



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA PARA CONSTRUCCIÓN DE SALA ELÉCTRICA
PREFABRICADA EN ELEMENTOS DE PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CARLOS ALBERTO PÉREZ RAVANAL

PROFESOR GUÍA
RAMÓN MONTECINOS CONCHA.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
ADOLFO OCHOA LLANGATO
GUILLERMO ASTORGA FAÚNDEZ

SANTIAGO DE CHILE

2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: Carlos Alberto Pérez Ravanal
FECHA: 11/01/2021
PROFESOR GUÍA: Ramón Montecinos Concha

EVALUACIÓN TÉCNICO ECONOMICA PARA CONSTRUCCION DE SALA ELÉCTRICA PREFABRICADA EN ELEMENTOS DE PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRAS

El objetivo de esta memoria consiste en realizar una comparación técnico económica para una estructura industrial diseñada bajo dos materialidades distintas. La primera alternativa de materialidad corresponde a la utilización como elemento base el acero, lo cual corresponde a una solución conocida para efectos de este estudio e implementada en diversos ámbitos de la actividad industrial. La segunda alternativa de materialidad corresponde a la utilización de perfiles de plástico (o polímero) reforzado con fibras (FRP por sus siglas en inglés, *fibre reinforced polymer*).

Para el desarrollo de esta comparativa se adopta el caso existente de una estructura de acero destinada a conformar una sala que alberga en su interior equipamiento eléctrico de baja y media tensión, por lo que corresponde a un equipamiento crítico, de una subestación eléctrica de alta tensión. En base al diseño definido para esta sala se realiza el diseño homólogo utilizando perfiles de FRP disponibles en el mercado local, tomando en consideración las solicitudes originales para la sala junto con los requerimientos de diseño presentados en el documento *Pre-Standard for Load & Resistance Factor Design (LRFD) of Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures*, preparado por ASCE.

Luego de generar el diseño de la sala bajo el uso de perfiles de FRP, se realiza la cuantificación económica asociada a su fabricación, transporte y construcción en obra de manera de comparar en estos mismos ámbitos contra la solución base que corresponde a la fabricación de la sala en estructura de acero.

En base a los resultados obtenidos, además de las consideraciones revisadas para el diseño de la sala en perfiles de FRP, se llega a la conclusión para este estudio y su escenario que la construcción de la sala eléctrica en FRP resulta cerca de un 23% más costosa que la solución en acero a nivel de materiales, y un 10,5% para una condición *exworks*, puesto en fábrica. Si en adición a lo anterior se considera el transporte se estima que la solución en FRP es aproximadamente un 6,7% más costosa que la solución en acero. Es por ello que se podría considerar, en función de las propias condiciones del proyecto sobre el cual se quiera implementar, como una solución factible de analizar particularmente en condiciones especiales (por ejemplo, limitaciones en los pesos de transporte por infraestructura de la trayectoria de transporte), y como una alternativa en el reemplazo de la sala de acero en condiciones normales de obra según los costos globales del proyecto, al ser técnicamente factible su aplicación.

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos, siempre, a mis padres. Por fin después de tantos años verán, uno en la tierra y una en el cielo, el fin de este proceso.

Gracias a los miembros de la comisión, quienes estuvieron siempre dispuestos durante este trabajo. Particularmente al profesor Adolfo Ochoa, gestor de que mi persona y mis compañeros del “F” cambiemos nuestra condición de egresados a titulados luego de algunos años fuera de la Universidad.

A mi eterna compañera de Universidad y del día a día Paulina, por su ayuda en este proceso tanto en lo académico como extra académico. Este proceso es tanto tuyo como mío.

A todos quienes, de una u otra forma, incitaron a que no me olvidara de este proceso y de darle su punto final.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	1
1.1 Objetivos	1
1.1.1 Objetivos generales	1
1.1.2 Objetivos particulares.....	2
1.2 Metodología y Alcances.....	2
1.3 Instalaciones de Resguardo de Equipamiento Eléctrico.....	2
2. Polímero Reforzado con Fibras (FRP).....	5
2.1 Uso y Composición de Elementos FRP	5
2.1.1 Fibras de refuerzo.....	7
2.1.2 Materiales de matriz.....	9
2.1.3 Condiciones de resguardo sobre fibras y matriz polimérica	10
2.2 Fabricación de Perfiles Estructurales de FRP. Sistema de Pultrusión.....	11
2.2.1 Pultrusión.	12
2.2.2 Fabricantes de elementos pultruidos.	13
2.2.3 Requisitos en la fabricación de elementos estructurales de FRP	15
2.3 Directrices de Diseño Asociada al Uso de Elementos Estructurales de FRP.....	17
2.3.1 Escenario local	17
2.3.2 Escenario internacional	18
2.4. Anteproyecto de Norma ASCE. Otros Requerimientos a los Elementos Estructurales.....	19
2.4.1 Materiales constituyentes de elementos de FRP	19
2.4.2 Propiedades físicas y mecánicas de elementos de FRP pultruidos.....	20
3 Planteamiento Base Sala Eléctrica Prefabricada	22
3.1 Antecedentes	22
3.2 Salas Eléctricas.....	23
3.2.1 Métodos de construcción.....	23
3.2.2 Equipamiento de salas eléctricas.....	26
3.3 Optimización de la Construcción	30
3.4 Especificaciones para Sala de Perfiles FRP	33
4 Diseño de Sala en Perfiles de FRP	38
4.1 Estados de Carga	38
4.1.1 Peso Propio (D [ASCE]; CP [NCh])	38
4.1.2 Sobrecarga de Techo (Lr).....	38
4.1.3 Sobrecarga de Uso (L [ASCE]; SC [NCh]).....	38

4.1.4 Sismo (E).....	38
4.1.5 Viento (W)	40
4.1.6 Izaje	43
4.1.7 Combinaciones de carga.....	43
4.2 Diseño Sala en FRP.....	44
4.2.1 Modelo computacional.....	44
4.2.2 Diseño por factores de carga y resistencia. Requerimientos de anteproyecto de norma para el diseño de elementos.....	45
4.2.3 Diseño por factores de carga y resistencia. Requerimientos de anteproyecto de norma para el diseño de conexiones apernadas.	53
4.2.4 Estructura resultante	61
5 Comparación de Soluciones	64
5.1 Fabricación	64
5.2 Transporte y Montaje en Obra	67
5.3 Resumen.....	68
6 Conclusiones y Comentarios	70
6.1 Perfiles de FRP como Elemento Estructural	70
6.2 Costos en el Uso de Elementos de FRP	72
6.3 Conclusiones	73
Bibliografía	75
Anexo 1: Fundación Sala Existente (Sala de Acero)	77
Anexo 2: Diagramas Sala FRP.....	78
Anexo 3: Revisión Elementos Marco.....	82

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 — Propiedades mínimas requeridas para perfiles estructurales según EN 13706.....	15
Tabla 2.2 — Propiedades mínimas requeridas para perfiles estructurales según ASTM D7290.....	16
Tabla 2.3 — Comparación de requerimientos mínimos según normas EN y ASTM para perfiles FRP....	17
Tabla 2.4 — Propiedades físicas mínimas requeridas para elementos estructurales de FRP.....	20
Tabla 3.1 — Características según sistema constructivo.....	31
Tabla 3.2 — Características construcción en FRP.....	32
Tabla 3.3 — Características ambientales en ubicación de proyecto, Calama.....	36
Tabla 3.4 — Propiedades elementos estructurales FRP.....	37
Tabla 4.3 — Distribución de fuerzas sísmicas.....	40
Tabla 4.2 — Presiones de viento, dirección normal a muro más ancho.....	42
Tabla 4.3 — Presiones de viento, dirección normal a muro menos ancho.....	42
Tabla 4.4 — Combinaciones de carga según antenorma ASCE y NCh3171:2010.....	43
Tabla 4.5 — Valores de λ según anteproyecto de norma ASCE (extracto).....	45
Tabla 4.6 — Valores para C_M y C_T (extracto).....	46
Tabla 4.7 — Requerimientos mínimos para la geometría de conexiones apernadas.....	54
Tabla 4.8 — Distribución de carga para conexiones con dos o tres filas de pernos.....	56
Tabla 4.9 — Resistencia nominal de pernos.....	56
Tabla 4.10 — Resumen elementos estructura sala.....	63
Tabla 5.1 — Desglose de precios sala en acero.....	64
Tabla 5.2 — Desglose de precios sala en acero sin equipos.....	65
Tabla 5.3 — Desglose de precios sala en FRP.....	65
Tabla 5.4 — Resumen partidas y comparación de soluciones.....	66
Tabla 5.5 — Partidas con variación de costos.....	68
Tabla 5.6 — Desglose de precios sala en acero.....	69
Tabla 6.1 — Resistencia específica.....	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Vista interior (izq.) y exterior (der.) Central Abanico.....	2
Figura 1.2 – Caseta eléctrica (albañilería), subestación Alto Jahuel.....	3
Figura 1.3 – Caseta eléctrica tipo contenedor.....	3
Figura 1.4 – Ejemplo sala eléctrica, planta interior.....	4
Figura 2.1 – Utilización de láminas de CFPR.....	6
Figura 2.2 – Utilización de elementos de GFPR.....	6
Figura 2.3 – Puente peatonal construido con GFPR.....	7
Figura 2.4 – Descripción gráfica, agrupaciones de fibras continuas.....	8
Figura 2.5 – Velo, estera y tejido de fibra de vidrio (de izq. a der.).....	9
Figura 2.6 – Diagrama de resultados deformación – tensión según razones de carga y condiciones de temperatura.....	10
Figura 2.7 – Proceso de pultrusión.....	12
Figura 2.8 – Composición elemento de pultrusión.....	12
Figura 3.1 – Vista aérea Subestación Eléctrica Calama.....	22
Figura 3.2 – Construcción sala eléctrica. Albañilería confinada.....	24
Figura 3.3 – Ejemplo construcción en taller de sala prefabricada. Estructura en acero.....	24
Figura 3.4 – Sala prefabricada en terreno. Estructura en acero.....	25
Figura 3.5 – Ejemplo sala eléctrica modular.....	25
Figura 3.6 – Ejemplo celdas de media tensión (3 celdas).....	26
Figura 3.7 – Celda de media tensión, tipo 1 (distribución o <i>feeder</i>).....	27
Figura 3.8 – Celda de media tensión, tipo 2 (principal o <i>main</i>).....	28
Figura 3.9 – Bastidores de control y protecciones.....	29
Figura 3.10 – Armarios de control y protecciones.....	29
Figura 3.11 – Servicios auxiliares. Banco de baterías (izq.); tableros de distribución (der.).....	30
Figura 3.12 – Sala eléctrica. Diseño base (solución en acero).....	33
Figura 3.13 – Sala eléctrica. Diseño base (solución en acero).....	33
Figura 3.14 – Croquis estructura sala eléctrica. Diseño base (solución en acero).....	34
Figura 3.15 – Sala eléctrica. Diseño base (solución en acero) – Planta de distribución.....	34
Figura 4.1 – Presiones de viento (externas).....	42
Figura 4.2 – Modelo computacional.....	44
Figura 4.3 – Geometría de conexión y definición de fila de pernos.....	54
Figura 4.4 – Distribución de perfiles en chasis (izq.: vista en planta; der.: vista isométrica).....	61

Figura 4.5 – Marco para sala (izq.: vista frontal; der.: vista isométrica conjunto de marcos).....	62
Figura 4.6 – Arriostramiento de marcos (izq.: vista lateral; der.: vista isométrica).....	62
Figura 5.1 - Fundación sala eléctrica, solución acero.....	68
Figura 6.1 – Comparación de perfiles (comerciales).....	71
Figura 6.2 – Comparación de perfiles (adaptado).....	71

1. Introducción

El actual desarrollo del país ha llevado a la necesidad de que la matriz eléctrica se expanda a una velocidad cada vez mayor, lo que se traduce en lograr que sus diferentes procesos, que van desde la revisión y toma de decisión sobre la necesidad de nuevas instalaciones, o la ampliación de instalaciones existentes hasta la construcción y posterior puesta en servicio del proyecto terminado, se optimicen y permitan la entrada en operación de los sistemas en tiempos cada vez más acotados.

Dentro del proceso de ejecución de proyectos asociados a la implementación de subestaciones eléctricas, que corresponden a los nodos dentro de un sistema de transmisión eléctrica, las obras civiles tienen un peso importante tanto en el costo del proyecto como en el porcentaje de tiempo que requieren. En función de mejorar alguno de estos dos parámetros es que algunos de sus procesos o elementos se han ido optimizando a través del tiempo, en base a diferentes mejoras tecnológicas, como por ejemplo en lo relacionado a la construcción de edificaciones menores destinadas a resguardar equipamiento eléctrico, en donde de la construcción in situ en base a la albañilería se ha pasado a la implementación de salas prefabricadas en acero de manera de contar con el edificio en pie prácticamente a la par con el término de construcción de sus fundaciones, y con esto lograr mejoras en el tiempo de construcción ya sea para disminuir los costos de la misma como para dar más tiempo de desarrollo a etapas más sensibles de la construcción, como lo son la vinculación y puesta en marcha de los diferentes componentes de la subestación eléctrica a través de sus sistemas de control, protecciones y comunicaciones.

El uso de elementos de plástico reforzado con fibras lleva años en el mundo de la construcción. Su uso se visualiza generalmente en el reforzamiento de estructuras ya en servicio, de manera de reparar daños o mejorar su desempeño. Otros usos lo llevan al reemplazo del acero en elementos de fijación mecánica, o como reemplazo de barras de refuerzo en el hormigón. En la industria de la construcción se ha incorporado como reemplazo del acero en elementos secundarios, como bandejas porta - cables, escalas y estructuras de tránsito de personas. Al día de hoy, fabricantes han desarrollado perfiles estructurales en base a plástico reforzado con fibra con uso en estructuras de bajas solicitaciones.

El presente trabajo busca estudiar si el uso de elementos de plástico reforzado a nivel estructural, tiene ventajas respecto al uso de elementos de acero enfocado en la fabricación de salas eléctricas. Lo anterior, de manera de lograr una nueva optimización al proceso constructivo de este tipo de edificaciones.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos generales

- Analizar la aplicabilidad, en la construcción de salas para equipamiento eléctrico, del uso de perfiles de plástico reforzado con fibras.
- Comparar la construcción de estructuras para equipamiento eléctrico en estructuras de acero (solución convencional) con la construcción de estructuras en plástico reforzado con fibras, de manera de definir ventajas y/o desventajas entre ambas opciones.

1.1.2 Objetivos particulares

- Diseño de una sala eléctrica en estructura de plástico reforzado con fibra en base a diseño existente de sala eléctrica de estructura de acero.
- Comparación técnico – económica de fabricación y montaje entre sala eléctrica de estructura en plástico reforzado con fibra con sala en estructura de acero.
- Determinar ventajas y desventajas del uso de una u otra materialidad planteadas en este trabajo.
- Revisión de capacidad y adaptabilidad de herramientas computacionales considerando el diseño con perfiles de plástico reforzado.

1.2 Metodología y Alcances

- Investigación bibliográfica sobre la aplicabilidad del material a revisar en diferentes áreas.
- Investigación bibliográfica sobre los parámetros y condiciones de diseño asociados al nuevo material.
- Diseño y análisis de modelo estructural computacional de sala eléctrica en plástico reforzado.
- Revisión del modelo estructural computacional de sala eléctrica en acero.
- Investigación de mercado respecto a los costos de fabricación de sala eléctrica en ambas opciones.

1.3 Instalaciones de Resguardo de Equipamiento Eléctrico

Dentro del sector industrial eléctrico, las instalaciones asociadas al resguardo de equipamiento eléctrico tienen un grado de clasificación según lo que tengan contenido en su interior. Sin hacer una diferenciación inicial, podemos encontrar construcciones que protegen desde generadores en centrales hidroeléctricas, hasta pequeñas casetas con unos cuantos armarios con equipos asociados al control y protecciones, o a servicios auxiliares.



Figura 1.1 – Vista interior (izq.) y exterior (der.) Central Abanico (fuente: autor).



Figura 1.2 – Caseta eléctrica (albañilería), subestación Alto Jahuel (fuente: autor).



Figura 1.3 – Caseta eléctrica tipo contenedor [25].

La envergadura de estas construcciones está claramente relacionada con los elementos a proteger. En el caso de los generadores presentados en la figura 1.1 la construcción es un edificio de gran altura, que además forma parte de la mega construcción asociada a la planta generadora. En cambio, la construcción en las figuras 1.2 y 1.3 corresponden a una construcción aislada, sin otras obras asociadas directamente a su construcción. Será la finalidad de cada instalación la que definirá su tamaño.

Una primera clasificación de las construcciones asociadas a la protección de equipamiento eléctrico puede entonces darse según los elementos en resguardo:

- Instalación de generación
 - o Resguardo: turbinas.
 - o Dimensiones: según tamaño y cantidad de turbinas; uso de construcciones tipo galpón que permitan el mantenimiento del equipamiento.

- Instalaciones de transmisión/distribución
 - o Resguardo: equipos asociados a la transmisión eléctrica que no pueden ser instalados a la intemperie o por razones urbanísticas.
 - o Dimensiones: según equipamiento. Para equipos de distribución aislados en aire, uso de construcciones tipo galpón. Para equipos de distribución con aislación en gas SF6, según cantidad, uso de salas eléctricas o casetas.

- Instalaciones de equipos de baja tensión o corrientes débiles
 - o Resguardo: equipos asociados al control, protecciones y comunicaciones de instalaciones de generación y/o transmisión/distribución eléctrica; sistemas de servicios auxiliares.
 - o Dimensiones: salas eléctricas o casetas.

Esta clasificación está lejos de ser estricta considerando que, según los requerimientos del mandante o dueño de las instalaciones, algunas o todas las mencionadas previamente necesiten ser consideradas en un solo recinto, incluso en complemento con otras.

También cabe mencionar que, si bien lo señalado en la clasificación está enfocado en la industria energética, pueden ser parte en otros tipos de industria, o ser parte de un subsistema de ésta. Por ejemplo, las instalaciones de transmisión/distribución de energía corresponden a un subsistema de una planta minera encargada de la alimentación eléctrica para los diferentes procesos. Y las instalaciones de equipos de baja tensión o corrientes débiles son parte de los sistemas de automatización de los procesos de producción.

El trabajo se enfoca en revisar instalaciones del tipo sala eléctrica, destinadas exclusivamente al resguardo de equipamiento eléctrico de distribución (para equipos compactos) y/o para equipos de baja tensión o corrientes débiles. Con lo anterior se dejan fuera del estudio salas que además sean complementadas con instalaciones asociadas al personal de operación, como son servicios higiénicos y dependencias de trabajo o esparcimiento (oficinas, piezas, cocinas, etc.).

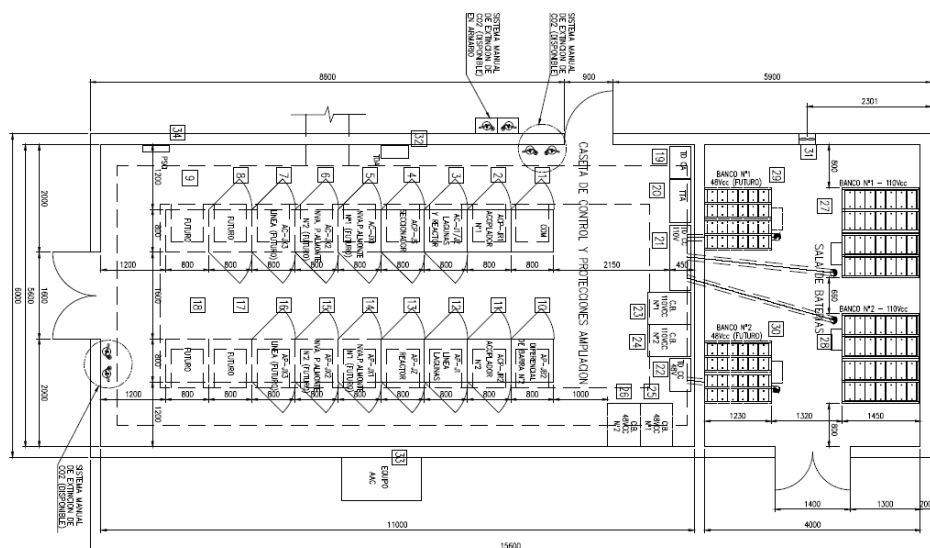


Figura 1.4 – Ejemplo sala eléctrica, planta interior.

