFV	Rectangular	2	24	32
		PRFV	Rectangular	4	8	
642	TMD-A3460-PBD	REFC	Angular	2	24	32
		REFC	Angular	4	8	
646	TMD-A3460-PBD	REFC	Angular	2	21	38
		REFC	Angular	4	9	
		PRFV	Rectangular	2	4	
		PRFV	Rectangular	4	4	
648	TMD-A3460-PBD	REFC	Angular	2	14	32
		REFC	Angular	4	8	
		PRFV	Rectangular	2	6	
		PRFV	Rectangular	4	4	
628	TMD-A3460-PBD	PRFV	Rectangular	4	24	32
		RVEFV	Angular	4	8	
632	TMD-A3460-PBD	PRFV	Rectangular	2	24	32
		REFC	Angular	4	8	
242	OJP-A3920-PBD	PRFV	Rectangular	2	24	32
		PRFV	Rectangular	4	8	
243	OJP-A3920-PBD	REFC	Angular	2	24	32
		REFC	Angular	4	8	



(a) Torre No. 642



(b) Torre No. 243

Figura 5.5-2. Perfiles instalados de RVFC.



(a) Torre No. 646



(b) Torre No. 648

Figura 5.5-3. Perfiles instalados de PRFV.



(a) Torre No. 98



(b) Torre No. 99

Figura 5.5-4. Perfiles instalados de RVEFV.



(a) Torre No. 100



(b) Torre No. 101

Figura 5.5-5. Perfiles instalados de RVEFV y REFV.



(a) Torre No. 641



(b) Torre No. 242

Figura 5.5-6. Perfiles instalados de PRFV.



(a) Torre No. 628



(b) Torre No. 632

Figura 5.5-7. Perfiles instalados de (a) PRFV y RVEFV, y (b) RVFC.



(a) Torre No. 105



(b) Torre No. 102

Figura 5.5-8. Perfiles instalados de (a) RVEFV y (b) RVEFV y REFV.



(a) Torre No. 106



(b) Torre No. 90

Figura 5.5–9. Perfiles instalados de (a) RVEFV y REFV, y (b) RVEFV y REFV.

5.6. Solución a dificultades de diseño

Durante la instalación de los elementos redundantes de material polimérico de ingeniería en las torres de transmisión de la CFE se tuvieron las siguientes dificultades, debido al diseño de los conectores.

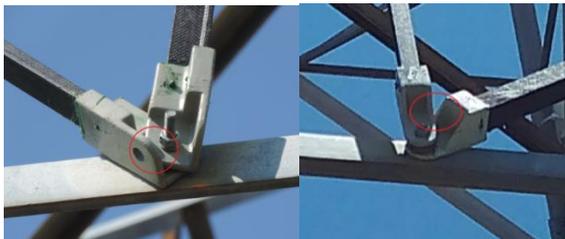
- ✓ Cuando se conecta un elemento de material compuesto a lo largo de otro material compuesto, no fue posible sustituir los elementos redundantes de acero, ya que, los materiales compuestos no pueden ser perforados porque la perforación reduce sus propiedades mecánicas. Por lo tanto, se debe diseñar un conector para estos casos. Un ejemplo de este caso se muestra en la Figura 5.6–1.
- ✓ La Figura 5.7–1 ilustra la problemática y solución de la conexión de dos perfiles que concurren en un mismo punto de conexión, cuando el elemento angular de acero principal o secundario está invertido. Por lo tanto, para su conexión se tuvo que adaptar un aumento mediante roldanas, cortar una cierta sección del cuerpo del herraje, hacer una perforación adyacente en el elemento de acero principal o secundario para conectarlos por separado o colocar en contracara los herrajes del perfil.



Figura 5.6–1. Elementos redundantes de acero no sustituidos en las torres.

5.7. Comportamiento actual

A once meses de la sustitución de los elementos redundantes de acero, no se ha informado de fallas mecánicas en los materiales compuestos, conectores mecánicos, o la junta adhesiva de los elementos redundantes instalados en las 16 torres de las líneas de transmisión. También, no se ha detectado daño por los rayos UV. Sin embargo, hasta esta fecha solo se han detectado daños por vandalismo en las torres 99 y 101 [50][51].



(a)



(b)

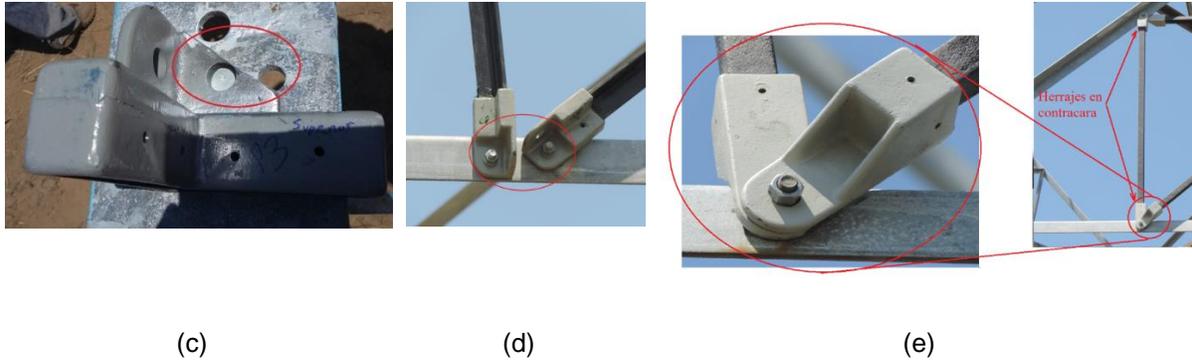


Figura 5.7-1. Conexión de 2 perfiles en un mismo punto de conexión.

En las torres 99 y 101 de la línea de transmisión YAUTEPEC POTENCIA-A3640-TOPILEJO se detectó la sustracción de elementos redundantes de acero y material polimérico de ingeniería tipos REFV y RVEFV ubicadas en la zona del bottom panel. La Figura 5.7-2 ilustra la torre 99 antes (a) y después (b) del robo de los elementos principales, secundarios y redundantes de los perfiles de geometría angular de acero y redundantes de geometría circular de material compuesto tipo REFV y su rehabilitación (c). En la Figura 5.7-3 se ilustra la torre 101 antes (a) y después (b) del robo de los elementos principales, secundarios y redundantes de los perfiles de geometría angular de acero y redundantes de geometría angular de material compuesto tipo RVEFV y su rehabilitación (c).

Para la torre 99, los elementos sustraídos en la zona del bottom panel fueron 16 elementos entre las 4 patas de la torre; mientras que los elementos compuestos tipo REFV sustraídos en la zona del bottom panel fueron 5 elementos entre las 4 patas de la torre, como se ilustra en las fotografías de la Figura 5.7-2.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.7–2. Torre 99 de la línea de transmisión YTP-A3640-TOP antes (a) y después (b) del robo de elementos y su rehabilitación (c).

En la zona del bottom panel de la torre 101, fueron sustraídos 15 elementos entre primarios y redundantes; de los cuales 14 elementos son de acero y están distribuidos entre las 4 patas de la torre; mientras que, un elemento redundante de material compuesto tipo RVEFV de una pata de la torre fue sustraído, como se ilustra en las fotografías de la Figura 5.7–3.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.7–3. Torre 101 de la línea de transmisión YTP-A3640-TOP antes (a) y después (b) del robo de elementos y su rehabilitación (c).

5.8. Impacto Psicosocial

Comparando el sistema de conexión con su equivalente de acero, desde el punto de vista de apreciación, se observa que los elementos redundantes de material compuesto son menos atractivos, debido al poco material metálico involucrado en sus extremos, como se observa en la Figura 5.8–1. Comparando el material del sistema de conexión y del perfil de acero, desde el punto de vista mecánico, se podría pensar que los elementos de material compuesto son menos resistentes a la acción de las fuerzas mecánicas, sin embargo; las pruebas de laboratorio demostraron que tienen la resistencia para funcionar como elementos redundantes. Por otra parte, un elemento de material compuesto es más robusto que su correspondiente de acero, debido a que son las dimensiones requeridas para obtener una equivalencia mecánica con el elemento de acero.

Debido a lo anterior, es importante destacar que la aceptación de los elementos redundantes de material compuesto tipo polimérico de ingeniería, sobrelleva a un impacto psicosocial en los ingenieros y linieros de la compañía suministradora de energía eléctrica, las personas dedicadas al robo de los elementos de acero y a la sociedad que

los rodea, como son los dueños de predios y personas que tienen campos de siembra colindantes con las estructuras de transmisión.



Figura 5.8–1. Comparación de elementos redundantes de material compuesto de RVFC y acero.

Para el ingeniero y los linieros representa un paradigma, ya que implica un cambio por la aceptación de los nuevos materiales involucrados, debiendo desprenderse de prejuicios sobre los materiales tradicionales. También implica un aprendizaje para conocer y entender el comportamiento mecánico y físico de los nuevos materiales involucrados. La entrada de los materiales también representa un cambio cultural de nuevos usos y costumbres; ya que involucra un esfuerzo adicional a lo acostumbrado, debido al volumen de trabajo involucrado; ya que no es solo cortar el material, perforarlo y conectarlo en la torre como se hace con los perfiles de acero; implica un poco más en la preparación de los nuevos materiales. Por último, un cambio social, ya que, la preparación de los materiales implica interactuar con otras personas del equipo de linieros e interactuar con los dueños de los predios.