2. Polímero Reforzado con Fibras (FRP)

2.1 Uso y Composición de Elementos FRP

Durante los años de historia humana los avances tecnológicos han permitido la creación y composición de nuevos materiales junto con la modernización de sus procesos de elaboración, permitiendo generar elementos en diferentes formas y tamaños, de manera más precisa tanto en sus dimensiones como en su composición interna, y según los requerimientos que los nuevos desafíos ingenieriles les impongan. En esta línea, los avances tecnológicos han estado asociados a grandes eventos de la historia de varias maneras y diversos motivos, como lo han sido las Guerras Mundiales.

Es posterior a la Segunda Guerra Mundial cuando la industria petroquímica comienza a tener auge en diversas áreas de desarrollo. Esto permite desarrollar y experimentar con diversos materiales y revisar los resultados de sus combinaciones respecto a su comportamiento frente a esfuerzos, a sus costos de producción, su interacción con el medio ambiente ya sea natural o industrial, entre otros puntos de interés [6]. En este desarrollo la mejora en la fabricación de resinas y la creación de nuevos tipos de estas se llega a cruzar con la fabricación de materiales compuestos, producto de los requerimientos de industrias en crecimiento como lo fueron, y lo son, la industria aérea y aeroespacial. La necesidad de creación de materiales más resistentes, más livianos y de mejor comportamiento en sus actividades llevaron a la investigación de compuestos de fibras de diferentes tipos y materiales polímeros, los cuales se extenderían posteriormente en su utilización en elementos de comercialización al detalle como son implementos deportivos, artículos para el hogar y elementos de construcción, entre otros.

Los polímeros reforzados con fibra (FRP por su sigla en inglés, *fibre reinforced polymer/plastic*) corresponden a un material compuesto hecho en base una matriz polímera reforzada con fibras, las cuales pueden ser de vidrio (GFRP, *glass fibre reinforced polymer*), de carbono (CFRP, *carbon fibre reinforced polymer*) entre una gran gama de opciones dependiendo de su uso. La resina puede ser un epóxico, vinilester o poliéster de diversas características, otorgando al compuesto resistencia a agentes químicos, estabilidad respecto a la temperatura y otras características que aseguren su buen comportamiento para la finalidad que se haya definido.

El uso de FRP en el ámbito civil tiene varios frentes de acción, entre los cuales podemos encontrar:

- Reforzamiento de estructuras; el uso de láminas de fibras de carbono pultrusionadas reforzadas con polímeros se han masificado para refuerzo de estructuras de hormigón en situaciones de reacondicionamiento y/o reparación de estructuras.



Figura 2.1 – Utilización de láminas de CFPR [23].

- Elementos secundarios: Se ha incursionado en el área de la industria minera con elementos no estructurales fabricados en GFRP, en donde el ambiente es químicamente agresivo, reemplazando elementos metálicos por sus versiones fabricadas en plástico reforzado, como por ejemplo en barandas, escalas y escaleras, pisos técnicos, entre otros.



Figura 2.2 – Utilización de elementos de GFRP [11].

- Elementos estructurales: En algunos países se ha incursionado en el uso de perfiles de GFRP con finalidades estructurales enfocado en situaciones de baja sollicitación, y en que la accesibilidad al área de proyecto está limitada en cuanto al peso y a las condiciones de montaje para el caso de una estructura de acero.



Figura 2.3 – Puente peatonal construido con GFPR [13].

2.1.1 Fibras de refuerzo

Como se ha indicado, los elementos de FRP corresponden a elementos compuestos, resultantes de la combinación de fibras y una matriz polimérica. En este caso las fibras aportan con dar rigidez y resistencia, y la matriz mantiene las fibras unidas, así como también brinda la capacidad de transmisión de cargas entre las fibras como entre el elemento y las cargas externas.

El mejor comportamiento de las fibras respecto a su rigidez y resistencia se da en dirección de las mismas, cuando el elemento está reforzado con ellas de manera unidireccional. Sin embargo, esta condición lleva a que el material tenga diferentes propiedades según la dirección de análisis, llegando a sus valores mínimos si se analiza en el plano perpendicular a la dirección de la fibra. Para mejorar las propiedades en otras direcciones diferentes a la de la fibra, es que se disponen además fibras en direcciones aleatorias de manera de igualar en todas direcciones las propiedades del elemento. Ahora, el uso de fibras continuas en una dirección ayuda a que la fluencia lenta (*creep*) no sea predominante en el comportamiento del elemento, condición que se puede dar en el caso de usar fibras cortas en donde la fluencia lenta dependerá de la matriz.

Las fibras de refuerzo pueden ser de un abanico no menor de materiales el cual se define según necesidad en base a la aplicación del elemento. Las materialidades más comunes corresponden a las siguientes (se presenta su definición según [26]):

- Fibra de vidrio: filamento que se obtiene por la fusión de un producto inorgánico (sílice), el cual se enfría sin llegar a cristalizarse.
- Fibra de carbono: filamento constituido por 99% de carbono elemental, obtenido de un precursor por oxidación.
- Fibras orgánicas o aramiditas (de la abreviación del inglés *aromatic polyamide*, poliamida aromática): filamento orgánico de cadenas moleculares orientadas, derivado de la poliamida con una estructura en anillo aromática.

La fibra de vidrio corresponde a la más utilizada para elementos industriales debido a su bajo costo en comparación a las fibras de carbono o a las del tipo orgánicas o aramiditas (de las cuales el Kevlar

es una de sus representantes más conocidas), pero con un buen comportamiento a la tensión comparada entre sus pares y con materiales típicamente utilizados como el acero. Además, si bien la fibra de carbono tiene un comportamiento sobresaliente ante la temperatura (a los 2.000 °C es capaz de mantener gran parte de sus propiedades) en comparación a los otros tipos de fibra, en su uso en elementos compuestos no se aprecia esta propiedad ya que generalmente el elemento de la matriz tiene una temperatura menor de degradación (según el caso, aproximadamente a los 200 °C). En el caso del Kevlar, en la fabricación de elementos compuestos con etapas de temperatura puede sufrir degradación de sus propiedades, situación más estable en la fibra de vidrio.

La forma de uso de las fibras de refuerzo también dependerá de las propiedades que se buscan en el elemento compuesto, costo y velocidad de fabricación del elemento final. Dentro de las maneras de uso de las fibras de refuerzo encontramos:

- Fibras continuas: fibras de largo desarrollo dispuestas de manera que sus propiedades mecánicas alcancen sus valores máximos ante las sollicitaciones realizadas al elemento. Las formas en que usualmente se encuentran, para la posterior disposición en los elementos a fabricar, son:
 - o Fibras en haz o hilo, no torcidas (*strand, tow*)
 - o Fibras en haz o hilo, torcidas (*yarn*)
 - o Haz de fibras ordenadas (*roving*)

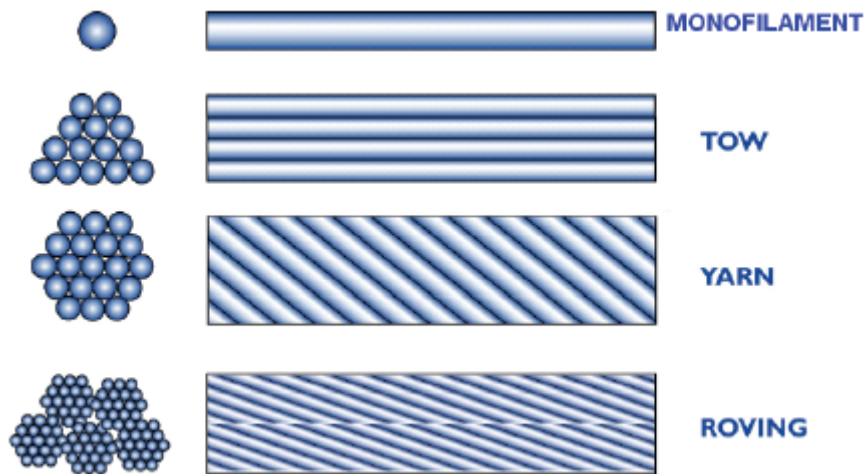


Figura 2.4 – Descripción gráfica, agrupaciones de fibras continuas [14].

- Fibras discontinuas: fibras cortas obtenidas por el corte de fibras largas, o directamente de fabricación en esta condición, dispuestas aleatoriamente en el elemento que las contiene. Su uso en post al uso de fibras continuas disminuye el costo de fabricación, pero también puede ser usado de manera complementaria mejorando la mecánica del material. Es posible encontrarlas en la composición de:
 - o Estera (*mat*); velo (*veil*)
 - o Tejido (*fabric*)



Figura 2.5 – Velo, estera y tejido de fibra de vidrio (de izq. a der.) [9].

2.1.2 Materiales de matriz

Según se ha mencionado, la matriz polimérica mantiene las fibras unidas, así como también brinda la capacidad de transmisión de cargas entre las fibras como entre el elemento y las cargas externas. Además, protege las fibras de las condiciones ambientales y mecánicas, junto con participar en la recepción de cargas, particularmente transversales y de corte interlaminar.

Según el tipo de material, los materiales utilizados como matriz se pueden clasificar en:

- Termoestables: corresponden a materiales que pasan de manera irreversible desde una condición de resina a una condición sólida luego de pasar por un proceso de curado, lo anterior asociado a una transformación química. Poseen una baja viscosidad lo que resulta ventajoso para la impregnación de fibras de refuerzo y la velocidad de proceso. Sí resulta de cuidado su almacenamiento, el cual tiene un tiempo limitado antes que el material se degrade. Dentro de este tipo de material encontramos las resinas del tipo:
 - o Poliester
 - o Vinilester
 - o Epóxicos
 - o Fenolíticos

Estas resinas poseen una alta aislación térmica, lo que sirve de protección a los elementos de refuerzo. Las resinas de poliester, si bien no destacan por sus propiedades físicas, pueden ser efectivas respecto al costo, dado su costo inicial y bajos costos de tratamiento. Las resinas de vinilester tienen una alta capacidad de deformación previo a la fractura lo que permite una transmisión de carga importante a los elementos de refuerzo. Las resinas epóxicas son consideradas de alto desempeño en función a su capacidad de deformación y al tener, comúnmente, una temperatura de servicio mayor a los otros tipos de resinas termoestables. Las resinas fenolíticas tienen un buen comportamiento ante incendios, pero su proceso de trabajo tiene mayores dificultades por lo que su elección se debe a condiciones generalmente técnicas.

- Termoplásticos: corresponden a materiales que no sufren transformación química durante su procesamiento, sólo de una transformación física que ayuda en su manejo. Poseen alta viscosidad lo cual hace más dificultoso su tratamiento. Una de sus ventajas es que como

materia prima no necesitan cuidados especiales respecto a su almacenamiento. Algunos de los materiales de este tipo corresponden a los siguientes:

- Polietileno
- Poliestireno
- Policloruro de vinilo

2.1.3 Condiciones de resguardo sobre fibras y matriz polimérica

Para los tipos de matriz comentadas en el punto previo, los materiales poliméricos sufren de fluencia lenta a temperatura ambiente. Esta fluencia lenta (*creep*) se define como el aumento de la deformación en el tiempo bajo una carga constante, y corresponde a una de las manifestaciones asociadas al comportamiento viscoelástico de este tipo de materiales. Esta condición de desventaja es controlada por la adición de fibras, lo cual permite que el elemento soporte cargas permanentes en el tiempo sin sufrir deformaciones considerables.

La temperatura también tiene efectos sobre los elementos poliméricos. La temperatura de transición vítrea en polímeros termoestables corresponde a la temperatura en que el material pasa de un estado rígido a un estado elástico, manteniendo a rasgos generales su forma, pero perdiendo notoriamente sus propiedades mecánicas. Esta temperatura define en primera instancia un límite de la temperatura de servicio de los elementos con matriz polimérica.

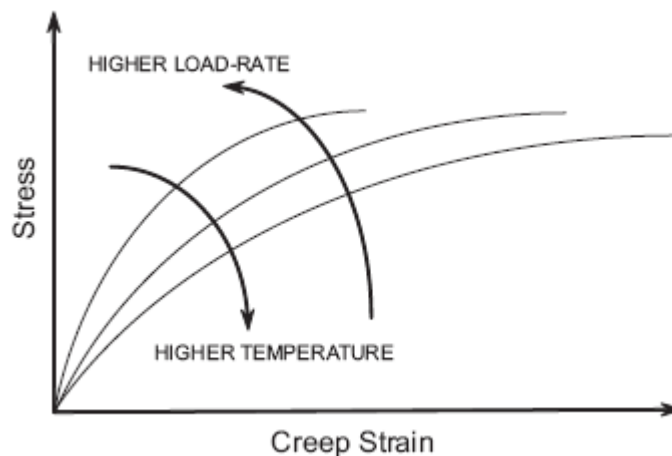


Figura 2.6 – Diagrama de resultados de deformación – tensión según razones de carga y condiciones de temperatura [21].

Ahora, variaciones de temperatura en la matriz, incluso por debajo de la temperatura de transición vítrea, tienen un efecto en su velocidad de fluencia lenta, siendo mayor a mayor temperatura. La exposición a ambientes húmedos también afecta en la matriz, disminuyendo los valores de elasticidad, resistencia y temperatura de transición vítrea, al considerarse en cierto grado al agua como solvente que genera una degradación química de la matriz.

Junto con la humedad, existen otras condiciones que generan una corrosión en la matriz polimérica, como por ejemplo la exposición a la radiación Ultra Violeta (UV). Si bien no tiene una influencia directa en el comportamiento mecánico del elemento, genera erosión y condiciones de fragilidad en la superficie, lo que potencia el efecto de la humedad. La presencia de solventes en contacto con el elemento contribuye también a la generación de corrosión, lo cual y según el grado de daño en la matriz pueden afectar a las fibras de refuerzo.

La presencia de llama ante un incendio genera perjuicios a los elementos debido al aumento de temperatura y a la posibilidad de combustión según la duración y proximidad de la fuente de incendio. El aumento de temperatura puede llevar el elemento a la temperatura de transición vítrea, generando su colapso.

Lo anterior interactúa además con el envejecimiento propio de los componentes de la matriz. Esta suerte de degradación del material genera, en el largo plazo, una disminución en las propiedades mecánicas del material, e incluso físicas al verse reflejado en una disminución en peso de la matriz. Es por ello que a la hora del diseño estos factores deben ser considerados en función a los requerimientos y condiciones a las que se enfrentará la estructura proyectada, lo cual puede además complementarse con solicitudes al fabricante de combinaciones especiales en el compuesto de la matriz.

Según las opciones del fabricante, existen una gran variedad de aditivos que pueden ser incorporados a la matriz útiles para la mejora del desempeño mecánico y químico, para su trabajabilidad durante la fabricación, o para modificar alguna otra propiedad. Algunas de las ventajas que se pueden lograr con el uso de aditivos son las siguientes:

- Efectos en la retracción, disminuyendo su ocurrencia.
- Disminución de la inflamabilidad y generación de humos tóxicos en condiciones ante presencia de fuego.
- Disminución de vacíos.
- Aumento de dureza.
- Retraso o inhibición de oxidación de polímeros.
- Protección ante la acción de rayos ultravioleta.
- Modificación de color según requerimientos.

2.2 Fabricación de Perfiles Estructurales de FRP. Sistema de Pultrusión

En el uso de elementos de FRP es posible encontrar diversas técnicas de fabricación según lo que se desee como resultado final, tanto en forma como en costos y tiempo de producción. Algunos de los procesos de fabricación son los siguientes:

- Procesos de molde abierto
 - Moldeamiento a condiciones normales
 - Moldeamiento a presión
- Procesos de molde cerrado
 - Moldeamiento a compresión
 - Moldeamiento por inyección
 - Moldeamiento a pultrusión.

Algunas diferencias según la temperatura, tiempo o etapa de curado, así como por la forma en que se incorporan fibras y resinas al proceso, generan subclasificaciones de los procesos mencionados. Sin embargo, para efectos de estudio en este trabajo, se revisa en el proceso de pultrusión el cual es utilizado en la fabricación de perfiles estructurales de FRP.

2.2.1 Pultrusión.

El proceso de pultrusión (de la unión de *pull* y *extrusion*) es una tecnología principalmente utilizada para la producción de manera continua de elementos laminados reforzados con fibra, y cuya sección se mantiene constante. En la actualidad existente diversos productos derivados de este tipo de fabricación, los cuales son ampliamente utilizados en el campo de la ingeniería civil. Esta tecnología está basada en un proceso de fabricación continua consistente en 3 fases principales:

- Formación
- Impregnación
- Endurecimiento.

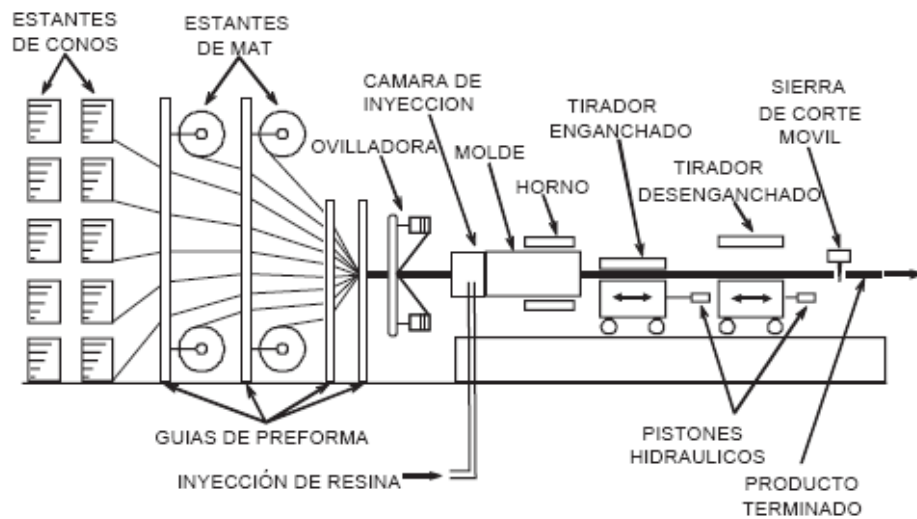


Figura 2.7 – Proceso de pultrusión [21].

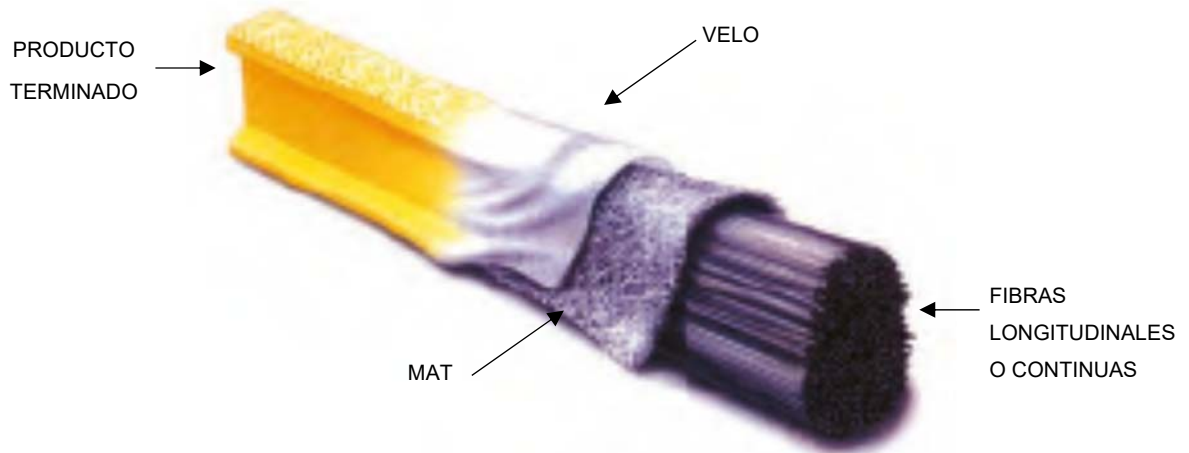


Figura 2.8 – Composición elemento de pultrusión [15].