Para las personas dedicadas al robo de los elementos de acero representa un cambio en su comportamiento, ya que esto implica la aceptación a los nuevos materiales que no pueden ser comercializados por los mercados de desechos industriales o chatarreras, perdiendo su valor monetario y de interés; lo que no sucede con los materiales de acero. Se tiene un aprendizaje para quienes extraen los elementos metálicos, ya que, si los nuevos materiales no tienen un valor comercial, entonces pueden ser utilizados en otras aplicaciones domésticas como es el caso de cercas para ganado. Representa también, un cambio cultural debido a que los materiales poliméricos no son comerciables, por lo que

se genera la cultura de no obtener un bien económico y por lo tanto carece de importancia robarlos. Implica un cambio en la forma de trabajar, ya que implica mayor esfuerzo remover los conectores para obtener el material de hierro nodular de los materiales poliméricos (someter los materiales a más de 300°), transportarse al lugar donde se ubican las torres y posteriormente llevar dos conectores al mercado de desechos industriales para su comercialización con poco valor monetario (menos kg de material), sin considerar el riesgo de ser atrapados por el personal de seguridad de la compañía; y social, ya que, los problemas generados por el robo de elementos principales, secundarios y redundantes ha generado el colapso de las torres de las líneas de transmisión, dejando sin energía eléctrica en algunos casos a miles de usuarios.

Como experiencia personal observada, una práctica común, es la quema de la hojarasca o hierba seca de cultivo o hierba silvestre, la cual es realizada *in situ*; esto es, en el lugar donde crece, y puede ser debajo de la torre o en el derecho de vía de la línea de transmisión. La quema de estos materiales orgánicos, podría afectar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos instalados en la torre, debido a la exposición directa con las llamas de los materiales en combustión. En este aspecto, los dueños de los predios o parcelas tendrán que ser instruidos para evitar el daño a los materiales compuestos instalados.

5.9. Estudio técnico y económico

5.9.1. Estudio técnico

Se demostró técnicamente que es factible sustituir los elementos redundantes de acero por elementos redundantes de material compuesto tipo polimérico de ingeniería en la zona del bottom panel de las torres de transmisión de energía eléctrica existentes; esto se logró mediante pruebas mecánicas de laboratorio y simulaciones realizadas por el método de elemento finito asistido por computadora, mediante Software comercial. La gráfica de la Figura 5.9.2–3, muestra los valores máximos de la flexión y tensión obtenidos con las pruebas de laboratorio mecánico para los 4 materiales compuestos seleccionados (REFC, REFV, PRFV, RVEFV).

Correspondiente con la parte experimental, la construcción completa de las torres en Estados Unidos, China e India han demostrado que los materiales compuestos tienen la resistencia y durabilidad para enfrentar las condiciones ambientales donde se han instalado.

La Figura 5.9.1–1 ilustra las partes principales del extremo de un elemento redundante de material compuesto tipo RVEFV.

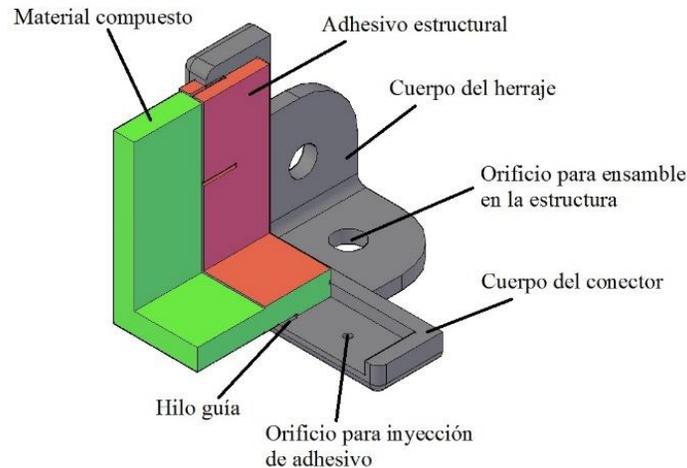


Figura 5.9.1–1. Partes que integran un elemento redundante de material compuesto tipo RVEFV.

5.9.2. Estudio Económico

El siguiente estudio económico considera únicamente el costo de los materiales que integran los elementos redundantes de material compuesto para ser instaladas en la zona del bottom panel de las torres existentes. No incluye el costo de la mano de obra del personal, el traslado de los materiales al lugar de la instalación, ni las herramientas y solventes necesarios para el corte y limpieza de los materiales empleados; debido a que estas actividades y materiales ya son parte integral del quehacer de la empresa suministradora de energía, y la mano de obra del personal empleado también es parte del proceso económico de la empresa.

Se realizó el estudio económico para los elementos redundantes de material compuesto tipo polimérico de ingeniería ubicados en la zona del bottom panel de una torre de transmisión de 400 kV. La gráfica de la Figura 5.9.2–3, muestra los valores máximos de la prueba de tensión y flexión obtenidos con las pruebas de laboratorio y el costo en pesos por perfil de material de 1.7 ó 3.5 m, los cuales incluyen dos conectores. Para el estudio económico se tomaron en cuenta solo los elementos redundantes de material compuesto circular y angular de REFV y RVEFV respectivamente, debido a los excelentes resultados de las pruebas de tensión y flexión de laboratorio, estos elementos redundantes se muestra en la Figura 5.9.2–1 y Figura 5.9.2–2.



(a)

(b)

Figura 5.9.2-1. Elemento redundante de material compuesto tipo REFV.



(a)

(b)

Figura 5.9.2-2. Elemento redundante de material compuesto tipo RVEFV.

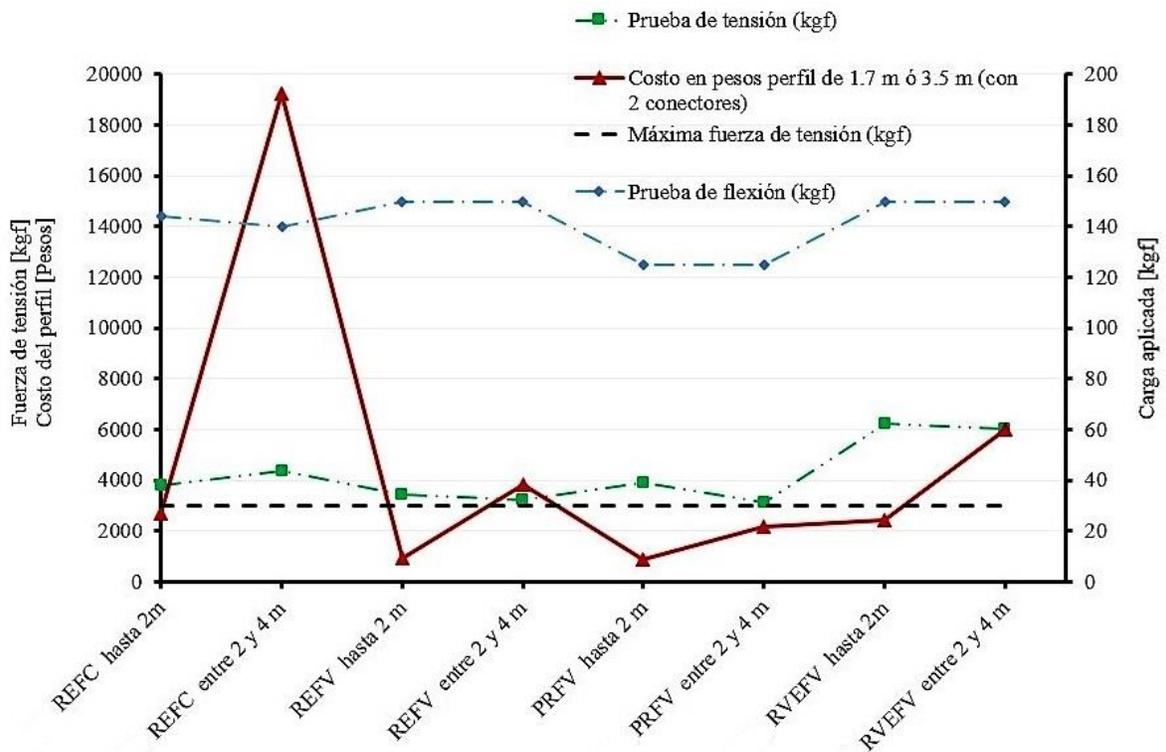


Figura 5.9.2-3. Relación costo – pruebas de laboratorio.

Los cálculos fueron realizados en pesos mexicanos y dólares americanos, el tipo de cambio utilizado en los cálculos es de MXN\$ 21.00 por dólar USD, correspondientes al 20

de junio de 2017. La Tabla 5.9.2–1 muestra el número de elementos redundantes requeridos por torre, los cuales son obtenidos de un número de perfiles con determinada longitud cada uno, y el costo por perfil considerado.

La Tabla 5.9.2–2 muestra el número total de conectores de fundición de hierro nodular considerando dos conectores por cada uno de los elementos redundantes; una placa modelo para cada geometría requerida en la fabricación de los conectores. También se muestra el costo por conector y por modelo de placa en moneda nacional.

Tabla 5.9.2–1. Características de los materiales compuestos tipo poliméricos de ingeniería.

Material compuesto	Para sustituir perfil de acero de hasta	Longitud x perfil	Número de perfiles x torre	Número de elementos redundantes x torre	Costo del perfil (USD)
		(1)	(2)	(3)	(4)
Barra circular de REFV	2 m de longitud	4 m	38	76	44.5
	4 m de longitud	4m	28	28	168.5
Ángulo de RVEFV	2 m de longitud	6 m	25	76	335.6
	4 m de longitud	6 m	19	28	485.8

Tabla 5.9.2–2. Características de los conectores de fundición de hierro nodular.