En su forma más común diseñada para el uso de resinas termoestables, los componentes (resina y fibras) alimentan de manera separada la línea de producción. La máquina de pultrusión tira las fibras a través de diferentes etapas de producción. En la etapa de formación las fibras, en sus

diferentes configuraciones (fibras longitudinales, mat, velo), son tomadas directamente de los rollos agrupándolas en función a la composición deseada para el elemento a fabricar, pero que generalmente consiste en envolver las fibras continuas, dispuestas en dirección de la pultrusión, por los elementos de fibra corta (velos o mantos), creando un manojo con fibras principales continuas más una envolvente de fibras en varias direcciones. Esta agrupación de fibras es llevada al baño de resina, dando curso al proceso de impregnación. Posteriormente y para la etapa de endurecimiento o curado, los haces de fibras impregnadas entran a la cámara de calor donde el material es formado y enlazado bajo alta presión. Durante esta fase, los espacios entre las fibras son eliminados para asegurar una continuidad en la sección del elemento, al funcionar la cámara de calor además como el molde que define la sección final del elemento. El calentamiento es generalmente generado por resistencias eléctricas, controlando la temperatura a través de termocuplas de manera de que el proceso de polimerización se lleva a cabo de manera óptima en función del tipo de resina utilizado. La duración de la etapa de calentamiento está regulada por la velocidad de producción de la línea, la cual es típicamente de 1 [m/min] [24]. Una vez que sale de la cámara, el compuesto resultante es un elemento totalmente sólido y que puede ser dimensionado en su largo en base a los requerimientos definidos al fabricante.

Como se presenta, el proceso es completamente automático lo que facilita ampliamente su fabricación. Además, se considera como un proceso de bajo costo en consideración a que el producto resultante es el final, sin necesidad de tratamientos adicionales como podrían ser pulido, pintura u otros, lo cual se suma a que operacionalmente tiene costos bajos. Los costos del proceso están en el diseño y fabricación del moldaje (el cual está asociado además a la cámara de curado), y al diseño e implementación de guías para las fibras, razón por la cual resulta ideal que el volumen de producción sea alto de manera de distribuir estos costos. Los productos de pultrusión típicos incluyen láminas, barras, perfiles estructurales, paneles y placas, los cuales se utilizan como reforzamiento interno y externo para estructuras nuevas o existentes, componentes estructurales para transporte, entre otros usos.

Dado que los elementos de FRP pueden ser definidos en una diversa configuración de materialidad según el tipo de refuerzo utilizado y la resina elegida, para lo que resta del documento se considera FRP como GFRP (*glass fibre reinforced polymer*) de manera indistinta, en consideración a que es esta configuración la elegida para el diseño de los perfiles la sala a proyectar.

2.2.2 Fabricantes de elementos pultruidos.

Existen diversos fabricantes de elementos pultruidos, diferenciados principalmente en el nivel de desarrollo de su abanico de productos manufacturados bajo este método, pero que en esencia utilizan las mismas materias primas. Además, según su nivel de desarrollo los propios fabricantes generan guías de diseño que ayudan al cliente a la hora de generar la solución constructiva según requerimientos. Algunos de los fabricantes destacados a nivel internacional corresponden a los siguientes:

- Creative Pultrusions
Pais: Estados Unidos
Fabricación de: perfiles estructurales, paneles macizos, paneles livianos, rejillas, elementos a pedido.
Materiales para perfiles estructurales: Fibra de vidrio; resina de poliéster o vinilester.
Guía de diseño: Pultex® Pultrusion Design Manual

- Strongwell
Pais: Estados Unidos
Fabricación de: perfiles estructurales, paneles macizos, paneles livianos, rejillas, postes, refuerzos para hormigón, elementos a pedido.
Materiales para perfiles estructurales: fibra de vidrio; resina de poliéster o vinilester.
Guía de diseño: Strongwell Design Manual
- Fiberline
Pais: Dinamarca
Fabricación de: perfiles estructurales, placas, paneles livianos, rejillas, elementos a pedido, elementos para turbinas eolicas.
Materiales para perfiles estructurales: sin especificación particular.
Guía de diseño: Fiberline Design Manual
- Top-Glass
Pais: Italia
Fabricación de: perfiles estructurales, placas, paneles livianos, rejillas, elementos a pedido, postes.
Materiales para perfiles estructurales: sin especificación particular.
Guía de diseño: No presenta.
- Fibrolux
Pais: Alemania
Fabricación de: perfiles estructurales, placas, paneles livianos, rejillas, elementos a pedido.
Materiales para perfiles estructurales: fibra de vidrio; resina de poliéster o vinilester.
Guía de diseño: No presenta.

Los fabricantes indicados en muchos casos están agrupados en entidades que buscan potenciar el uso y desarrollo de elementos compuestos, junto con los fabricantes de materias primas. Ejemplo de ello es la EPTA, *European Pultrusion Technology Association* en Europa, y la ACMA, *American Composite Manufacturer Association*.

En Chile, existen al menos dos marcas que fabrican elementos bajo el método de pultrusión, existiendo otras varias dedicadas a la fabricación de elementos en FRP:

- Femoglass
Pais: Chile
Fabricación de: perfiles estructurales, placas, paneles livianos, rejillas.
Materiales para perfiles estructurales: fibra de vidrio; resina de poliéster o vinilester.
Guía de diseño: No presenta.
- Masterfibra
Pais: Chile
Fabricación de: paneles livianos, rejillas.
Materiales para perfiles estructurales: sin confirmación de fabricación
Guía de diseño: No presenta.

Es Femoglas la que presenta en su catálogo perfiles estructurales de FRP fabricados por pultrusión. Por ello, su base de datos de perfiles se tomará como referencia para el diseño de la sala. En comunicaciones vía correo electrónico con personal de Femoglas, indican que tienen como referencia a la empresa estadounidense Strongwell, por lo que se considerará como opción en caso de datos faltantes.

2.2.3 Requisitos en la fabricación de elementos estructurales de FRP

De manera de acotar los requerimientos mínimos que se les solicitan a los perfiles estructurales fabricados bajo el sistema de pultrusión, se han emitido algunos documentos con esta finalidad.

En el contexto europeo, se encuentra la norma EN13706 *Especificaciones para perfiles pultruidos*, que acota los requerimientos mínimos respecto a calidad, tolerancia, fuerza, rigidez y superficie para los elementos estructurales. Los parámetros declarados en este documento para perfiles estructurales son los siguientes:

Tabla 2.1 — Propiedades mínimas requeridas para perfiles estructurales según EN 13706.

	Propiedad mecánica	Unid.	Método de prueba	Valores mínimos	
				Grado E23	Grado E17
1	Módulo de flexión	GPa	Anexo D, EN 13706-2:2002	23	17
2	Módulo de elasticidad (Young) (longitudinal)	GPa	EN ISO 527-4	23	17
3	Módulo de elasticidad (Young) (transversal)	GPa	EN ISO 527-4	7	5
4	Resistencia a la tracción (longitudinal)	MPa	EN ISO 527-4	240	170
5	Resistencia a la tracción (transversal)	MPa	EN ISO 527-4	50	30
6	Resistencia al aplastamiento por perno (<i>pin-bearing</i>) (longitudinal)	MPa	Anexo E, EN 13706-2:2002	150	90
7	Resistencia al aplastamiento por perno(<i>pin-bearing</i>) (transversal)	MPa	Anexo E, EN 13706-2:2002	70	50
8	Resistencia a la flexión (longitudinal)	MPa	EN ISO 14125	240	170
9	Resistencia a la flexión (transversal)	MPa	EN ISO 14125	100	70
10	Resistencia al corte interlaminar (longitudinal)	MPa	EN ISO 14130	25	15

Esta normativa define dos clases según las propiedades mecánicas del elemento, diferenciados principalmente por el módulo de flexión efectiva (*Effective Flexural Modulus*): grado E17

corresponde a los perfiles con módulo entre 17 y 23 GPa, y grado E23 donde el módulo es mayor a 23GPa.

Dentro de la documentación desarrollada por la investigación estadounidense, se encuentra la norma *ASTM D7290-06(2017), Standard Practice for Evaluating Material Property Characteristic Values for Polymeric Composites for Civil Engineering Structural Applications*, la cual define límites mínimos en las propiedades mecánicas de los elementos destinados a uso estructural fabricados en FRP. Los valores definidos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.2 — Propiedades mínimas requeridas para perfiles estructurales según ASTM D7290.

	Propiedad mecánica	Unid.	Método de prueba	Requerimientos mínimos
1	Resistencia a la tracción (longitudinal)	psi (MPa)	ASTM D638	30.000 (207)
2	Resistencia a la tracción (transversal)	psi (MPa)	ASTM D638	7.000 (48)
3	Módulo de elasticidad (Young) (longitudinal, tracción)	psi (GPa)	ASTM D638	3×10^6 (20,6)
4	Módulo de elasticidad (Young) (transversal, tracción)	psi (GPa)	ASTM D638	$0,8 \times 10^6$ (5,5)
5	Resistencia a la compresión (longitudinal)	psi (MPa)	ASTM D6641	30.000 (207)
6	Módulo de elasticidad (longitudinal, compresión)	psi (GPa)	ASTM D6641	3×10^6 (20,6)
7	Módulo de elasticidad (transversal, compresión)	psi (GPa)	ASTM D6641	1×10^6 (6,9)
8	Resistencia al corte	psi (MPa)	ASTM D5379	8.000 (55)
9	Módulo de corte	psi (GPa)	ASTM D5379	$0,4 \times 10^6$ (2,7)
10	Resistencia al corte interlaminar (longitudinal)	psi (MPa)	ASTM D2344	3.500 (24)
11	Resistencia al aplastamiento por perno (<i>pin-bearing</i>) (longitudinal)	psi (MPa)	ASTM D953 ^a	21.000 (145)
12	Resistencia al aplastamiento por perno(<i>pin-bearing</i>) (transversal)	psi (MPa)	ASTM D953 ^a	18.000 (124)

A diferencia de los documentos europeos, no se definen distintos grados o clasificaciones de material, dejando establecido una línea base para definir los materiales como elementos estructurales. Realizando una comparación en las propiedades principales y directamente comparables de cada tabla, se tiene lo siguiente:

Tabla 2.3 — Comparación de requerimientos mínimos según normas EN y ASTM para perfiles FRP.

Propiedad Mecánica	Unid.	EN, valores mínimos		ASTM, valores mínimos
		Grado E23	Grado E17	
Módulo de elasticidad (Young) (longitudinal)	GPa	23	17	21
Módulo de elasticidad (Young) (transversal)	GPa	7	5	6
Resistencia a la tracción (longitudinal)	MPa	240	170	207
Resistencia a la tracción (transversal)	MPa	50	30	48
Resistencia al aplastamiento por perno (<i>pin-bearing</i>) (longitudinal)	MPa	150	90	145
Resistencia al aplastamiento por perno (<i>pin-bearing</i>) (transversal)	MPa	70	50	124
Resistencia al corte interlaminar (longitudinal)	MPa	25	15	24

Según lo anterior, la clasificación de perfiles estructurales en FRP impuesta por la norma ASTM, a nivel de esfuerzos, alcanza los valores mínimos definidos por la norma EN para perfiles estructurales de FRP grado E17. A la inversa, perfiles de grado E17 no son considerados como estructurales bajo la clasificación estadounidense, por lo que se plantea considerar como valores mínimos los indicados por la norma de la ASTM como base para la clasificación de un perfil como estructural, y por ende como valores mínimos de los elementos considerados en el diseño.

2.3 Directrices de Diseño Asociada al Uso de Elementos Estructurales de FRP

2.3.1 Escenario local

Según se ha comentado y revisado, en Chile no hay una oferta considerablemente variada en perfiles estructurales de FRP. Esto resulta visible en la comparación entre catálogos en línea de los fabricantes internacionales (Creative Pultrusions [8] en Estados Unidos o Top Glass [24] en Europa, por ejemplo) y nacionales (Femoglass [11]). Junto a esto, y posiblemente por lo limitado del mercado, los fabricantes locales no han desarrollado guías de diseño para estructuras en perfiles de FRP. Tampoco existen agrupaciones que fomenten el uso e investigación de este tipo de compuestos, a diferencia de lo ejemplificado en el punto 2.2.2 de este documento.

Haciendo revisión de la normativa local, a través de la información presente en el sitio *web* del Instituto Nacional de Normalización (INN), no se visualiza normativa alguna asociada al diseño estructural bajo el uso de elementos de FRP, como elementos directamente estructurales. De hecho, la norma NCh433:2012 Diseño Sísmico de Edificios indica en el punto 1.5 de sus alcances lo

siguiente: “Esta norma es aplicable sólo a materiales o sistemas que tengan una norma técnica de diseño sísmico o que en su defecto se pueda demostrar mediante ensayos cíclicos no lineales, que tienen resistencia y ductilidad equivalente a los requerimientos de esta norma para materiales sísmicos convencionales.”. La norma NCh2369:2003 Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales dentro de su listado de normas de referencia presenta asociaciones principalmente al acero, elemento convencional en las estructuras destinadas al uso industrial, pero deja una ventana para el uso de otros materiales según indica en un punto 4.4.2. Normas Extranjeras; también hace una leve cita en la tabla 5.6 asociada a los valores máximos del factor de modificación de la respuesta, R, donde se presenta un valor para torres de enfriamiento de madera o plástico pero sin especificación alguna. La referencia más cercana a lo que respecta a un uso a nivel estructural de elementos de FRP corresponde a la norma NCh2577:2001 Barras de plástico reforzado con fibras de vidrio, fibras de carbono y fibras aramidas, la cual presenta los requisitos a cumplir por las barras de refuerzo estructural para el concreto fabricadas en FRP, considerando en su confección el uso de fibras de carbono, vidrio o aramidas. Luego de esta normativa, la referencia que se encuentra asociada a elementos de FRP corresponde a la norma NCh3176/1:2009 Tuberías y accesorios de plástico reforzado con fibra de vidrio, para agua potable, la cual corresponde a elementos secundarios, no estructurales. Lo anterior nos lleva a buscar información en el ámbito internacional respecto a normativas o guías para el diseño de estructuras considerando perfiles de FRP.

2.3.2 Escenario internacional

Como se presenta en el punto 2.2.3 de este documento, a nivel internacional encontramos normativa que regula la fabricación de elementos estructurales de FRP, lo que se entiende como la primera base para establecer una normativa de diseño y construcción en función a la fiabilidad de los materiales utilizados para ello.

También como es indicado en el punto 2.2.2, existen varias guías de diseño emitidas por los fabricantes de perfiles estructurales. Punto importante de diferencias entre ellas son los métodos de diseño. Mientras las guías de diseño estadounidenses consideran esfuerzos permisibles (ASD, *Allowable Stress Design*), las guías europeas consideran los estados de límite último (ULS, *Ultimate Limit State*).

En Europa existen además otras guías de diseño de renombre, emitidas por entidades no comerciales. Una de ellas es el documento *EUROCOMP Structural design of polymer composites* (1996), la cual aplica precisamente para compuestos de polímeros reforzados con fibra de vidrio. Este documento fue generado como uno de los proyectos respaldado por la red Eureka que involucra a universidades y empresas de varios países de Europa. Se encuentra también la guía CNR-DT 205/2007, emitida por el *Consiglio Nazionale delle Ricerche*, entidad italiana que se promueve como la estructura pública más grande de investigación en Italia, y que ha operado como consultor del gobierno en lo que a investigación corresponde. Este documento considera la clasificación definida en EN13706-2 para los perfiles estructurales, condición no presente en el documento EUROCOMP por condiciones temporales. En resumen, y en base a lo recopilado, en Europa se cuentan con guías para el diseño de estructuras en base a perfiles de FRP, no así una normativa que rija este proceso.

En Estados Unidos, y ya enfocado de manera directa a definir una norma de diseño, se ha publicado el documento *Pre-Standard for Load & Resistance Factor Design (LRFD) of Pultruded Fiber*

Reinforced Polymer (FRP) Structures (2010) por parte de la ASCE (*American Society of Civil Engineers*) en colaboración conjunta con la ACMA. Este documento adopta como elementos estructurales los que cumplen con los requerimientos mínimos planteados en el documento ASTM D7290, presentados en la tabla 2.2 del presente documento.

Los trabajos anteriormente señalados tienen en parte su origen en las guías de diseño, asociadas directamente a los fabricantes de este tipo de elementos, los cuales tienen la ventaja de presentar las propiedades del elemento según tamaños de sección y tipo de material en base a su catálogo, además de presentar recomendaciones para el diseño.

En resumen, a la fecha no se ha generado una normativa que englobe las condiciones de diseño, pero se ha avanzado hacia ese camino. La normalización en la fabricación de elementos de FRP lleva a definir de mejor manera su comportamiento, además de aumentar la confianza en los elementos adquiridos bajo cierta clasificación. Y las guías de diseño permiten generar proyectos de mediana envergadura, pero que con el pasar de los años entregarán información que permita afinar las consideraciones y terminar en la generación de un estándar de diseño. Para efectos de este trabajo, el diseño de la sala será considerado bajo la pre norma emitida por la ASCE, al considerarla en un escalón superior por el hecho de ser una pre norma, en vez de ser una guía de diseño.

2.4. Anteproyecto de Norma ASCE. Otros Requerimientos a los Elementos Estructurales.

Adicionalmente a los parámetros presentados en la tabla 2.2, los cuales son particulares para los perfiles de FRP, el documento de la ASCE indica requerimientos adicionales a los materiales estructurales compuestos de FRP fabricados bajo el método de pultrusión, los que se mencionan a continuación:

2.4.1 Materiales constituyentes de elementos de FRP

2.4.1.1 Sistema de fibras

- Tipo de fibra: Está permitido el uso de cualquier fibra de vidrio comercial en el sistema polímero, siempre que cumpla con lo especificado en la ASTM D578.
- Forma de la fibra: Está permitido el uso de fibra en varias formas, como hilados, vellón, mantas, tramos, etcétera.
- Orientación de la fibra: Cada parte del elemento de FRP pultruido deberá tener fibras de refuerzo orientadas en al menos dos direcciones, separadas éstas por un mínimo de 30 grados (no aplica para las barras de refuerzo estructural de FRP).
- Arquitectura de la fibra (distribución): La distribución de las fibras en los elementos de pultrusión deberá ser simétrica y balanceada.
- Fracción de volumen de fibra: La fracción de volumen de fibra mínima en cada elemento estructural de pultrusión no deberá ser menos del 30%.
- Porcentaje de orientación de fibra: El porcentaje de fibra continua en cada elemento estructural de FRP pultruido no deberá ser menor al 30% del total del volumen de fibra de reforzamiento en el caso de los perfiles, y no menor al 25% del volumen total de la fibra de reforzamiento en el caso de placas.

- Resistencia mínima a la tensión: El valor característico de los elementos de fibra de vidrio no deberá ser menor a 2.000 MPa.

2.4.1.2 Matriz

- Resina: La resina utilizada para la fabricación de elementos estructurales de FRP, así como también de componentes para edificaciones y otras estructuras deberá ser termoestable de grado comercial.
- Otros materiales constituyentes: Los aditivos a la resina que influyeren en el proceso de fabricación o curado de los elementos de FRP, como lo son los aditivos de protección UV, pigmentos, aceleradores de curado, entre otros deberán ser compatibles con el sistema de fibras y resina.

2.4.2 Propiedades físicas y mecánicas de elementos de FRP pultruidos

Otras propiedades físicas requeridas por el documento de la ASCE en los productos de FRP destinados a uso estructural tienen que ver con la dureza y comportamiento termal. Los requerimientos establecidos son los indicados en la siguiente tabla.

Tabla 2.4 — Propiedades físicas mínimas requeridas para elementos estructurales de FRP.