Material compuesto	Para sustituir perfil de acero de hasta	Número de conectores	Modelo de placa	Costo x conector (MXN)	Costo x modelo de placa (MXN)
		(5)=(3)*2	(6)	(7)	(8)
Barra circular de REFV	2 m de longitud	152	1	214.6	8,500
	4 m de longitud	56	1	348	8,500
Ángulo de RVEFV	2 m de longitud	152	1	261	5,900
	4 m de longitud	56	1	348	5,900

La Tabla 5.9.2–3 muestra los costos de los adhesivos y los perfiles, también se calcula el costo del adhesivo por el número de elementos redundantes por torre, así como el costo de los perfiles más el adhesivo utilizado y el costo total de los conectores.

La Tabla 5.9.2–4 muestra el costo total de los elementos redundantes de material compuesto para las geometrías de perfil circular de resina epoxi con fibra de vidrio (REFV) y perfil angular de resina vinil éster con fibra de vidrio (RVEFV) por torre de la línea de transmisión.

Tabla 5.9.2–3. Costos de los materiales.

Material compuesto	Para sustituir perfil de acero de hasta	Costo del adhesivo x perfil (USD)	Costo x perfil (USD)	Costo adhesivo x No. de elementos redundantes x torre (USD)	Costo x perfil más Costo adhesivo x No. de elementos redundantes x torre (USD)	Costo de los conectores (MXN)
		(9)	(10)	(11)=(9)*(3)	(12)=(10)+(11)	(13)=(3)*(7)*2
Barra circular de REFV	2 m de longitud	7	1,691	532	2,223	32,619
	4 m de longitud	7	4,718	196	4,914	19,488
Ángulo de RVEFV	2 m de longitud	7	8,388.6	532	8,921	39,672
	4 m de longitud	7	9,229.5	196	9,425	19,488

Los elementos principales, secundarios y redundantes robados por torre son aproximadamente 21 piezas, las cuales se estiman tienen un peso aproximado de 500 kg. Considerando que el costo de acero estructural instalado es de MXN\$ 112.00 por kg, el cual considera el material y la mano de obra; entonces, el costo de los materiales robados por torre es de MXN\$ 56,000.00. Esto significa que si una torre es robada 7 veces los elementos redundantes de material compuesto son amortizados. El costo del acero estructural no incluye gastos por desgaste vehicular, equipo de corte, bomba y pintura para la preparación de los materiales compuestos. Tampoco se consideran los gastos por la energía eléctrica no suministrada debido a la caída de la torre.

Tabla 5.9.2–4. Costo total por torre.

Material compuesto	Perfil circular de REFV	Perfil angular de RVEFV
Envío (MXN\$)	6,514	-
Costo de las piezas más adhesivo (MXN\$)	7,137	18,346
Costo conectores (MXN\$)	4,181.3	4,269.6
Costo total x torre (USD\$)	17,832	22,616
Costo total x torre (MXN\$)	374,479	474,926

*USD \$ 1 = MXN \$ 21.0, correspondientes al 20 de junio de 2017

5.10. Conclusión del capítulo

El sistema de conexión fue instalado en 8 torres de la LT Yautepec-A3640-Topilejo (YTP-A3640-TOP), en 6 torres de la LT Temascal Dos-A3460-Puebla Dos (TMD-A3460-PBD) y 2 torres de la LT Ojo de Agua Potencia-A3920-Puebla Dos (YTP-A3640-TOP) de las líneas de transmisión de 400 kV de la GRT Central de CFE.

Es necesario realizar la revisión del diseño de la geometría de los conectores finales de fundición de hierro nodular para mejorar la conexión cuando dos elementos coinciden en un mismo punto; ya sea, con otros elementos metálicos de la torre o con otro conector de fundición de hierro nodular.

Es necesario diseñar conectores tipo "T" para el acoplamiento de elementos redundantes de material compuesto sobre el cuerpo de otro elemento redundante de material polimérico de ingeniería sin tener que perforarlo, con la finalidad de que éste no disminuya sus propiedades mecánicas.

Los hechos recientes, respecto al robo de elementos de material compuesto y de acero de las torres 99 y 101, demuestran que los materiales redundantes de material compuesto no son de interés para las personas dedicadas al robo, ya que en ambas torres dejaron la mayoría de los elementos redundantes tipo polimérico de ingeniería, llevándose en su totalidad los elementos angulares de acero.

El costo inicial por la sustitución de los elementos redundantes de material compuesto puede ser elevado, sin embargo, la inversión se recupera debido a que ya no son removidos de las torres.

CAPÍTULO VI. Conclusiones y trabajos futuros

6.1. Introducción

En el siguiente capítulo, se describen las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

6.2. Conclusiones

El robo de elementos principales, secundarios y redundantes de las torres de las líneas de transmisión a nivel mundial es un fenómeno creciente y serio que repercute en la confiabilidad del suministro de energía eléctrica. Es verdaderamente impresionante la cantidad en toneladas de perfil angular de acero que se repone a lo largo del año y las pérdidas de continuidad en el suministro de energía eléctrica a los miles de usuarios involucrados.