Propiedad	Requerimiento	Método de prueba	Min. n° de ensayos	COV
Dureza Barcol (*)	> 40	ASTM D2583	5	< 10%
Temperatura de transición vítrea	> 180°F (82°C)	ASTM D4065	5	< 10%
Coefficiente de expansión termal (longitudinal)	< 7,5 x 10 ⁻⁶ in/in/°F (4,2 x 10 ⁻⁶ m/m/°C)	ASTM D696	5	< 10%
Contenido de humedad de equilibrio	< 2%	ASTM D570, §7.4	5	< 10%

(*) Ensayo de medición de dureza por penetración para elementos plásticos y cuyo valor está asociado a la hendidura generada por el equipo de testeo (1 unidad corresponde a 0,0076mm)

Respecto a la durabilidad y efectos de las condiciones ambientales, los materiales deberán ser seleccionados durante el diseño de manera tal que los componentes estructurales sean capaces de tolerar los efectos ambientales a largo plazo en el transcurso de su periodo de servicio.

En este sentido, los materiales y los sistemas complementarios de la estructura deberán considerar los siguientes factores al momento de su definición:

- Criterio de desempeño de la estructura.
- Vida útil y/o de servicio prevista de la estructura.
- Condiciones ambientales estimadas, incluyendo la posibilidad de exposición a solventes alcalinos u orgánicos.
- Medidas de protección.
- Factibilidad de mantenimiento durante su etapa de servicio.

Las consideraciones mencionadas buscan definir un proyecto que tenga el mejor comportamiento posible, bajo el escenario de que los elementos estructurales de FRP pultruidos son sensibles a los efectos de la humedad, temperatura, radiación ultravioleta, corrosión por químicos, y otros efectos ambientales, los cuales pueden resultar en la merma de las propiedades de rigidez y resistencia de los elementos durante a vida útil de la estructura.

Para establecer un grado de comportamiento mínimo ante las condiciones ambientales que pudiesen reducir las propiedades de los elementos, se postulan las siguientes pruebas, en donde como resultado, luego de su aplicación, la muestra no debe perder más allá del 15% de sus valores característicos:

- Prueba bajo agua: Las muestras deben ser sumergidas en agua destilada a una temperatura de $38 \pm 2^{\circ}\text{C}$, para luego ser probadas luego de 1.000 horas de exposición.
- Prueba de ultravioleta y condensación de humedad (envejecimiento acelerado): Las muestras deberán estar expuestas a una radiación ultravioleta de $0,89\text{W}/\text{m}^2/\text{mm}$ por 8 horas a 60°C y a 4 horas de condensación at 50°C , para luego ser probadas dentro de las siguientes 2 horas luego de retiradas de la cámara.
- Agentes alcalinos: Cuando sea requerido, la muestra deberá ser sumergida en una solución saturada de hidróxido de calcio ($\text{pH} \geq 11$) a temperatura ambiente ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$) por 1.000 horas previo al ensayo. El nivel de pH deberá ser monitoreado y la solución mantenida en los parámetros establecidos.

3 Planteamiento Base Sala Eléctrica Prefabricada

3.1 Antecedentes

Una subestación eléctrica corresponde a la materialización física de un nodo de un sistema eléctrico de potencia, en el cual la energía se transforma a niveles adecuados de tensión para su transporte, distribución o consumo, con determinados requisitos de calidad. Está conformada por un conjunto de equipos utilizados para controlar el flujo de energía, y garantizar la seguridad del sistema por medio de dispositivos automáticos de protección. Una subestación puede estar asociada con una central generadora, controlando directamente el flujo de potencia al sistema, con transformadores de potencia convirtiendo la tensión de suministro a niveles más altos o más bajos, o puede conectar diferentes rutas de flujo al mismo nivel de tensión. Algunas veces una subestación desempeña dos o más de estas funciones.



Figura 3.1 – Vista aérea Subestación Eléctrica Calama (fuente: Google Earth).

Dentro de los elementos que conforman una subestación eléctrica y que definen directa o indirectamente su funcionamiento podemos encontrar, sin ser la totalidad, los siguientes:

- Equipamiento eléctrico primario o de maniobra
 - o Interruptores de poder
 - o Desconectores
 - o Transformadores de poder
 - o Transformadores de medida
 - o Pararrayos
 - o Equipamiento complementario (barras de conexión).
- Equipamiento eléctrico secundario
 - o Equipos de control
 - o Equipos de protección

- Equipos de comunicaciones
- Servicios auxiliares
 - Sistemas de respaldo (baterías, generadores)
 - Climatización
 - Iluminación
- Instalaciones de soporte
 - Estructuras altas y bajas
 - Galpones
 - Salas
 - Casetas
 - Canalizaciones

El equipamiento primario generalmente se presenta a la intemperie, manteniendo distancias de seguridad eléctrica en función de las características ambientales y niveles de tensión de la subestación. Nuevas tecnologías han permitido modificar estas consideraciones; los equipos, de estar aislados por su distancia física (*AIS*, del inglés *air insulated substation/switchgear*), se han encapsulado en sistemas aislantes bajo gas SF₆ o hexafloruro de azufre (*GIS*, *gas insulated substation/switchgear*), lo que ha generado una reducción en los tamaños de las subestaciones permitiendo un mejor y óptimo uso del espacio, y para algunos niveles de tensión (< 60kV) la posibilidad de tener los equipos primarios dentro de recintos cerrados. Con esto último, y asociado al nivel de tensión, en la actualidad es posible tener una subestación completa dentro de un edificio, vinculándose con el exterior sólo para sus conexiones a las líneas de distribución.

Salvo algunos componentes propios de los equipos primarios, el equipamiento eléctrico secundario considera a los equipos que funcionan en baja tensión dentro de la subestación. Estos equipos, haciendo la comparación con el cuerpo humano, corresponden al sistema nervioso de la subestación siendo los encargados de su monitoreo, control y protección. Dada la sensibilidad de estos componentes es que se resguardan bajo edificaciones acondicionadas para ello, protegiéndolos de factores climáticos, de factores eléctricos (inducción), de intervenciones no deseadas, entre otras.

3.2 Salas Eléctricas

3.2.1 Métodos de construcción

Enfocándose en las salas eléctricas que protegen equipos de baja tensión, o de media tensión junto a baja tensión, en las subestaciones eléctricas encontramos principalmente dos materialidades de construcción: albañilería y acero.

La construcción en albañilería tiende a ser la opción clásica para este tipo de instalaciones. De materiales generalmente de fácil acceso, de bajo costo, y de uso de mano de obra relativamente especializada, es la solución adoptada en las especificaciones técnicas de las empresas mandantes. Variantes en los insumos, y que se deben considerar en el diseño, se pueden dar según la ubicación geográfica del proyecto, como puede ser el uso de bloques de hormigón en vez de ladrillos de arcilla.



Figura 3.2 – Construcción sala eléctrica. Albañilería confinada (fuente: autor).

El uso de salas de acero en subestaciones viene de la adopción del concepto desde la minería en donde, por motivos de accesibilidad tanto hacia la zona de faena como de materiales de construcción, resulta beneficiosa la implementación de una solución modular y que además genera una disminución en la necesidad de personal en terreno.



Figura 3.3 – Ejemplo construcción en taller de sala prefabricada. Estructura en acero (fuente: autor).



Figura 3.4 – Sala prefabricada en terreno. Estructura en acero (fuente: autor).

Estas salas, llamadas también tipo contenedor o *container*, nacen de la adecuación de contenedores marítimos como salas para equipamiento eléctrico debido a su posibilidad de armado fuera del área de trabajos, relativo fácil traslado y posterior montaje. Según el tipo de equipamiento de las salas, el acceso a éste puede ser interior (personal debe entrar a la sala para su operación) o exterior (acceso a paneles informativos y de control por fuera de la sala). Posteriormente, y producto de las necesidades del mercado, las salas abrieron la opción de ampliarse en tamaño utilizando módulos adosados y conectados entre sí (figura 3.4).



Figura 3.5 – Ejemplo sala eléctrica modular [18].

A la fecha también son construidas salas que mantienen el concepto de contenedor (un armazón de acero y paneles de acero conforman la estructura portante) pero ya con la libertad respecto al dimensionamiento de ésta (fig.3.3).

3.2.2 Equipamiento de salas eléctricas

Independiente de la solución constructiva de las salas, y como es mencionado en el capítulo 1 y en el punto 3.1 de este documento, las salas eléctricas albergan principalmente los siguientes equipos:

- Equipos de media tensión (MV, *medium voltage*, equipos con tensiones entre 1 a 60kV): Comúnmente llamadas celdas, corresponden a equipos aislados en gas SF₆ que agrupan a los diferentes equipos de maniobra, medición y protección necesarios para la distribución de energía. Según las tecnologías del fabricante, nivel de tensión y equipos requeridos, cada celda puede pesar entre 1.000 a 2.000 [kgf].



Figura 3.6 – Ejemplo celdas de media tensión (3 celdas).

Los requerimientos para la instalación de celdas y que afectan al diseño de la sala tienen que ver principalmente al rango de temperaturas de operación (usualmente entre -5°C y 40°C ; promedio diario no mayor a 35°C), y disposición de espacio libre para mantenimiento. Además, se debe considerar que las celdas están mecánica y operacionalmente unidas entre sí, por lo que se deben evitar diferencias entre los puntos de apoyo.

Las dimensiones de las celdas también dependerán de la configuración interna considerada para dar cumplimiento a los requerimientos técnicos y particularmente eléctricos. En el ejercicio de este trabajo, encontramos dos tipos de celdas, las del tipo distribución o *feeder*, conectadas a las líneas de distribución que entran o salen a la subestación; y las del tipo principal (*main*), las cuales enlazan los transformadores de poder de la subestación (donde se realizan los cambios de nivel de tensión) y las diferentes líneas de distribución. Las celdas principales, considerando su posición en el esquema eléctrico, requieren de una mayor capacidad de corriente que las de distribución. Ambos tipos de celdas son presentadas a continuación:

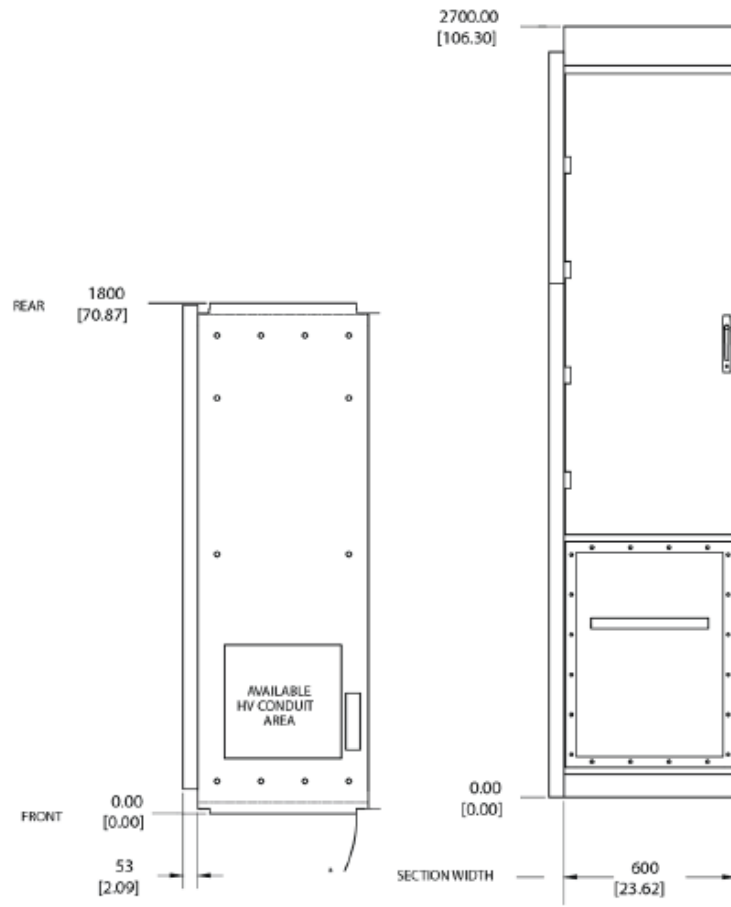


Figura 3.7 – Celda de media tensión, tipo 1 (distribución o *feeder*).

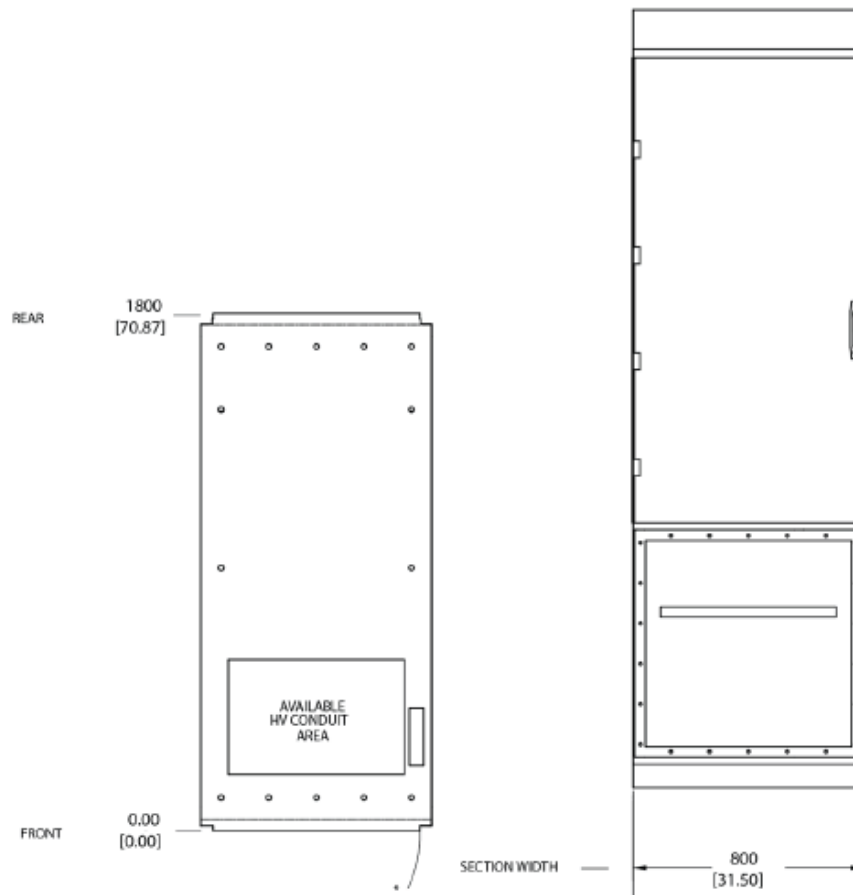


Figura 3.8 – Celda de media tensión, tipo 2 (principal o *main*).

- Equipos de baja tensión (LV, *low voltage*, equipos con tensiones entre 0 a 1kV): Dentro de los equipos de baja tensión dispuestos en la sala eléctrica, podemos distinguir los siguientes:
 - o Equipos de control, protección y comunicaciones: Como su nombre lo indica, corresponden al equipamiento electrónico encargado del monitoreo, accionamiento y enlace entre los mismos equipos de maniobra, y entre éstos y los diferentes niveles de supervisión de las instalaciones. Según requerimientos de la empresa mandante, pueden ser de forma de bastidores (figura 3.8; montaje abierto de equipos) o armarios (figura 3.9; montaje cerrado). Según la cantidad de componentes, los armarios pueden pesar entre 200 a 600 [kgf]. Similar a las celdas, los requerimientos para la instalación tienen que ver principalmente con el rango de temperaturas de operación (usualmente entre -5°C y 40°C), y disposición de espacio libre para mantenimiento y operación (apertura de puertas en el caso de los armarios). Si bien generalmente los armarios y tableros están conectados funcionalmente entre ellos, su conexión es flexible al ser cableada y dispuesta por debajo de estos. Para los armarios sus dimensiones son estándar, salvo condiciones particulares.



Figura 3.9 – Bastidores de control y protecciones (fuente: autor).



Figura 3.10 – Armarios de control y protecciones (fuente: autor).

- Equipos de servicios auxiliares: Equipos encargados de la distribución de alimentación eléctrica (en corriente alterna y/o continua) destinada a los equipos de control y protección, componentes de celdas y otros sistemas como alumbrado, sistemas de protección contra incendios, etc. En ocasiones complementados con servicios de respaldo dispuestos en la misma sala (banco de baterías) o fuera de ella (equipos de generación).

El equipamiento en sala es complementado, según el diseño, con accesorios del tipo bandejas o escalerillas porta-conductores para el orden de los conductores utilizados en la conexión entre armarios y tableros.



Figura 3.11 – Servicios auxiliares. Banco de baterías (izq.); tableros de distribución (der.) (fuente: autor).

3.3 Optimización de la Construcción

A la par con el crecimiento del país, el sistema eléctrico se va expandiendo cada año ya sea por la construcción de nuevas líneas y subestaciones o por el reacondicionamiento de instalaciones ya existentes. Esta situación es fácilmente visible en el norte del país, donde la proliferación de parques energéticos asociados a energías renovables no convencionales (fotovoltaicos, eólicos e incluso termosolar) ha llevado a la necesidad de mejorar las vías de transmisión energética con la finalidad de poder ocupar de la mejor manera la producción de los parques junto con lograr una mayor estabilidad del sistema de transmisión eléctrica.

Este crecimiento ha llevado a buscar optimizaciones en la construcción, de manera de generar una baja en los costos además de garantizar los plazos del proyecto, los cuales son cada vez más acotados y condicionados a diversos hitos. Y en primera instancia, siempre en el marco del cumplimiento de las condiciones del contrato, donde se busca la optimización es en los procesos visibles, tangibles del proyecto. Por ejemplo, es difícil considerar que se obtendrá una optimización del proyecto al enfocarse en reducir los costos de los equipos de control y protección, ya que esto puede llevar a una drástica disminución de la calidad del equipo lo que conlleva a costos futuros asociados a garantías y seguros del proyecto. En cambio, el proceso constructivo (digamos, la obra gruesa de la subestación) es de gestión directa, donde se pueden manejar las variables e ir cuantificando los resultados producto de su modificación. Se busca el óptimo entre tiempo de proyecto y disponibilidad de recursos (humanos, técnicos, etc.) de manera de tener la mayor rentabilidad, esto a ojos del contratista.

Las obras civiles, dentro del proceso de construcción del proyecto de una subestación, caen dentro de las gestiones directas donde se puede optimizar el proyecto. Particularmente en el caso de la construcción de edificaciones de mediano tamaño (salas eléctricas, que están destinadas al resguardo de equipamiento eléctrico y que es el interés de este documento) se visualiza lo que busca ser, y en la mayoría de los casos resulta, una optimización al proyecto.

Como es comentado en los puntos anteriores, las salas eléctricas para subestaciones se construyen en albañilería o en acero. Bajo el desarrollo normal del proyecto, algunas de las ventajas y desventajas de las soluciones en albañilería y en acero son las siguientes:

Tabla 3.1 — Características según sistema constructivo.

	Albañilería	Acero (tipo contenedor)
Ventajas	Metodologías de diseño y construcción altamente probadas.	Su construcción no se condiciona a la posibilidad de entrar a terreno (inicio de fabricación temprana)
	Materiales de fácil adquisición y transporte cuando se está en cercanía a centros urbanos.	Opción de recibir la sala armada en su totalidad, reduciendo tiempos de construcción en terreno.
	Buen comportamiento ante el fuego en caso de generarse.	Opción de trasladar la sala con el equipamiento eléctrico montado, incluso con pruebas realizadas.
	Buen comportamiento térmico.	Estructura de buen comportamiento sísmico.
	Opción de rectificación en terreno	Montaje sencillo.
Desventajas	Requiere de mayor mano de obra en su edificación.	Según envergadura, el transporte puede ser extenso en tiempo y condicionado a permisos.
	Condicionada según acceso al área de obras (obtención de permisos).	Necesidad de equipos mayores para montaje
	Riesgos de ejecución que signifiquen un resultado deficiente.	No es posible de modificar en terreno
	Condiciones climáticas pueden retrasar su construcción	Requiere de un espacio aéreo libre para su montaje; interferencias con instalaciones existentes
		Requiere de componentes adicionales para su protección ante el fuego

En la actualidad, los proyectos de subestaciones eléctricas están considerando sus edificaciones de manera prefabricada en estructuras de acero, como una optimización a los procesos constructivos de manera de disminuir los tiempos de construcción ya que, en su condición de prefabricada, la sala llega directamente al montaje en terreno incluso con su equipamiento interior prácticamente listo para su habilitación en servicio.