Los resultados de las pruebas mecánicas demuestran que el grado de limpieza en los sustratos juega un papel importante para obtener la máxima fuerza de adhesión; sin embargo, las pruebas mecánicas también demostraron que, si los sustratos se limpian a grados exagerados, quitando la rugosidad de los mismos, se garantiza que habrá una falla en la junta adhesiva, comparada con el área de contacto menor y un grado de limpieza conservador que mantenga en los sustratos la rugosidad normal.

Los sustratos que fueron ensamblados con dos adhesivos diferentes presentaron una mínima fuerza de tensión en las pruebas de laboratorio. Esta prueba fue descartada debido a que no es técnicamente solvente; ya que se requiere de tener un solo adhesivo, para hacer eficiente el ensamble de los materiales y los conectores.

Las pruebas mecánicas de laboratorio demostraron que los materiales compuestos ensamblados únicamente con tornillos desgarran el material en el orificio de conexión con una mínima fuerza de tensión, fracturando el material compuesto.

De acuerdo con las simulaciones en computadora y las pruebas de laboratorio, se puede concluir, que el uso de adhesivo estructural junto con los sustratos de los conectores de fundición de hierro nodular y materiales compuestos tipo polimérico de ingeniería pueden ser una alternativa viable para utilizarse como un sistema integral de elemento redundante, para sustituir los elementos redundantes de acero de las torres de transmisión de energía eléctrica en la zona del bottom panel.

Con el desarrollo del presente trabajo de tesis se cumplieron los objetivos específicos considerados:

- a) Se simuló, diseñó, validó y fabricó un sistema de conexión que involucró conectores de fundición de hierro nodular, una junta adhesiva y un perfil de material compuesto tipo polimérico de ingeniería, obteniendo resultados favorables de esfuerzos de tensión, muy similares a los proporcionados por los perfiles angulares de acero utilizados en las torres de las líneas de transmisión.
- b) El sistema de conexión fabricado para los elementos redundantes de material compuesto tipo polimérico de ingeniería, sustituyó a los perfiles angulares de acero existentes en la zona del bottom panel y cerramiento de 16 torres, distribuidas en tres líneas de transmisión de 400 kV, seleccionadas por la CFE.
- c) Se dio seguimiento al sistema de conexión instalado en la zona del bottom panel y cerramiento de las 16 torres de las líneas de transmisión de 230 y 400 kV, demostrando que este método de conexión no es atractivo para su comercialización en chatarrerías y talleres metalúrgicos, debido a su bajo contenido de material metálico, resultando menos atractivo al robo.

6.3. Trabajos futuros

Conector tipo “T”

Durante la conexión de los elementos redundantes de material compuesto tipo polimérico de ingeniería en la zona del bottom panel de las torres de transmisión de la CFE, se requirió de un sistema de conexión para los elementos redundantes que se conectan en un punto intermedio con otro elemento redundante. Por esta razón es necesario diseñar, simular, fabricar y validar mediante pruebas de laboratorio un conector tipo “T” para los perfiles instalados.

Sistema de conexión –Cuerpo del herraje–

Rediseñar el cuerpo del herraje de los conectores finales de fundición de hierro nodular para mejorar la conexión cuando dos elementos coinciden en un mismo punto.

Intemperismo

Debido a que el sistema de conexión instalado en las torres de la CFE se encuentra en contacto con las condiciones climatológicas, es necesario realizar un estudio de intemperismo para determinar el comportamiento del sistema de conexión con la finalidad

de mejorarlo. También es importante realizar la huella de carbono para determinar el impacto ambiental de emisiones de gases de efecto invernadero, tomando en cuenta las normativas internacionales como ISO 14064, ISO 067 e ISO 14069, entre otras.