En la búsqueda de una nueva optimización en la construcción de salas eléctricas, es que se propone como material estructural el uso de perfiles de FRP estructural, el cual cuenta como ventaja principal el hecho de ser más liviano que el acero (aproximadamente tiene el peso correspondiente al 25-30% del peso del acero). Además de su bajo peso, los materiales de FRP presentan buena resistencia a ambientes agresivos, su tiempo de fabricación es bajo al ser producto de un sistema automatizado, y posee una capacidad de carga que le permite, bajo el adecuado diseño, ser un buen reemplazo de elementos de construcción tradicionales.

Tabla 3.2 — Características construcción en FRP.

	FRP
Ventajas	Reducción de peso en los elementos estructurales.
	Elemento dieléctrico y aislante
	Buen comportamiento ante ambientes ácidos.
	Relación resistencia/peso mayor que el acero.
	Bajo nivel de mantenimiento
Desventajas	Elemento de menor módulo de elasticidad que el acero
	Limitado en su conectividad (uso de uniones mecánicas)
	Elementos frágiles, no plásticos.
	Poca experiencia en diseño, comportamiento sísmico y/o implementación
	Según solicitaciones, puede resultar en dimensiones mayores que las consideradas para el acero.

Con la finalidad de comparar las soluciones en acero y FRP, se toma como base un diseño existente en acero para una sala eléctrica prefabricada. Según las dimensiones de esta sala se proyecta una estructura utilizando perfiles de FRP, de manera que cumpla con las mismas solicitaciones de espacio y mecánicas establecidas para la sala original.

3.4 Especificaciones para Sala de Perfiles FRP

La sala prefabricada en acero elegida como referencia corresponde a un proyecto efectivamente ejecutado como parte de los trabajos de ampliación de la subestación eléctrica Calama, según los requerimientos establecidos en el proceso licitatorio asociados al Decreto Exento N°418 de 2017 del Ministerio de Energía. Las dimensiones de esta sala, y que son replicadas para la solución en FRP, se presentan a continuación:

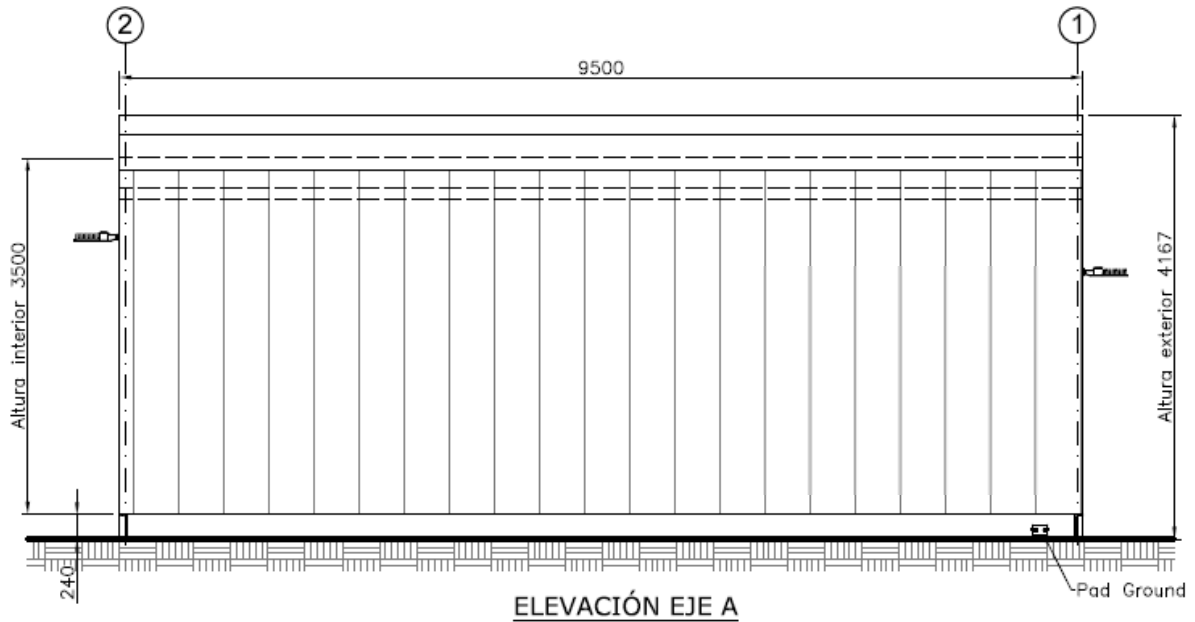


Figura 3.12 – Sala eléctrica. Diseño base (solución en acero).

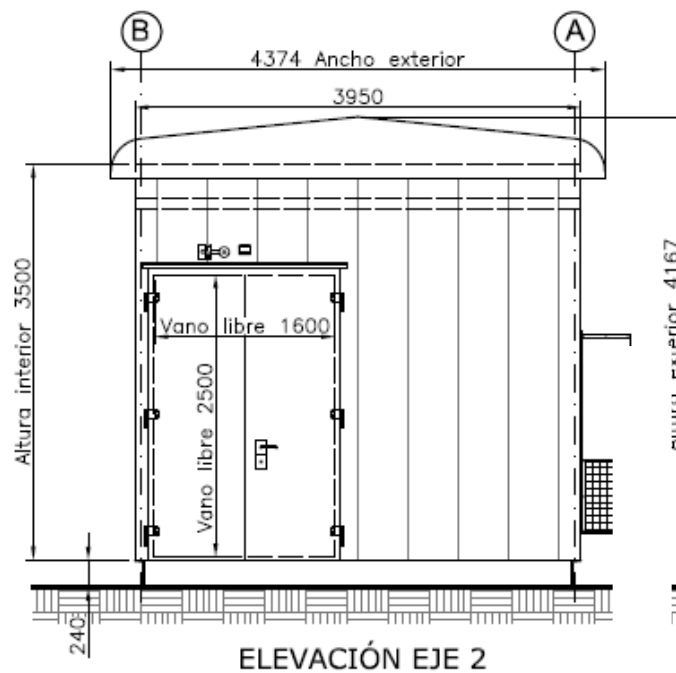


Figura 3.13 – Sala eléctrica. Diseño base (solución en acero).

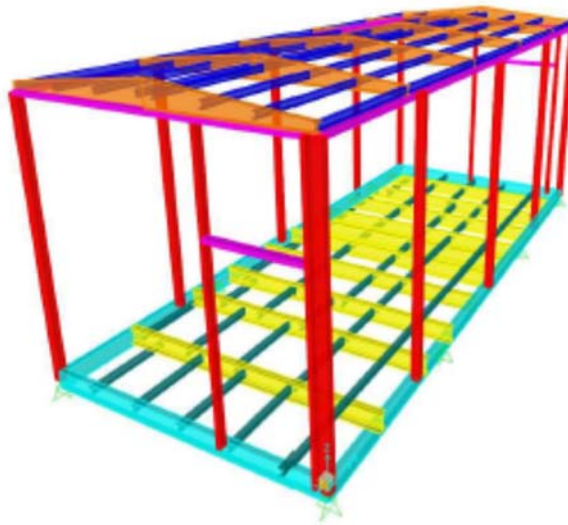


Figura 3.14 – Croquis estructura sala eléctrica. Diseño base (solución en acero).

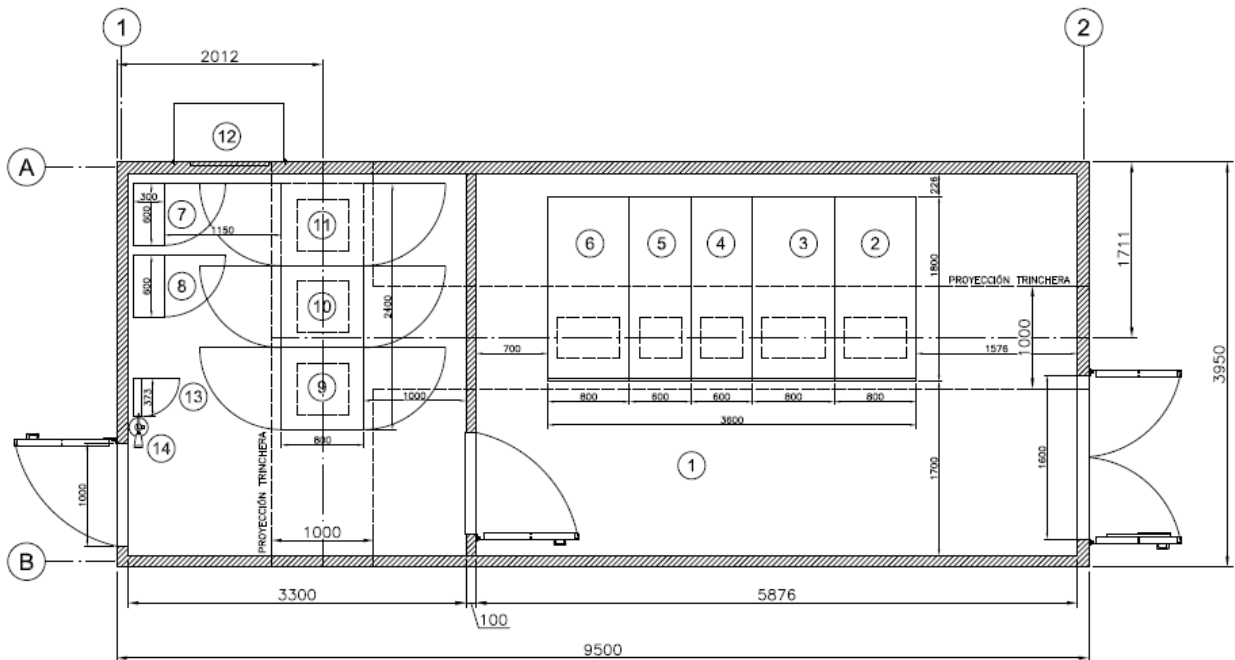


Figura 3.15 – Sala eléctrica. Diseño base (solución en acero) – Planta de distribución.

En atención a lo planteado en la figura 3.12, los equipos contemplados dentro de la sala corresponden a los siguientes (numeración según figura):

- 1 (engloba a los elementos 2, 3, 4, 5, 6): Celdas de media tensión según la descripción presentada en 3.2.2. La configuración del proyecto considera celdas distribuidoras (marcadas en la figura como 4 y 5) y celdas principales (correspondientes a 2,3 y 6).
- 9, 10, 11: Armarios de control y protecciones, definidos para y según proyecto.
- 7, 8, 13: Tableros de servicios auxiliares; panel de sistema detección de incendios.

De los elementos mencionados, son las celdas de media tensión y los armarios de control y protecciones los que aportan mayor carga a la sala. Las características generales de estos equipos son las siguientes:

- Celdas (conjunto)
 - o Altura: 2.700mm
 - o Largo (frente): 3.600mm
 - o Ancho (fondo): 1.800mm
 - o Peso: 7.720kg
- Armarios control y protección (cada uno)
 - o Altura: 2.200mm
 - o Largo (frente): 800mm
 - o Ancho (fondo): 800mm
 - o Peso: 600kg

Además de las cargas definidas por el equipamiento de la sala, se consideran en el diseño lo establecido por los siguientes documentos:

- *Pre-Standard for Load & Resistance Factor Design (LRFD) of Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures* (según lo señalado en el punto 2.3.2 de este documento) [1]
- NCh3171:2010 – Diseño Estructural disposiciones generales y combinaciones de carga. [2]
- NCh2369:2003 – Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales [3].
- NCh1537:2009 - Diseño estructural – Cargas permanentes y sobrecargas de uso [4].
- NCh432:2010 – Diseño estructural – Cargas de viento. [5]

En caso de diferencias entre los factores de ponderación de cargas entre la pre norma [1] y las normativas nacionales, se mantendrán los factores indicados en la normativa nacional.

También se considera que para la base o chasis de la estructura se debe diseñar para soportar una carga pareja mínima de 1.000 [kgf/m²]. además del peso propio de paredes y techo.

El techo tendrá una pendiente de 5% para el escurrimiento de aguas y cualquier otro material, se deberá colocar un aislamiento de lana mineral de 50mm de espesor (mínimo) o equivalente, y será diseñado para soportar al menos una carga de 100 [kgf/m²], y el peso de una persona de 125 [kgf] en cualquier punto.

El proyecto que considera la sala prefabricada en acero es contemplado en cercanías de la ciudad de Calama, Región de Atacama. Esta ubicación define las características ambientales a las que se enfrenta la sala, las cuales se adoptan para el diseño en FRP. Algunas de ellas presentadas en la siguiente tabla:

Tabla 3.3 — Características ambientales en ubicación de proyecto, Calama.

Clima	Desértico
Altura máxima de la instalación sobre el nivel del mar	2.600 msnm
Temperatura máxima del aire ambiente	40°C
Temperatura media máxima del aire	35°C
Temperatura mínima del aire ambiente	-10°C
Humedad relativa	80%
Velocidad del viento máxima	100 km/h
Velocidad del viento sostenida	80 km/h
Nivel de contaminación según IEC 60815	IV

Particularmente como consideración para las cargas de viento, y según se indica en la norma NCh432:2010, se considerará una velocidad básica de viento de 36,8 m/s, equivalente a 132,5 km/h. En su diseño y fabricación se deberá considerar el manejo, su carguío, transporte, ensamblado e instalación posterior en terreno, empleando las medidas normales para el montaje electromecánico, tales como grúas horquillas o grúas pluma, para su izado y transporte.

Las estructuras principales de las salas prefabricadas, deberá estar diseñada para soportar sin daños los esfuerzos mecánicos provocados por el transporte, movimientos sísmicos, y su montaje en obra.

A nivel estructural se considera en el diseño de la sala eléctrica la utilización de perfiles estructurales pultruidos de FRP, considerando los valores de propiedades mecánicas definidas en [1] y presentados en la tabla 2.2 como mínimos a considerar en los elementos que se utilicen de manera estructural, algunas de las cuales se indican a continuación:

Tabla 3.4 — Propiedades elementos estructurales FRP [1].

Propiedades	Valor
Resistencia a la tracción, axial	207 MPa
Módulo de Elasticidad, axial	20.685 MPa
Resistencia a la compresión, axial	207 MPa
Módulo de compresión, axial	20.685 MPa
Resistencia a la flexión, axial	207 MPa
Resistencia al corte, transversal	55 MPa
Módulo de Corte, transversal	2.758 MPa
Resistencia al corte, interlaminar	24 MPa
Densidad	1.800 kg/m ³

La definición de perfiles de FRP se limitará al uso de perfiles de doble simetría (tipo I o H), y al uso de canales (tipo C).

En caso de que las opciones bajo el uso de perfiles pultruidos de FRP no cumplan con los requerimientos del proyecto, se analizará el uso de elementos de acero como reemplazo.

Como revestimiento se considera el uso de elementos tipo Isowall de Cintac [10], con un peso estimado de 15 kg/m².

Las conexiones apernadas consideran el uso de pernos ASTM A325 o ASTM A307, según recomendaciones establecidas en [1].

4 Diseño de Sala en Perfiles de FRP

La sala diseñada bajo el uso de elementos FRP se ha planteado como una estructura de marcos resistentes, a diferencia del caso original con solución en acero la cual es del tipo contenedor, diferenciándose principalmente en que sus paredes son consideradas rígidas y parte del sistema portante de cargas. La razón del cambio se atribuye a la búsqueda de disminuir el peso de la sala, en cuyo caso original el revestimiento tiene una participación no despreciable.

4.1 Estados de Carga

4.1.1 Peso Propio (D [ASCE]; CP [NCh])

En el modelo estructural se considera como peso propio todo su componente estructural, junto con los revestimientos. Además, se considera el peso de los equipos montados (armarios, celdas de media tensión) junto con un adicional por instalaciones secundarias (escalerillas, peso de cables). Como referencia, se indican algunos datos asociados al peso propio:

- Estructura:
 - γ_{FRP} : 1.800 kg/m³
 - γ_{ACERO} : 7.850 kg/m³
- Revestimiento de techo, muros : 15 kg/m²
- Celdas media tensión : 7.715 kg (equivalente aprox. 1.190 kg/m²)
- Armarios control y protección : 1.800 kg (equivalente aprox. 800 kg/m²)

4.1.2 Sobrecarga de Techo (Lr)

Se establece una sobrecarga de techo $L_r = 100 \text{ kgf/m}^2$ según [4]. Dicha sobrecarga descarga como carga uniformemente distribuida sobre el área de techo. No se consideran factores de reducción de carga indicados en la norma señalada a modo de holgura de diseño.

4.1.3 Sobrecarga de Uso (L [ASCE]; SC [NCh])

La sobrecarga de uso en el piso base (chasis) es de 1.000 kgf/m^2 , bajo la consideración de traslados de los propios equipos al interior de la sala, ya sea por recambio o mantención. Se incluye en toda la superficie del chasis de la estructura que no se encuentre cubierta por equipos.

4.1.4 Sismo (E)

De acuerdo con lo señalado en [3], el corte basal queda definido por la siguiente expresión:

$$Q_0 = C \cdot I \cdot P$$

Donde:

Q_0 : Esfuerzo de corte basal

C: Coeficiente Sísmico

I: Parámetro en función de la categoría del edificio

P: Peso de la estructura

Para el cálculo del Coeficiente Sísmico, la norma indicada presenta la siguiente expresión:

$$C = \frac{2,75 \cdot A_0}{g \cdot R} \cdot \left(\frac{T'}{T^*}\right)^n \cdot \left(\frac{0,05}{\varepsilon}\right)^{0,4}$$

Donde:

A_0 = Aceleración efectiva

R = Factor de modificación de respuesta, $R = 3$

ε = Razón de amortiguamiento.

T^* = periodo fundamental de vibración, resultante del análisis estructural

T' , n = parámetros relativos al tipo de suelo

En base a lo indicado en el punto 4.1, relativo a la ubicación geográfica proyectada para la sala, se considera que está emplazada en Zona Sísmica 2, por lo que la aceleración efectiva corresponde a:

$$A_0 = 0,30g, \text{ con } g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

En revisión a lo indicado en la tabla 5.5 de [3], y en consideración a que los elementos pultruidos de FRP no están contemplados de manera directa en la norma, se considera un valor de razón de amortiguamiento de

$$\varepsilon = 0,02$$

En consulta a la tabla 5.6 de NCh2369, considera el material plástico solamente para las torres de enfriamiento y les asigna $R=4$. Por otro lado, la tabla indica para las estructuras no incluidas o asimilables a las de las categorías de la lista se deberá considerar un valor de $R=2$. Considerando esos dos límites y que los niveles de desempeño de la Sala Eléctrica deberían ser superiores a los de una torre de enfriamiento, se considerará para la sala:

$$R = 3$$

De lo anterior, resulta un valor de coeficiente sísmico y un valor de coeficiente sísmico máximo lo siguiente:

$$C = 0,48 \qquad C_{MAX} = 0,59$$

El tipo de instalación se clasifica como categoría C1, estructura esencial, según lo indicado en 4.3 de [3], lo que resulta en un valor del coeficiente de importancia I igual a:

$$I = 1,20$$

Resultante del análisis estructural y la definición de materiales y formas, resultan los siguientes valores para el periodo fundamental y peso de la estructura:

$$P_{EST+EQ} = 23.096 \text{ kgf}$$

$$P_{SC} = 18.762 \text{ kgf}$$

$$P_{TOT} = 41.808 \text{ kgf}$$

$$T^* = 0,347 \text{ s}$$

Con los parámetros anteriores, el esfuerzo de corte basal tiene un valor de:

$$Q_0 = 22.090 \text{ kgf}$$

Y la distribución de fuerzas según se indica en la tabla 4-3:

Tabla 4.1 — Distribución de fuerzas sísmicas.

Ítem	Z_k [m]	P_k [kgf]	A_k	F_k [kgf]
Sobrecarga	0,24	18.760,0	0,093	3.084,0
Equipos	1,00	10.355,0	0,394	7.238,0
Estructura	1,36	12.930,0	0,513	11.768,6

, según las siguientes expresiones:

$$F_k = \frac{A_k \cdot P_k}{\sum_1^n A_j \cdot P_j} \cdot Q_0$$

$$A_k = \sqrt{1 - \frac{Z_{k-1}}{H}} - \sqrt{1 - \frac{Z_k}{H}}$$

4.1.5 Viento (W)

Según lo indicado en NCh432:2010 [5], se utilizará el procedimiento analítico en estructuras cerradas para la definición de las presiones de viento en la estructura, en cumplimiento a las condiciones presentadas en el punto 7.1 de dicha normativa. Las presiones de viento para el sistema principal resistente a las fuerzas del viento (SPRFV) se determinan con la siguiente ecuación:

$$p = q \cdot G \cdot C_p - q_i \cdot (GC_{pi})$$

Donde:

q = distribución de velocidades

G = factor de efecto ráfaga

C_p = coeficiente de presión externa

GC_{pi} = coeficiente de presión interna

q_i = distribución de velocidades para la determinación de la presión interna (en este caso, igual a q)

La distribución de velocidades es definida por la siguiente ecuación:

$$q = 0,613 \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot K_d \cdot V^2 \cdot I$$

Donde:

K_z = coeficiente de exposición

K_{zt} = factor topográfico

K_d = coeficiente de direccionalidad del viento

I = factor de importancia

V = velocidad básica del viento

Los valores para cada parámetro según las indicaciones de [5] son los siguientes:

$$K_z = 0,85$$

$$K_{zt} = 1$$

$$K_d = 0,85$$

$$I = 1,15$$

$$V = 36,8 \text{ m/s}$$

resultando en una distribución de velocidades de:

$$q = 690 \text{ N/m}^2 = 69,4 \text{ kgf/m}^2$$

Los restantes parámetros para la presión de viento quedan definidos como sigue, en base a lo indicado en [5]:

$$G = 0,85$$

$$CG_{pi+} = 0,18$$

$$CG_{pi-} = -0,18$$

Los valores de los coeficientes de presión externa se obtienen para cada dirección de análisis (x, y). Para el viento en dirección normal a la cara más ancha de la sala (y), los valores de presión externa corresponden a:

$$L = 3,95 \text{ m (ancho de pared paralela a la dirección del viento)}$$

$$B = 9,50 \text{ m (ancho de pared normal a la dirección del viento)}$$

$$h = 3,86 \text{ m (altura media del techo)}$$

$$L/B = 0,42$$

$$h/L = 0,98$$

$$C_{P_barl} = 0,8 \text{ (Coeficiente de presión externa - muro a barlovento)}$$

$$C_{P_sota} = 0,5 \text{ (Coeficiente de presión externa - muro a sotavento)}$$

$$C_{P_lat} = -0,7 \text{ (Coeficiente de presión externa - muro lateral)}$$

$$C_{P_tbmax} = -1,3 \text{ (Coeficiente de presión externa máx. - techo a barlovento)}$$

$$C_{P_tbmin} = -0,18 \text{ (Coeficiente de presión externa mín - techo a barlovento)}$$

$$C_{P_ts} = -0,7 \text{ (Coeficiente de presión externa - techo a sotavento)}$$

Con los valores anteriores, se obtienen las siguientes presiones de viento cuando éste es normal al lado ancho de la sala:

Tabla 4.2 — Presiones de viento, dirección normal a muro más ancho.

Casos		Presiones de viento, muro N/m ²			Presiones de viento, techo N/m ²		
		p_{tbmax}	p_{tbmin}	p_{ts}	p_{mbarl}	p_{msota}	p_{mlat}
1	CG_{pi+}	344,9	-417,3	-534,6	-886,3	-229,7	-534,6
2	CG_{pi-}	593,2	-169,0	-286,2	-638,0	18,6	-286,2

Para el viento en dirección normal a la cara menos ancha de la sala (x), los valores de presión externa corresponden a:

$L = 9,50\text{m}$ (ancho de pared paralela a la dirección del viento)

$B = 3,95\text{ m}$ (ancho de pared normal a la dirección del viento)

$h = 3,86\text{ m}$ (altura media del techo)

$L/B = 2,41$

$h/L = 0,41$

$C_{P_barl} = 0,8$ (Coeficiente de presión externa - muro a barlovento)

$C_{P_sota} = 0,5$ (Coeficiente de presión externa - muro a sotavento)

$C_{P_lat} = -0,7$ (Coeficiente de presión externa - muro lateral)

Con los valores anteriores, se obtienen las siguientes presiones de viento cuando éste es normal al lado ancho de la sala:

Tabla 4.3 — Presiones de viento, dirección normal a muro menos ancho.

Casos		Presiones de viento, muro N/m ²		
		p_{tbmax}	p_{tbmin}	p_{ts}
1	CG_{pi+}	344,9	-417,3	-534,6
2	CG_{pi-}	593,2	-169,0	-286,2

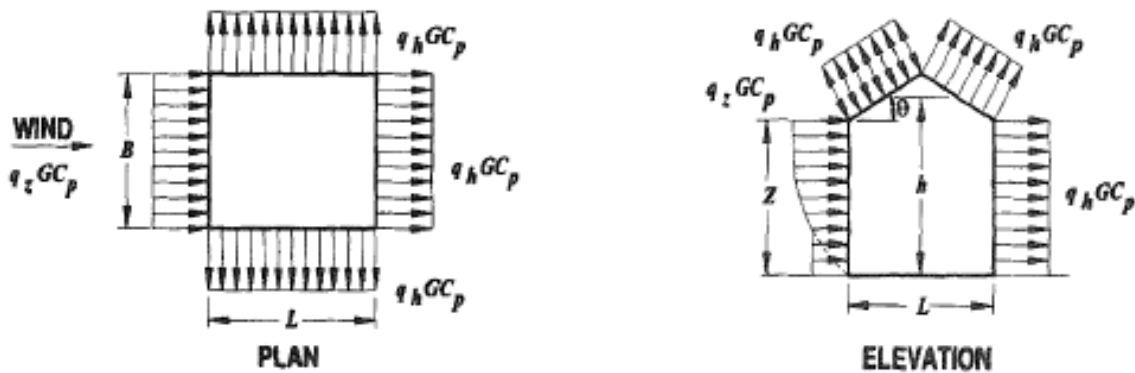


Figura 4.1 – Presiones de viento (externas).

4.1.6 Izaje

Se considera a modo más desfavorable que todos los equipos se encuentran instalados dentro del sistema al momento de realizar la maniobra. Se amplifica la carga de levante por un factor de impacto el cual incrementa el peso total de la estructura en 2 veces, de manera de representar aceleraciones y desplazamientos ocurridos al modelar una maniobra dinámica de manera estática.

4.1.7 Combinaciones de carga

En función al documento *Pre-Standard for Load & Resistance Factor Design (LRFD) of Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures* [1] considerada para el diseño de la sala eléctrica, y a las normativas nacionales que definen combinaciones de carga para el diseño de estructuras [2] [3], se consideran las siguientes combinaciones de carga:

Tabla 4.4 — Combinaciones de carga según antenorma ASCE y NCh3171:2010.

Combinaciones según anteproyecto de norma ASCE	Combinaciones según NCh3171:2010	Combinaciones a considerar
1.4D	1.4D	1.4D
1.2D + 1.6L + 0.5(Lr or S or R)	1.2D + 1.6L + 0.5(Lr or S or R)	1.2D + 1.6L + 0.5(Lr or S or R)
1.2D + 1.6(Lr or S or R) + (0.5L or 0.5W)	1.2D + 1.6(Lr or S or R) + (1.0L or 0.8W)	1.2D + 1.6(Lr or S or R) + (1.0L or 0.8W)
1.2D + 1.0W + 0.5L + 0.5(Lr or S or R)	1.2D + 1.6W + 1.0L + 0.5(Lr or S or R)	1.2D + 1.6W + 1.0L + 0.5(Lr or S or R)
1.2D + 1.0E + 0.5L + 0.2S	1.2D + 1.4E + 1.0L + 0.2S	1.2D + 1.4E + 1.0L + 0.2S
0.9D + 1.0W	0.9D + 1.6W	0.9D + 1.6W
0.9D + 1.0E	0.9D + 1.4E	0.9D + 1.4E

Adicionalmente y según lo indicado en [1], se revisan estados de carga asociados a la serviciabilidad del edificio, según se indica:

$$D + (L \text{ or } 0.5S)$$

$$D + 0.5L + 0.4W$$

$$D + 0.5L$$

Finalmente, para efectos de izaje, se considera:

$$2D$$

Otras combinaciones de carga, en particular las indicadas en el punto 4.5 de NCh2369:2003 [3] se consideran cubiertas por las combinaciones previamente presentadas.

4.2 Diseño Sala en FRP

4.2.1 Modelo computacional

Para el análisis de la estructura se construye un modelo computacional tridimensional, en el que se incorporan los perfiles estructurales, las planchas y las solicitaciones. La estructura considera apoyos fijos (restricción de desplazamiento horizontal y vertical) en los puntos donde se ancla la estructura.

Para el caso de los elementos no estructurales, su peso es incorporado como cargas distribuidas en los elementos soportantes, haciendo que el peso total declarado en los planos del proyecto sea el mismo que se obtiene en la modelación computacional.

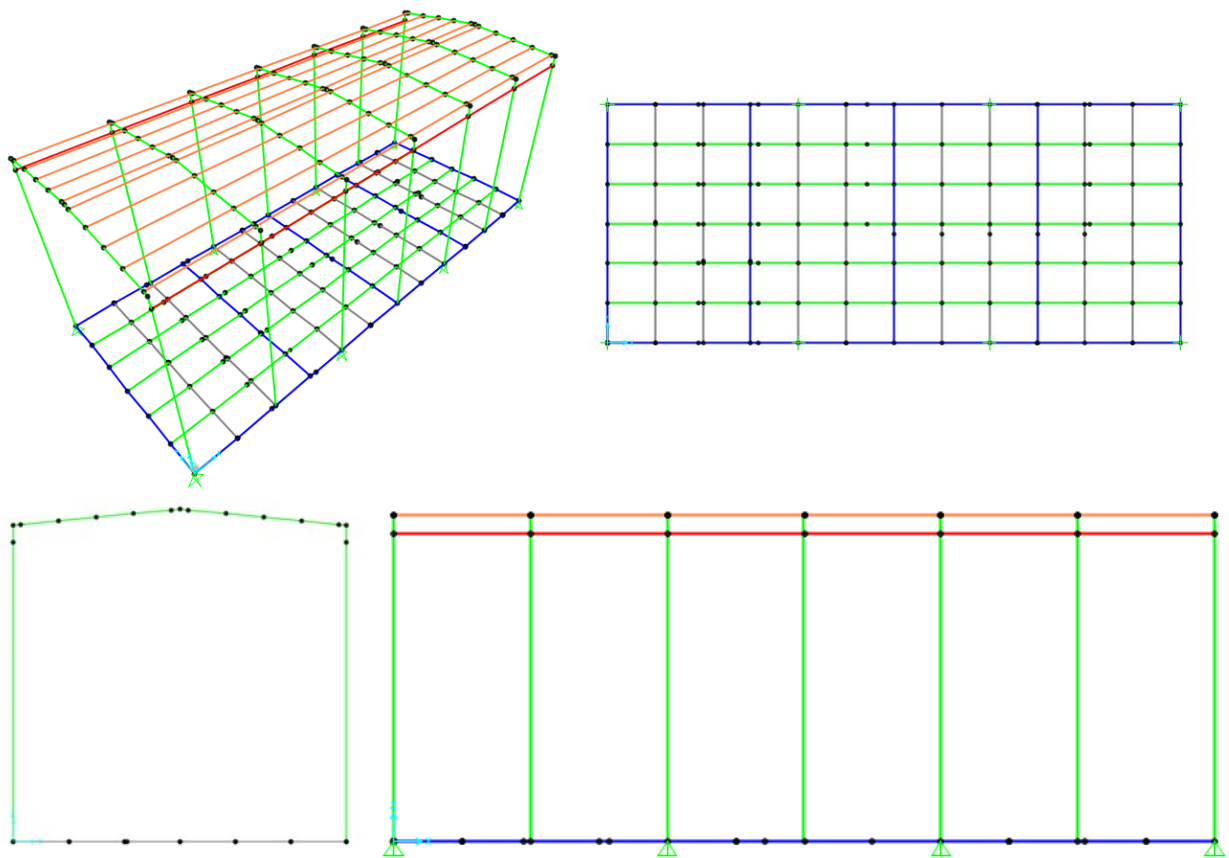


Figura 4.2. Modelo computacional.

De manera de revisar un comportamiento general de la estructura, y no particularmente enfocado en replicar exactamente la sala utilizada de modelo, se han realizado las siguientes consideraciones:

- Los elementos del chasis se han dispuesto de manera simétrica y equiespaciada, sin ser preciso con respecto a la posición final de los equipos en su interior.
- La sala original se concibe del tipo contenedor, donde sus paredes tienen una participación estructural. El nuevo modelo se concibe como una estructura de marcos, de manera de buscar una disminución en el peso de la estructura.

4.2.2 Diseño por factores de carga y resistencia. Requerimientos de anteproyecto de norma para el diseño de elementos.

4.2.2.1 Resistencia de diseño

La resistencia de diseño deberá ser calculada como el producto de la resistencia nominal, R_n , ajustada por las condiciones de disposición final, un factor de resistencia, ϕ , y un factor de efectos de tiempo, λ :

$$R_u \leq \lambda \phi R_n \quad (4-1)$$

$$R_n = R_0 C_1 C_2 \dots C_n \quad (4-2)$$

en donde R_0 corresponde a la resistencia referencial, y C_i corresponden a los factores de ajuste que define el documento. Para el factor de efectos de tiempo λ , su definición depende del estado de carga según se indica en la siguiente tabla:

Tabla 4.5 — Valores de λ según anteproyecto de norma ASCE (extracto).

Combinación de carga	Factor de efecto de tiempo, λ
1,4D (cargas permanentes)	4
1,2D + 1,6L + 0,5(Lr o S o R)	0,8 cuando L es por ocupación 0,6 cuando L es por almacenamiento 1,0 cuando L es por impacto
1,2D + 1,6(Lr o S o R) + (0,5L o 0,5W)	75
1,2D + 1,0W + 0,5L + 0,5(Lr o S o R)	10
1,2D + 1,0E + 0,5L + 0,2S	10
0,9D + 1,0W	10
0,9D + 1,0E	10

El factor de resistencia ϕ es definido según caso de análisis (tracción, compresión, flexión, etc.). Los factores de ajuste de la resistencia nominal, C_i , están establecidos según sean las condiciones finales de uso de los elementos y asociados a su materialidad (matriz), y según condiciones de agrupamiento en la estructura. Para el caso de condición final, se tiene:

- C_M = factor de condición de humedad, en caso de que sea constante durante la etapa en servicio.
- C_T = factor de temperatura, en caso de que sea constante una temperatura mayor a 38°C durante la etapa en servicio.
- C_{CH} = factor por ambiente químicamente agresivo.

En consideración a la ubicación geográfica del proyecto (baja humedad), al tipo de instalación (temperaturas controladas para los equipos interiores) y condiciones de servicio (no se prevé un ambiente químicamente agresivo), estos factores serán considerados con valor 1. En caso de que el proyecto que se esté estudiando amerite su consideración, los valores son los siguientes:

Tabla 4.6 — Valores para C_M y C_T (extracto).

Propiedad	Factor por humedad C_M	Factor por temperatura ($^{\circ}\text{C}$) C_T ($38 < T \leq 60$)
Matriz de vinilester		
Resistencia	0,85	$1,44 - 0,014T$
Módulo de elasticidad	0,95	$1,31 - 0,011T$
Matriz de poliéster		
Resistencia	0,80	$1,58 - 0,018T$
Módulo de elasticidad	0,90	$1,44 - 0,014T$

El valor de C_{CH} debe ser calculado según las pruebas dictadas por la ASTM C581.

Según las condiciones de agrupamiento, se establecen los siguientes factores:

- C_{LS} = factor de distribución de carga (modifica la resistencia al momento), igual a 1,2 para pisos, muros y techos en que la carga esté uniforme distribuida, los elementos estén espaciados más de 610mm y sean al menos 3, unidos por algún elemento que permita la buena distribución de la carga.
- C_{CA} = factor de acción conjunta (modifica la rigidez referencial), igual a 1,2 para el cálculo de las deflexiones ante cargas uniformemente distribuidas, los elementos estén espaciados más de 610mm y sean al menos 3, unidos por algún elemento que permita la buena distribución de la carga.

Para efectos de este trabajo, estos factores se mantendrán igual 1,0, sin amplificar las propiedades de los elementos.

4.2.2.2 Resistencia de elementos a tracción

Los elementos a tracción deben cumplir con:

$$P_u \leq \lambda \phi P_n \quad (4-3)$$

donde:

P_u = resistencia axial a la tracción requerida.

P_n = resistencia axial a la tracción, nominal, incluyendo los factores de ajuste indicados en 4.2.2.1 según aplique.

λ = factor de efecto de tiempo, según lo indicado en tabla 4.5

ϕ = factor de resistencia a la falla por ruptura de la sección, igual a 0,65

La resistencia nominal se define como la menor de los siguientes casos:

$$P_n = F_n A_g \quad (4-4)$$

$$P_n = 0,7 F_n A_e \quad (4-5)$$

Donde:

F_n = Resistencia nominal a la tracción.

A_g = Área de la sección bruta del elemento.

A_e = Área neta efectiva de la sección.

4.2.2.3 Resistencia de elementos a compresión

Los elementos a compresión deberán ser diseñados de manera que:

$$P_u \leq \lambda \phi_c P_n \leq 0,7 \lambda F_L^c A_g \quad (4-6)$$

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g \quad (4-7)$$

$$P_s \leq \phi_0 A_g \frac{\pi^2 E_L}{\left(\frac{KL_e}{r}\right)^2} \leq 0,3 F_L^c A_g \quad (4-8)$$

donde:

P_u = resistencia a la compresión requerida.

λ = factor de efecto de tiempo, según lo indicado en tabla 4.5

P_n = resistencia a la compresión nominal.

$\phi_c F_{cr}$ = tensión crítica ponderada por factor de resistencia.

P_s = Fuerza de compresión definida por las combinaciones de carga de serviciabilidad.

A_g = Área completa de la sección del elemento.

E_L = Valor característico del módulo de elasticidad a compresión de ala o alma del elemento (menor valor)

F_L^c = resistencia a la compresión longitudinal mínima entre los elementos de la sección.

KL_e/r = razón de esbeltez del elemento a compresión.

ϕ_0 = factor de reducción asociada a la desviación de rectitud del elemento, definido como:

$$\phi_0 = 1 - 500 \frac{\delta_0}{L} \quad (4-10)$$

donde:

δ_0/L = corresponde a la razón de rectitud garantizada por el fabricante.

El esfuerzo crítico ponderado, correspondiente al término $\phi_c F_{cr}$, se debe determinar para los perfiles simétricos del tipo I como sigue:

$$F_{crx} = \frac{\pi^2 E_L}{\left(\frac{K_x L_x}{r_x}\right)^2} \quad y \quad \phi_c = 0,7 \quad (4-11)$$

$$F_{cry} = \frac{\pi^2 E_L}{\left(\frac{K_y L_y}{r_y}\right)^2} \quad y \quad \phi_c = 0,7 \quad (4-12)$$

$$F_{crf} = \frac{GLT}{\left(\frac{b_f}{2t_f}\right)^2} \quad y \quad \phi_c = 0,8 \quad (4-13)$$

$$F_{crw} = \frac{\left(\frac{\pi^2}{6}\right) [\sqrt{E_{L,w} E_{T,w}} +] v_{LT}}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2} \quad y \quad \phi_c = 0,8 \quad (4-14)$$

donde:

F_{cry} = tensión de pandeo flexo torsional sobre el eje x

F_{cxy} = tensión de pandeo flexo torsional sobre el eje y

F_{crf} = tensión de pandeo local del ala

F_{crw} = tensión de pandeo local del alma

K_x = factor de largo efectivo correspondiente al eje x

K_y = factor de largo efectivo correspondiente al eje y

L = longitud no apoyada lateralmente del elemento

r = radio de giro que controla el pandeo

E_L = módulo de elasticidad longitudinal del ala o alma (el de menor valor)

$E_{T,w}$ = módulo de elasticidad transversal del alma (perpendicular a la dirección de pultrusión)

ν_{LT} = módulo de Poisson del alma asociado a la deformación transversal cuando la compresión es aplicada en dirección longitudinal

G_{LT} = Modulo de corte en el plano

4.2.2.4 Resistencia de elementos a flexión

Cuando producto de las cargas transversales se genere flexión en torno al eje neutro, los elementos deberán ser diseñados considerando:

$$M_u \leq \lambda \phi M_n \quad (4-15)$$

donde:

M_u = Resistencia a la flexión requerida (N-mm)

ϕ = factor de resistencia a la flexión

λ = factor de efecto de tiempo, según lo indicado en tabla 4.5

M_n = resistencia nominal a la flexión, incluyendo los factores de ajuste indicados en 4.2.2.1 según aplique (N-mm)

El término ϕM_n se define como la menor resistencia obtenida del análisis de estado límite asociado a la ruptura del material, pandeo local, y pandeo flexo torsional, según sigue:

Resistencia nominal a la flexión – Ruptura de material

Para este caso, el valor de la resistencia a la flexión se debe considerar $\phi = 0,65$.