Adhesivo

Realizar una búsqueda y en su caso probar en laboratorio nuevos materiales adhesivos que cumplan con las necesidades mecánicas de los elementos redundantes, con la finalidad de reducir el tiempo de trabajo (tiempo necesario para mover los sustratos adheridos).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ramiro Hernández, Javier E. Salgado. (2013). "Análisis para la sustitución de elementos metálicos en torres de transmisión por materiales compuestos tipo polimérico de ingeniería, para evitar el robo de los componentes metálicos de las estructuras-análisis estructural, Reporte IIE/03/35/14435/RP-02/2013.
- [2] ASTM (American Society for Testing and Materials). (2001). "Standard Specification for high-strength low-alloy columbium-vanadium structural steel". ASTM A572/A572M.
- [3] ASTM (American Society for Testing and Materials). (2001). "Specification for carbon structural Steel". ASTM A36/A 36M.
- [4] NMX (Norma Mexicana). (2008). "Industria siderúrgica - Productos de hierro y acero recubiertos con cinc (galvanizados por inmersión en caliente) – especificaciones y métodos de prueba". NMX-H-004-SCFI.
- [5] ASTM (American Society for Testing and Materials). (2012). "Standard specification for zinc (hot-dip galvanized) coatings on iron and Steel products". ASTM A123/A123M.
- [6] ASTM (American Society for Testing and Materials). (2009). "Standard Specification for Zinc Coating (Hot-Dip) on Iron and Steel Hardware". ASTM A153/A153M.
- [7] ASCE (American Society of Civil Engineers). (2000). "Design of Latticed Steel Transmission Structures." ASCE 10-97. Reston, Virginia.
- [8] CFE (Comisión Federal de Electricidad). (2011). "Torres para líneas de subtransmisión y transmisión". CFE-J1000-50. México.
- [9] ASTM (American Society for Testing and Materials). "Standard specification for steel transmission tower bolts, zinc-coated and bare". ASTM A394.
- [10] ANSI B18.1.1 "Small solid rivets 7/16 inch nominal diameter and smaller".
- [11] ANSI B18.2.1 "Square and hex bolts and screws inch series".
- [12] ANSI B1.1 "Crew threads (roscas para tornillo)".
- [13] ANSI B.1.13M "Metric screw threads (roscas para tornillos métricos)".
- [14] ASTM A563 "Standard Specification for Carbons and Alloy Steel Nuts".
- [15] ASME (The American Society of Mechanical Engineers). (2009) "Washers: Helical Spring-Lock, Tooth Lock, and Plain Washers (Inch Series)". ASME B18.21.1.
- [16] ANSI B18.22.2 "Plain washers (arandelas planas)".
- [17] ASCE 52; "Guide for design of steel transmission towers"- 2a. Edition.
- [18] Aleida Plasencia. (9 de abril, 2012). "Robo piezas torres dejan pérdidas RD\$28 MM". Hoy Digital. <http://hoy.com.do/robo-piezas-torres-dejan-perdidas-rd28-mm/>

- [19] El nuevo diario. (18 de junio, 2012). "Robos en torres eléctricas suman US\$ 2 millones". Managua, Nicaragua. <http://www.elnuevodiario.com.ni/nacionales/255017-robos-torres-electricas-suman-us-2-millones/>
- [20] Humberto Galo R. (2012). "Robo en torres de transmisión aumenta", La Prensa/Nacionales (versión digital). 08/06/2012. Nicaragua. <http://www.laprensa.com.ni/2012/06/08/nacionales/104291-robo-en-torres-de-transmision-aumenta>
- [21] Roberto Morales. (27 de mayo, 2010). "Colapsan cinco torres de energía". Managua, Nicaragua. <http://www.laprensa.com.ni/2010/05/27/nacionales/25855-colapsan-cinco-torres-de-energia-2>
- [22] El Litoral. (7 de noviembre, 2009). "EPE: faltan tensores en la torre de alta tensión". El Litoral. http://www.ellitoral.com/index.php/id_um/46577-epe-faltan-tensores-en-la-torre-de-alta-tension
- [23] José Carlos Farfán Clindres. (2013). "Desarrollo del proyecto SIEPAC" (Sistema de Interconexión Eléctrica para los Países de América Central SIEPAC). http://www.ceaconline.org/documentos/Desarrollo_del_Proyecto_SIEPAC.pdf. Seminario regional sobre la transmisión de energía eléctrica CEAC – SNC LAVALIN. <http://www.ceaconline.org/documentos.php?cat=11>
- [24] Noé Cruz Serrano. (20 de octubre, 2014). "Roba crimen organizado partes a torres de CFE". El UNIVERSAL. <http://archivo.eluniversal.com.mx/finanzas-cartera/2014/impreso/roba-crimen-organizado-partes-a-torres-de-cfe-114202.html>
- [25] Isaias Ramírez-Vázquez, Ramiro Hernández-Corona and J. Eduardo Salgado-Talavera. (2015). "Composite Materials as an Alternative to Replace Steel Members on Lattice Power Transmission Towers". J. Mater. Civ. Eng. 04015151. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001427.
- [26] Teresa Pérez. (22 de abril, 2014). "Restablecido servicio eléctrico en un 97% por caída de torres". QUADRATIN. <https://edomex.quadratin.com.mx/Restablecido-servicio-electrico-en-un-97-por-caida-de-torres/>
- [27] Jonathan Nácar. (2014). "Restablecen 97% de electricidad en Cuautitlán tras caída de torres". Diario 24Horas. <http://www.24-horas.mx/restablecen-97-de-electricidad-en-cuautitlan-tras-caida-de-torres/>
- [28] Yen H. Y., and Yang S. C. (1997). "Building of a composite transmission tower". Journal of Reinforced Plastics and Composites. Vol. 16. Num. 5, pp. 414-424.
- [29] Han-Ming Li., et al. (2010). "Research on composite material towers used in 110 kV overhead transmission lines". International Conference on High Voltage Engineering and Application. ICHVE 2010, pp. 572-575.
- [30] Selvaraj M., Kulkarni S. M., and Ramesh Babu R. (2012). "Behavioral analysis of built up transmission line tower from FRP pultruded sections". International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. Vol. 2, Issue. 9, pp. 39-47.
- [31] M. Selvaraj, S. M. Kulkarni and R. Rameshbabu. (2014). "Performance Analysis of an Overhead Power Transmission Line Tower Using Polymer Composite Material".