La resistencia a la flexión, se calcula según 4-16:

$$M_n = \min \left(\frac{F_{L,f}(E_{L,f}I_f + E_{L,w}I_w)}{y_f E_{L,f}}, \frac{F_{L,w}(E_{L,f}I_f + E_{L,w}I_w)}{y_w E_{L,w}} \right) \quad (4-16)$$

En caso de que el módulo de elasticidad del ala y alma no difieran en más del 15% uno del otro, 4-16 se puede reducir a:

$$M_n = \frac{F_L I}{y} \quad (4-17)$$

donde:

- $F_{L,f}$ = tensión longitudinal del ala (en tracción o compresión) (MPa)
- $F_{L,w}$ = tensión longitudinal del alma (en tracción o compresión) (MPa)
- F_L = tensión longitudinal del elemento (en tracción o compresión) (MPa)
- $E_{L,f}$ = módulo de elasticidad longitudinal del ala (MPa)
- $E_{L,w}$ = módulo de elasticidad longitudinal del alma (MPa)
- I_f = momento de inercia de la(s) ala(s) en torno al eje de curvatura (mm⁴)
- I_w = momento de inercia de la(s) alma(s) en torno al eje de curvatura (mm⁴)
- I = momento de inercia del elemento en torno al eje de curvatura (mm⁴)
- y_f = distancia desde el eje neutro a la fibra extrema del ala (mm)
- y_w = distancia desde el eje neutro a la fibra extrema del alma (mm)
- y = distancia desde el eje neutro a la fibra extrema del elemento (mm)

Resistencia nominal a la flexión – Pandeo local

Para este caso, el valor de la resistencia a la flexión se debe considerar $\phi = 0,80$.

La resistencia a la flexión, se calcula según 4-18 (revisión de pandeo local del ala por compresión) y 4-19 (revisión de pandeo local del alma):

$$M_n = f_{cr} \frac{E_{L,f}I_f + E_{L,w}I_w}{yE_{L,f}} \quad (4-18)$$

$$M_n = f_{cr} \frac{E_{L,f}I_f + E_{L,w}I_w}{yE_{L,w}} \quad (4-19)$$

En caso de que el módulo de elasticidad del ala y alma no difieran en más del 15% uno del otro, 4-18 y 4-19 se pueden reducir a:

$$M_n = \frac{f_{cr}I}{y} \quad (4-20)$$

donde:

f_{cr} = tensión de pandeo crítica establecida como el mínimo entre el pandeo local del ala por compresión y el pandeo local del alma.

Este valor es calculado según el tipo de perfil (sección) para el alma y ala. Para el caso de perfiles I, se tiene:

- **Pandeo sobre eje fuerte del perfil - revisión de pandeo local del ala por compresión**

$$f_{cr} = \frac{4t_f^2}{b_f^2} \left(\frac{7}{12} \sqrt{\frac{E_{L,f}E_{T,f}}{1+4,1\xi}} + G_{LT} \right) \quad (4-21)$$

$$\xi = \frac{E_{T,f}t_f^3}{6b_fk_r} \quad (4-22)$$

$$k_r = \frac{E_{T,w}t_w^3}{6h} \left(1 - \left[\left(\frac{48t_f^2h^2E_{L,w}}{11,1\pi^2t_w^2b_f^2E_{L,f}} \right) \left(\frac{G_{LT}}{1,25\sqrt{E_{L,w}E_{T,w}+E_{T,w}v_{LT}+2G_{LT}}} \right) \right] \right) \quad (4-23)$$

- Pandeo sobre eje fuerte del perfil - revisión de pandeo local del alma

$$f_{cr} = \frac{11,1\pi^2 t_w^2}{12h^2} (1,25\sqrt{E_{L,w}E_{T,w}} + E_{T,w}\nu_{LT} + 2G_{LT}) \quad (4-24)$$

- Pandeo sobre eje débil del perfil - revisión de pandeo local del ala por compresión

$$f_{cr} = \frac{4t_f^2}{b_f^2} G_{LT} \quad (4-25)$$

Para el caso de perfiles C, se tiene:

- Pandeo sobre eje fuerte del perfil - revisión de pandeo local del ala por compresión

$$f_{cr} = \frac{t_f^2}{b_f^2} \left(\frac{7}{12} \sqrt{\frac{E_{L,f}E_{T,f}}{1+4,1\xi}} + G_{LT} \right) \quad (4-26)$$

$$\xi = \frac{E_{T,f}t_f^3}{12b_f k_r} \quad (4-27)$$

$$k_r = \frac{E_{T,w}t_w^3}{3h} \left(1 - \left[\left(\frac{48t_f^2 h^2 E_{L,w}}{11,1\pi^2 t_w^2 b_f^2 E_{L,f}} \right) \left(\frac{G_{LT}}{1,25\sqrt{E_{L,w}E_{T,w}} + E_{T,w}\nu_{LT} + 2G_{LT}} \right) \right] \right) \quad (4-28)$$

- Pandeo sobre eje fuerte del perfil - revisión de pandeo local del alma

$$f_{cr} = \frac{11,1\pi^2 t_w^2}{12h^2} (1,25\sqrt{E_{L,w}E_{T,w}} + E_{T,w}\nu_{LT} + 2G_{LT}) \quad (4-29)$$

- Pandeo sobre eje débil del perfil - revisión de pandeo local del ala por compresión

$$f_{cr} = \frac{t_f^2}{b_f^2} G_{LT} \quad (4-30)$$

- Pandeo sobre eje débil del perfil - revisión de pandeo local del alma

$$f_{cr} = \frac{\pi^2 t_w^2}{6h^2} (\sqrt{E_{L,w}E_{T,w}} + E_{T,w}\nu_{LT} + 2G_{LT}) \quad (4-31)$$

donde:

$E_{L,f}$ = módulo de elasticidad longitudinal del ala (MPa)

$E_{L,w}$ = módulo de elasticidad longitudinal del alma (MPa)

$E_{T,f}$ = módulo de elasticidad transversal del ala (MPa)

$E_{T,w}$ = módulo de elasticidad transversal del alma (MPa)

G_{LT} = módulo de corte en el plano

ν_{LT} = módulo de Poisson del alma asociado a la deformación transversal cuando la compresión es aplicada en dirección longitudinal

I_f = momento de inercia de la(s) ala(s) en torno al eje de curvatura (mm⁴)

I_w = momento de inercia de la(s) alma(s) en torno al eje de curvatura (mm⁴)

I = momento de inercia del elemento en torno al eje de curvatura (mm⁴)

y = distancia desde el eje neutro a la fibra extrema del elemento (mm)
 b_f = ancho del ala (mm)
 h = altura del elemento (mm)
 t_f = espesor del ala (mm)
 t_w = espesor del alma (mm)
 ξ = coeficiente de restricción
 k_r = constante elástica rotacional, (kN/rad)

Resistencia nominal a la flexión – Pandeo flexo torsional

Para este caso, el valor de la resistencia a la flexión se debe considerar $\phi = 0,70$.

Para el caso de perfiles I, el valor de M_n se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$M_n = C_b \sqrt{\frac{\pi^2 E_{L,f} I_y D_J}{L_b^2} + \frac{\pi^4 E_{L,f}^2 I_y C_\omega}{L_b^4}} \quad (4-32)$$

$$D_J = G_{LT} \sum_i \frac{1}{3} b_i t_i^3 \quad (4-33)$$

$$C_\omega = \frac{t_f h^2 b_f^3}{24} \quad (4-34)$$

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{2,5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} \leq 3,0 \quad (4-35)$$

Donde:

D_J = rigidez torsional de elemento de sección abierta (N-mm²)
 C_ω = constante de alabeo (mm⁶)
 $E_{L,f}$ = módulo de elasticidad longitudinal del ala (MPa)
 I_y = momento de inercia del elemento en torno al eje débil de flexión (mm⁴)
 L_b = longitud entre puntos reforzados contra el desplazamiento lateral del ala a compresión o reforzada contra la torsión (mm)
 C_b = Coeficiente de flexión para vanos reforzados en sus extremos
 M_{max} = Valor absoluto de momento máximo en el tramo no reforzado (N-mm)
 M_A = Valor absoluto de momento en el cuarto del tramo no reforzado del elemento (N-mm)
 M_B = Valor absoluto de momento en el centro del tramo no reforzado del elemento (N-mm)
 M_C = Valor absoluto de momento en el tercer cuarto del tramo no reforzado del elemento (N-mm)

4.2.2.5 Resistencia de elementos a corte

Cuando producto de las cargas transversales se genere flexión en torno al eje neutro, los elementos deberán ser diseñados considerando:

$$V_u \leq \lambda \phi V_n \quad (4-36)$$

donde:

V_u = Resistencia al corte requerido (kN)

ϕ = factor de resistencia al corte

λ = factor de efecto de tiempo, según lo indicado en tabla 4.5

V_n = resistencia nominal al corte, incluyendo los factores de ajuste indicados en 4.2.2.1 según aplique (kN)

El término ϕV_n se define como la menor resistencia obtenida del análisis de estado límite asociado a la ruptura del material y pandeo local del alma, según sigue:

Resistencia nominal al corte – Ruptura de material

Para este caso, el valor de la resistencia producto de los esfuerzos de corte se debe considerar $\phi = 0,65$.

La resistencia al corte está determinada como sigue:

$$V_n = F_{LT} A_s \quad (4-37)$$

Donde:

F_{LT} = resistencia al corte en el plano (MPa)

A_s = área de corte (mm²)

Resistencia nominal al corte – Pandeo local del alma

Para este caso, el valor de la resistencia producto de los esfuerzos de corte se debe considerar $\phi = 0,80$.

Para el caso del alma de perfiles I y canales C, la resistencia al corte está determinada como sigue:

$$V_n = f_{cr} A_s \quad (4-38)$$

donde:

f_{cr} = resistencia crítica al pandeo por corte (MPa)

A_s = área de corte (mm²)

El valor de f_{cr} dependerá de la siguiente relación:

$$\text{Si } 2G_{LT} + E_{T,w} \nu_{LT} \leq \sqrt{E_{L,w} E_{T,w}}$$

$$f_{cr} = \frac{t_w^2 k_{LT1}^4 \sqrt{E_{L,w} (E_{T,w})^3}}{3h^2} \quad (4-39)$$

$$k_{LT1} = 8,1 + 5,0 \frac{2G_{LT} + E_{T,w} \nu_{LT}}{\sqrt{E_{L,w} E_{T,w}}} \quad (4-40)$$

$$\text{Si } 2G_{LT} + E_{T,w}v_{LT} > \sqrt{E_{L,w}E_{T,w}}$$

$$f_{cr} = \frac{k_{LT2}E_{T,w}t_w^2}{3h^2} \sqrt{v_{LT} + \frac{2G_{LT}}{E_{T,w}}} \quad (4-41)$$

$$k_{LT2} = 11,7 + 1,4 \left(\frac{\sqrt{E_{L,w}E_{T,w}}}{2G_{LT} + E_{T,w}v_{LT}} \right)^2 \quad (4-42)$$

donde:

$E_{L,w}$ = módulo de elasticidad longitudinal del alma (MPa)

$E_{T,w}$ = módulo de elasticidad transversal del alma (MPa)

G_{LT} = módulo de corte en el plano

v_{LT} = módulo de Poisson del alma asociado a la deformación transversal cuando la compresión es aplicada en dirección longitudinal

h = altura del elemento (mm)

$k_{LT 1,2}$ = coeficiente de pandeo por corte

4.2.2.6 Resistencia de elementos bajo combinación de fuerzas axiales y torsión.

Para los elementos sometidos a fuerzas axiales, ya sea de compresión o tracción, además de flexión, la interacción entre estas fuerzas debe cumplir la siguiente condición:

$$\frac{P_u}{P_c} + \frac{M_{ux}}{M_{cx}} + \frac{M_{uy}}{M_{cy}} \leq 1,0 \quad (4-43)$$

donde:

P_u = resistencia a la compresión requerida.

M_u = resistencia a la flexión requerida

P_c = resistencia a la compresión o tracción, según corresponda, del elemento, calculado como se indica en 4.2.2.2 y 4.2.2.3.

M_c = resistencia a la flexión del elemento, calculado como se indica en 4.2.2.4.

Cuando la flexión sólo se da sobre su eje fuerte (x), la expresión se reduce a:

$$\frac{P_u}{P_c} + \frac{M_{ux}}{M_{cx}} \leq 1,0 \quad (4-44)$$

4.2.3 Diseño por factores de carga y resistencia. Requerimientos de anteproyecto de norma para el diseño de conexiones apernadas.

En base a la recomendación presentada en el capítulo 8 de [1], las conexiones deberán ser directas entre los elementos de FRP, o mediante la interacción con elementos metálicos (placas, ángulos, etc.). Para los pernos igualmente se recomiendan de acero. También se limita la cantidad de pernos a utilizar en la conexión con el elemento, siendo la configuración mayor en disposición 3x3.

La disposición de pernos debe ser tal que su centro de gravedad debe coincidir con el centro de gravedad del elemento, en caso de que el elemento reciba/transmita cargas axiales por esta

conexión. Los pernos utilizados deben ser de acero al carbono o de acero inoxidable según estándares ASTM A307, A325 o F593.

Las conexiones simples en conjuntos tipo marco entre elementos deben utilizar perfiles “L” a ambos lados de la conexión.

La figura 4.3 define como ejemplo una configuración de pernos con su centro de gravedad en línea con la dirección de la fuerza. Los valores mínimos para los parámetros presentados en la figura se presentan en la tabla 4.7.

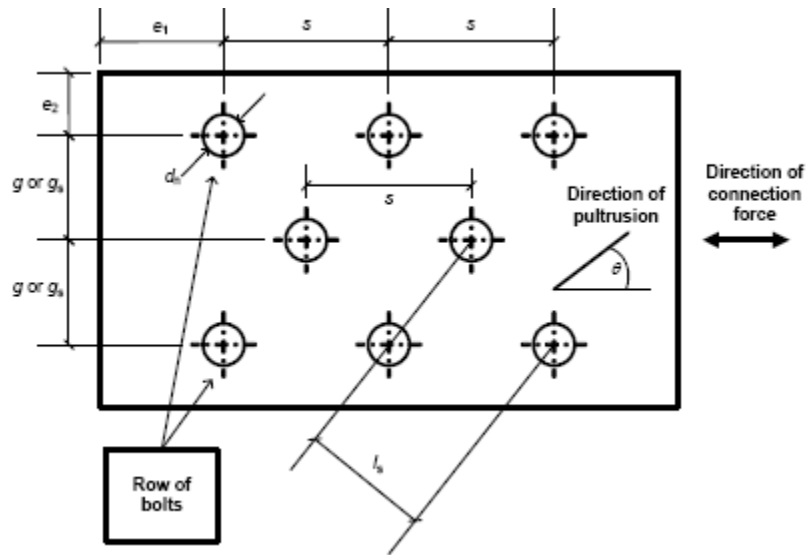


Figura 4.3. Geometría de conexión y definición de fila de pernos [1].

Tabla 4.7 — Requerimientos mínimos para la geometría de conexiones apernadas [1].

Parámetro	Definición	Espaciamiento mínimo requerido (o distancia en términos de diámetro de pernos)
$e_{1,min}$	Distancia a borde paralelo a la dirección de la carga	Carga de tracción
	Para una fila de pernos Dos o tres filas de pernos	4d 2d
$e_{2,min}$	Distancia a borde paralelo a la dirección de la carga	Carga de compresión
	Para todas las configuraciones	2d
s_{min}	Distancia entre filas	4d
g_{min}	Distancia entre pernos de una fila	4d
$g_{s,min}$	Distancia entre pernos de una fila, cuando están escalonados	2d
$l_{s,min}$	Distancia entre pernos escalonados	2,8d

donde d corresponde al diámetro nominal del perno.

El documento [1] presenta consideraciones de diseño para el caso en que se utilice una configuración de pernos de una fila (con 1, 2 o 3 pernos), o se utilice una configuración de dos o tres filas. Para efectos de este trabajo se presentarán las condiciones para dos o tres filas, en consideración a que las conexiones se esperan transmisoras de momento.

4.2.3.1 Resistencia nominal de conexiones de dos o tres filas de pernos.

La resistencia de las conexiones debe cumplir con:

$$R_u \leq \lambda \phi R_n C_\Delta C_M C_T \quad (4-45)$$

donde:

$R_u = M_u$ = Resistencia requerida de la conexión

ϕ = factor de resistencia a la flexión ϕ_b para pernos de acero, o ϕ_c para las conexiones en FRP

λ = factor de efecto tiempo (tabla 4.5)

R_n = Resistencia nominal de la conexión

C_Δ = factor de geometría

C_M = factor de condición de humedad (tabla 4.6)

C_T = factor de condición de temperatura (tabla 4.6)

Para el factor C_Δ se debe considerar:

- Si la conexión cumple con los requerimientos de la tabla 4.7, $C_\Delta = 1$
- Cuando el espacio entre filas, s , es mayor o igual al valor s_{min} especificado en la tabla 4.7, $C_\Delta = 1$
- Cuando $4d \leq s < s_{min}$, $C_\Delta = s/s_{min}$,
- Para la resistencia de arranque, R_{tt} , $C_\Delta = 1$

El valor de R_n debe tomarse como el mínimo entre:

- R_{bt} = resistencia de pernos
- R_{tt} = resistencia de arranque
- R_{br} = resistencia al aplastamiento
- $R_{nt,f}$ = arranque de sección neta en la primera fila de pernos
- R_{sh} = resistencia al corte entre fila de pernos
- R_{bs} = resistencia de ruptura de bloque para cargas concéntricas
- $R_{bs,e}$ = resistencia de ruptura de bloque para cargas excéntricas

Para el cálculo de $R_{nt,f}$, R_{sh} , R_{bs} y $R_{bs,e}$ se deberá considerar la distribución de cargas por fila de pernos, según lo indicado en la tabla 4.8

Tabla 4.8 — Distribución de carga para conexiones con dos o tres filas de pernos [1].

Materiales conectados	Nº de filas, n	Proporción de carga en la primera fila, L_{br}	Proporción de carga en la segunda fila	Proporción de carga en la tercera fila
FRP/FRP	2	0,5	0,5	--
FRP/acero	2	0,6	0,4	--
FRP/FRP	3	0,4	0,2	0,4
FRP/acero	3	0,5	0,3	0,2

Se considera como primera fila a la más lejana desde el borde perpendicular a la dirección de la carga.

Resistencia de pernos

Para este caso, el valor de la resistencia del perno a tracción o corte considera $\phi_b = 0,75$, con valor para R_{bt} :

$$R_{bt} = F_n A_b \quad (4-46)$$

donde:

F_n = Resistencia nominal a la tracción F_{nt} , o al corte F_{nv} de pernos de acero (tabla 4.9)

A_b = área nominal del perno (sección sin hilo)

Tabla 4.9 — Resistencia nominal de pernos [1].