- [32] Li M., Yang J., and Li Z. (2011). "Latest developments of materials used in transmission tower structure". *Advanced Materials Research*. Vol. 250-253, pp.4038-4041.
- [33] Ramiro Hernández, Javier E. Salgado "Análisis para la sustitución de elementos metálicos en torres de transmisión por materiales compuestos tipo polimérico de ingeniería, para evitar el robo de los componentes metálicos de las estructuras. Reporte final IIE/03/35/14435/RF/2013.
- [34] Sobrino J.A. y Olmo A. (2011). "Análisis y modernización de ensayos de uniones mecánicas de materiales GFRP fabricados por pultrusión". Tesis de especialidad, Universidad Politécnica de Cataluña, España, Julio 201.
- [35] Ramiro Hernández "Diseño y fabricación de elementos redundantes tipo polimérico de ingeniería para estructuras de transmisión como alternativa para evitar el robo de los componentes metálicos. Reporte IIE/03/35/14737/RP-01/2015.
- [36] NRF-023-CFE. (2009). "Herrajes y sus accesorios".
- [37] ASTM (American Society for Testing and Materials). (2009). "Standard Specification for Ductile Iron Castings". ASTM A536.
- [38] ASTM (American Society for Testing and Materials). (2012). "Standard Terminology of Adhesives". ASTM D907-12A. West Conshohocken, PA 19428-2959.
- [39] Paola A. Ruiz-Rojas. (2011). "Adhesivos estructurales: Alternativa potente y eficaz para la unión de metales [Structural adhesives: powerful and effective alternative for the union of metals]" *Revista Metal Actual* No. 20, pp 60-66. Publicación trimestral mayo – julio. Colombia. (in Spanish).
- [40] Tower-(2007). Version 8, Power Line Systems, Inc.
- [41] Ramiro Hernández Corona, Alberto Hernández Valdez. "Diseño y fabricación de elementos redundantes tipo polimérico de ingeniería para estructuras de transmisión como alternativa para evitar el robo de los componentes metálicos - análisis estructural de una torre típica". Informe IIE/03/35/14737/RP-02/2015.
- [42] Ramiro Hernández Corona, Alberto Hernández Valdez. "Diseño y fabricación de elementos redundantes tipo polimérico de ingeniería para estructuras de transmisión como alternativa para evitar el robo de los componentes metálicos – análisis de esfuerzos mecánicos en los conectores y diseño del método de conexión". Informe IIE/03/35/14737/RP-03/2015.
- [43] AutoCAD®. (2009). Version 9 Manual User. Autodesk.
- [44] Julio C. Vergara-Vazquez, Isaias Ramírez-Vazquez, Alberto Hernandez-Valdez et al. "Replacing Steel members with composite members on transmission tower", *Proceedings of the institution of Civil Engineers – Energy*. 2019, 172:1, 26-40; <https://doi.org/10.1680/jener.18.00019>; ISSN 1751-4223, E-ISSN 1751-4231.
- [45] AISI (American Iron and Steel Institute). "Acero Grado Maquinaria". AISI 1020.
- [46] Epoxy Technology. (2015). "Tech 13 tip". Hoja técnica. www.epotek.com EPO-513-01.

[47] Mario Madrid-Vega. (1997). "Tecnología de la adhesión", Seminario, Departamento Técnico de Loctite. Madrid, España.

[48] Software CATIA V5 R21. Computer Aided Three Dimensional Interactive Application.

[49] Ramiro Hernández Corona, Alberto Hernández Valdez. "Diseño y fabricación de elementos redundantes tipo polimérico de ingeniería para estructuras de transmisión como alternativa para evitar el robo de los componentes metálicos –Evaluación mecánica en laboratorio de las nuevas geometrías y de los conjuntos prototipos, para los 4 materiales de compuestos poliméricos. Informe IIE/03/35/14737/RP-05/2016.

[50] Gerencia Regional de Transmisión Central, Subgerencia de Subestaciones y Líneas, Coordinación de Transmisión. "Robo de fierro ángulo en estructura No. 99 de la Línea de Transmisión de 400 kV YTP-A3640-TOP". 07 de abril 2017. Archivo "REPORTE FOTOGRAFICO VANDALISMO 07 de ABRIL 2017.ppt".

[51] Gerencia Regional de Transmisión Central, Subgerencia de Subestaciones y Líneas, Coordinación de Transmisión. "Robo de fierro ángulo en estructura Nos. 99 y 101 de la línea de transmisión de 400 kV YTP-A3640-TOP". 26 de abril 2017. Archivo electrónico: REPORTE FOTOGRAFICO VANDALISMO 26 de ABRIL 2017.ppt".

[52] ASTM (American Society for Testing and Materials). (2010). "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics". ASTM D638-10.

[53] ASTM (American Society for Testing and Materials). (2010). "Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials". ASTM D638-10.