Condición de carga aplicada		Resistencia nominal por unidad de área		
		ASTM A325	ASTM A307	ASTM F593
Tracción, F_{nt}	Estática	620 MPa	419 MPa	419 MPa
Corte, F_{nv}	Hilo excluido en plano de corte	415 MPa	331 MPa	331 MPa

En caso de haber esfuerzos combinados de tracción y corte, la resistencia del perno se calcula (considerando $\phi_b = 0,75$):

$$R_{bt} = F_{nt}^t A_b \quad (4-47)$$

donde:

F_{nt}^t = Resistencia a la tracción modificada por efecto de corte

$$F_{nt}^t = 1,3F_{nt} - \frac{F_{nt}}{\phi_b F_{nv}} f_v \leq F_{nt} \quad (4-48)$$

F_{nt} = Resistencia nominal a la tracción (tabla 4.9)

F_{nv} = Resistencia nominal de corte (tabla 4.9)

f_v = Esfuerzo de corte requerido

La resistencia al corte disponible del perno debe ser igual o mayor al esfuerzo requerido por unidad de área, f_v . En el caso de que se verifique de que el hilo no está excluido del plano de corte, la resistencia del perno de acero F_{nv} debe determinarse como $F_{nv} = 0,5F_{nt}$. [1]

Resistencia de arranque

La resistencia nominal al arranque para el elemento de FRP por perno debe tomarse como el menor entre:

$$R_{tt} = 0,5\pi d_w t F_{sh,tt} \quad (4-49)$$

con $\phi_c = 0,5$, y

$$R_{tt} = 0,5\pi d_w t F_{sh,int} \quad (4-50)$$

con $\phi_c = 0,5$, donde:

d_w = diámetro nominal de la golilla

t = espesor del material de FRP resistente al arranque

$F_{sh,tt}$ = resistencia característica al corte en el plano

$F_{sh,int}$ = resistencia característica al corte interlaminar

Resistencia al aplastamiento

La resistencia nominal al aplastamiento por perno está dada por:

$$R_{br} = t d F_{\theta}^{br} \quad (4-51)$$

con $\phi_c = 0,8$, donde:

t = espesor del elemento de FRP

d = diámetro nominal del perno

F_{θ}^{br} = resistencia característica al aplastamiento según orientación de la carga respecto a la dirección de la fibra (o dirección de pultrusión) según:

$$F_{\theta}^{br} = F_L^{br} \text{ cuando } \theta \text{ es } 5^\circ, y, F_T^{br} \text{ cuando } \theta \text{ es } > 5^\circ \text{ a } 90^\circ \quad (4-52)$$

donde:

θ = ángulo de carga respecto a la dirección de pultrusión

F_L^{br} = resistencia característica al aplastamiento en dirección longitudinal (respecto a la dirección de pultrusión)

F_T^{br} = resistencia característica al aplastamiento en dirección transversal (respecto a la dirección de pultrusión)

Resistencia al arranque de sección neta

La resistencia de la sección neta de la conexión para el caso en que la dirección de la fuerza de la conexión está entre los 0° y 5° respecto a la dirección longitudinal del elemento

$$R_{nt,f} = \left[\left(K_{nt,L} L_{br} \left(\frac{w}{nd} \right) \right) + \left(\frac{K_{op,L}(1-L_{br})}{\left(1-n \left(\frac{d_n}{w} \right) \right)} \right) \right]^{-1} wt F_L^t \quad (4-53)$$

con $\phi_c = 0,45$, donde:

t = corresponde al menor espesor de los elementos conectados

d = diámetro del perno

d_n = diámetro nominal de la perforación

n = número de pernos en el ancho efectivo, n = 1 a 3

L_{br} = proporción de la fuerza de conexión

F_L^t = Resistencia característica a la tensión en el sentido longitudinal del elemento de FRP

Para el caso en que la conexión tiene un perno por fila (n = 1 y $S_{pr} = w/d$), el valor de $K_{nt,L}$ para la ecuación 4-53 se calcula:

$$K_{nt,L} = \frac{1}{\left(\frac{w}{nd} - 1 \right)} \left(1 + C_L \left(S_{pr} - 1,5 \frac{(S_{pr}-1)}{(S_{pr}+1)} \Theta \right) \right) \quad (4-54)$$

con $\Theta = 1,5 - 0,5 \frac{w}{e_1}$ para $\frac{e_1}{w} \leq 1$, y $\Theta = 1$ para $\frac{e_1}{w} \geq 1$

Cuando el elemento corresponde a un perfil, $C_L = 0,50$, y cuando es una placa $C_L = 0,40$

El valor de $K_{op,L}$ para la ecuación 4-53 se calcula:

$$K_{op,L} = 1 + C_{op,L} \left(1 + \left(1 - \frac{1}{S_{pr}} \right)^3 \right) \quad (4-55)$$

Cuando el elemento corresponde a un perfil o placa, $C_L = 0,50$

Para el caso en que la conexión tienen dos o tres pernos por fila (n = 2 o 3 y $S_{pr} = g/d$), el valor de $K_{nt,L}$ para la ecuación 4-53 se calcula:

$$K_{nt,L} = \frac{1}{\left(\frac{w}{nd} - 1 \right)} \left(1 + C_L \left(S_{pr} - 1,5 \frac{(S_{pr}-1)}{(S_{pr}+1)} \Theta \right) \right) \quad (4-56)$$

con $\Theta = 1,5 - 0,5 \frac{g}{e_1}$ para $\frac{e_1}{g} \leq 1$, y $\Theta = 1$ para $\frac{e_1}{g} \geq 1$

Cuando el elemento corresponde a un perfil, $C_L = 0,50$, y cuando es una placa $C_L = 0,40$

El valor de $K_{op,L}$ para la ecuación 4-53 se calcula:

$$K_{op,L} = 1 + C_{op,L} \left(1 + \left(1 - \frac{1}{S_{pr}} \right)^3 \right) \quad (4-57)$$

Cuando el elemento corresponde a un perfil o placa, $C_L = 0,50$

La resistencia de la sección neta de la conexión para el caso en que la dirección de la fuerza de la conexión está entre los 5° y 90° respecto a la dirección longitudinal del elemento

$$R_{nt,f} = \left[\left(K_{nt,T} L_{br} \left(\frac{w}{nd} \right) \right) + \left(\frac{K_{op,L}(1-L_{br})}{(1-n(\frac{dn}{w}))} \right) \right]^{-1} wt F_T^t \quad (4-58)$$

con $\phi_c = 0,45$, donde:

t = corresponde al menor espesor de los elementos conectados

d = diámetro del perno

d_n = diámetro nominal de la perforación

n = número de pernos en el ancho efectivo, n = 1 a 3

L_{br} = proporción de la fuerza de conexión

F_T^t = Resistencia característica a la tensión en el sentido transversal del elemento de FRP

Para el caso en que la conexión tiene un perno por fila ($n = 1$ y $S_{pr} = w/d$), el valor de $K_{nt,T}$ para la ecuación 4-58 se calcula:

$$K_{nt,T} = \frac{1}{\left(\frac{w}{nd}-1\right)} \left(C_T \left(S_{pr} - 1,5 \frac{(S_{pr}-1)}{(S_{pr}+1)} \Theta \right) + 1 \right) \quad (4-59)$$

con $\Theta = 1,5 - 0,5 \frac{w}{e_1}$ para $\frac{e_1}{w} \leq 1$, y $\Theta = 1$ para $\frac{e_1}{w} \geq 1$

Cuando el elemento corresponde a un perfil, $C_T = 0,50$, y cuando es una placa $C_T = 0,40$

El valor de $K_{op,T}$ para la ecuación 4-58 se calcula:

$$K_{op,T} = 1 + C_{op,T} \left(1 + \left(1 - \frac{1}{S_{pr}} \right)^3 \right) \quad (4-60)$$

Cuando el elemento corresponde a un perfil o placa, $C_T = 0,50$

Para el caso en que la conexión tienen dos o tres pernos por fila ($n = 2$ o 3 y $S_{pr} = g/d$), el valor de $K_{nt,T}$ para la ecuación 4-58 se calcula:

$$K_{nt,T} = \frac{1}{\left(\frac{w}{nd}-1\right)} \left(C_T \left(S_{pr} - 1,5 \frac{(S_{pr}-1)}{(S_{pr}+1)} \Theta \right) + 1 \right) \quad (4-61)$$

con $\Theta = 1,5 - 0,5 \frac{g}{e_1}$ para $\frac{e_1}{g} \leq 1$, y $\Theta = 1$ para $\frac{e_1}{g} \geq 1$

Cuando el elemento corresponde a un perfil, $C_T = 0,50$, y cuando es una placa $C_L = 0,40$

El valor de $K_{op,T}$ para la ecuación 4-53 se calcula:

$$K_{op,T} = 1 + C_{op,T} \left(1 + \left(1 - \frac{1}{s_{pr}} \right)^3 \right) \quad (4-62)$$

Cuando el elemento corresponde a un perfil o placa, $C_{op,T} = 0,50$

Resistencia al corte local entre fila de pernos

Para dos filas de pernos ($n = 2$) con espaciamiento s , la resistencia al corte viene dado por:

$$R_{sh} = 1,4 \left(e_1 - \frac{d_n}{2} + s \right) t F_{sh} \quad (4-63)$$

con $\phi_c = 0,45$.

Para tres filas de pernos ($n = 3$) con espaciamiento s , la resistencia al corte viene dado por:

$$R_{sh} = 2((n - 1)s) t F_{sh} \quad (4-64)$$

con $\phi_c = 0,45$, donde:

t = corresponde al menor espesor de los elementos conectados

d_n = diámetro nominal de la perforación

F_{sh} = resistencia característica al corte del elemento de FRP apropiado para el modo de falla

Resistencia al corte de bloque

Cuando el número de fila de pernos es dos o tres, el corte en bloque debe ser considerado.

Cuando la fuerza de conexión es concéntrica con el grupo de pernos, en tracción y paralela a la dirección del perfil de FRP, la resistencia al corte en bloque está dada por:

$$R_{bs} = 0,5(A_{ns}F_{sh} + A_{nt}F_L^t) \quad (4-65)$$

con $\phi_c = 0,45$

Cuando la fuerza de conexión es excéntrica en el plano de carga, la resistencia al corte en bloque está dada por:

$$R_{bs,e} = 0,5(A_{ns}F_{sh} + 0,5A_{nt}F_L^t) \quad (4-66)$$

con $\phi_c = 0,45$, donde:

F_{sh} = resistencia característica al corte del elemento de FRP apropiado para el modo de falla

F_L^t = Resistencia característica a la tensión en el sentido longitudinal del elemento de FRP

A_{ns} = área neta sujeta a corte

A_{nt} = área neta sujeta a tracción; donde los pernos están escalonados A_{nt} debe ser el mayor de:

- Área seccional máxima perpendicular al eje del elemento, o

$$o \quad t(nd_n \sum b_s)$$

donde:

b_s = menor valor entre $\frac{s^2}{4g_s}$ o $0,65g_s$

n = números de perforaciones extendidas en diagonal o zig-zag a través del elemento o parte del elemento

d_n = diámetro nominal de la perforación

4.2.4 Estructura resultante

La estructura soportante de la sala, de la manera en que fue preconcebida, puede separarse en dos subestructuras principales. En primera instancia está el juego de marcos, encargados de generar la envolvente de la sala, soportar las cargas externas como viento o sobrecargas de techo y los elementos de recubrimiento. Y en complemento está el chasis de la estructura, encargada de funcionar como base de los equipos y además sostener los pilares de los marcos. Se describen sus componentes en los puntos siguientes.

4.2.3.1 Chasis

El chasis resultante de la revisión de cargas está conformado por:

- Perfil IPE240: perfil de acero, conforma los marcos principales (figura 4.4, identificado en azul)
- Perfil $HN_{FRP}200 \times 200 \times 12$: perfil de FRP conforma vigas primarias (figura 4.4, identificado en amarillo)
- Perfil $HN_{FRP}200 \times 200 \times 12$: perfil de FRP, conforma vigas de arriostramiento (figura 4.4, identificado en verde).

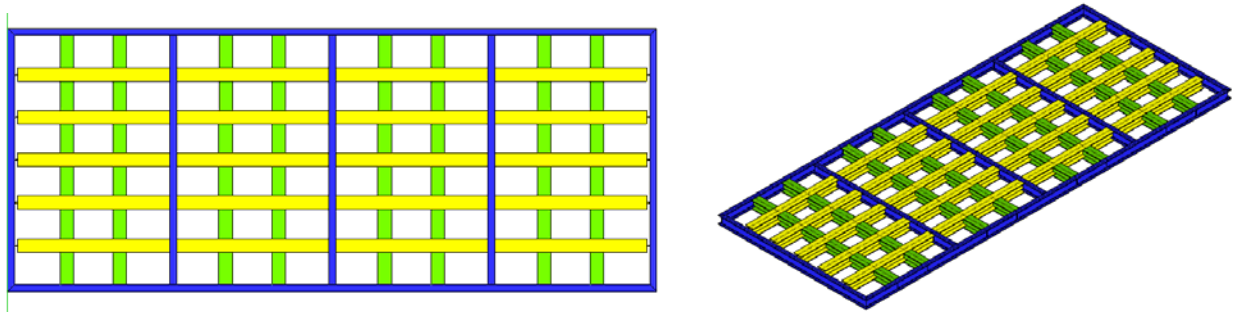


Figura 4.4. Distribución de perfiles en chasis (izq.: vista en planta; der.: vista isométrica).

Los perfiles $HN_{FRP}200 \times 200 \times 12$ son perfiles de FRP que, en base al catálogo del fabricante, son factibles de encontrar en el mercado nacional. Sin embargo, en la proyección de un chasis completamente de perfiles de FRP, el perfil de marco que cumple con las deformaciones admisibles (fijadas para estos efectos en $L/300$) es de una dimensión mucho mayor, catalogable como $IN600 \times 10 \times 200 \times 20$ (medidas corresponden a alto, espesor alma, ancho ala y espesor ala en milímetros, respectivamente) que es posible encontrar en el mercado estadounidense según catálogo, pero se escapa de las opciones del fabricante nacional (su perfil mayor es

HN_{FRP}300x300x10). Esta condición desemboca en la utilización de perfilería en acero según lo indicado.

4.2.3.2 Marcos

El marco resultante de la revisión de cargas está conformado por:

- Perfil HN_{FRP}200x200x12: conforma las columnas y vigas del marco (figura 4.5, identificado en amarillo).

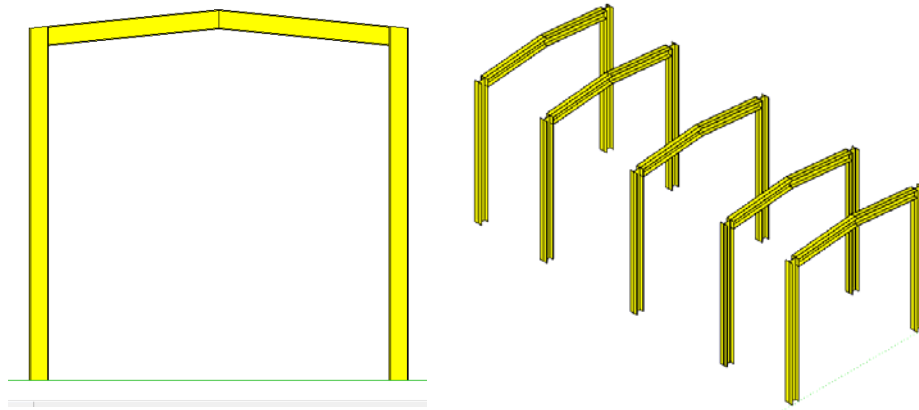


Figura 4.5. Marco para sala (izq.: vista frontal; der.: vista isométrica conjunto de marcos).

Adicionalmente, de manera de controlar los desplazamientos fuera del plano del marco, se han dispuesto elementos de arriostamiento proyectados sobre los pilares y las cerchas, según se visualiza en la figura 4.6

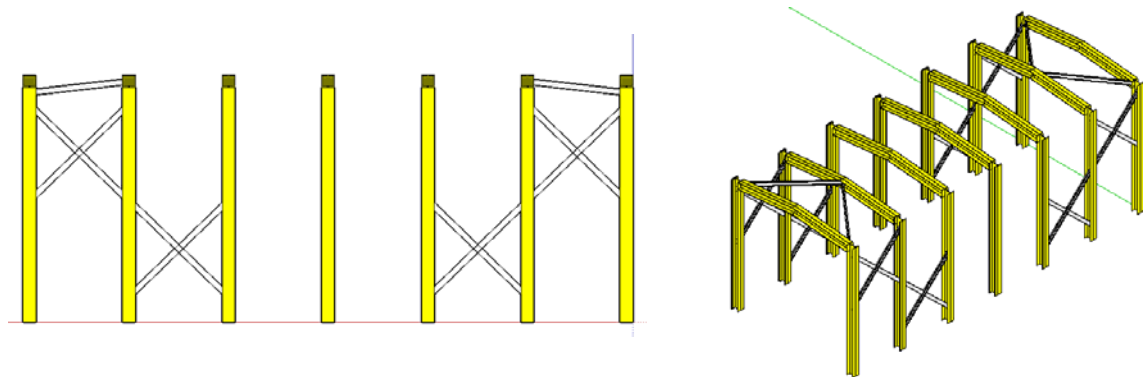


Figura 4.6. Arriostamiento de marcos (izq.: vista lateral; der.: vista isométrica).

4.2.3.3 Otros elementos; resumen

De manera de dar soporte a los elementos de recubrimiento, se consideran también costaneras de techo y laterales en la sala. Con esto, el resumen de perfiles utilizados en el diseño de la sala corresponde al presentado en la tabla 4.10.

Tabla 4.10 — Resumen elementos estructura sala.

Elemento	Material	Descripción	Peso total [kgf]
Columna	FRP	HN _{FRP} 200x200x12	639,4
Viga (cercha)	FRP	HN _{FRP} 200x200x12	310,7
Arriostramiento techo	FRP	IN _{FRP} 100x50x6	38,3
Arriostramiento lateral	FRP	IN _{FRP} 100x50x6	69,7
Costaneras techo	FRP	C _{FRP} 100x65x6,35	237,3
Costaneras laterales	FRP	C _{FRP} 100x65x6,35	537,4
Chasis (marcos principales)	Acero	IPE240	1142,6
Chasis (vigas)	FRP	HN _{FRP} 200x200x10	944,9

5 Comparación de Soluciones

Como ha sido comentado en capítulos previos de este trabajo, la concepción de la sala en FRP está basada en una solución ejecutada considerando su estructura en acero, implementada en un proyecto de ampliación de subestación eléctrica. La solución en FRP busca dar cumplimiento a los requerimientos solicitados a la solución original, en cuanto a capacidad de soporte y a espacio necesario para la instalación del equipamiento. Frente a esto, se revisan algunos de los procesos de la manufactura e implementación de la sala de acero, y se estiman los correspondientes a la sala en FRP.

5.1 Fabricación

Respecto a la fabricación de la sala de acero, de la información recopilada tenemos a disposición el valor de su venta a proyecto. Este valor engloba distintas áreas de costo, como son materiales, algunos equipos, mano de obra, etc., pero que no se encuentran debidamente diferenciados y, por lo tanto, se establecen ponderaciones para lograr obtener el costo de materiales para la fabricación. En la tabla 5.1 se presenta el valor venta de la sala, y las ponderaciones estimadas para el desglose de precios.

Tabla 5.1 — Desglose de precios sala en acero.

Ítem	Descripción	Precio total USD	Precio estimado de partidas USD
1	01 sala Eléctrica Control “SWG 23KV”, Compuesta por:	85.635	
1.1	01 Prefabricada Panelizada NEMA 4 para montaje sobre radier de concreto, con dimensiones exteriores de 9.500 mm de largo x 3.953 mm de ancho x 3.461 mm de altura interior,		71.535
1.2	01 sistema de Detección de Incendio con Central de Control Modelo tipo Convencional, más 02 extintor manual de CO ₂ de 6 Kg.		5.700
1.3	01 equipo de Aire Acondicionado tipo Mochila de 24.000 BTU,		6.500
1.4	01 tablero de Servicios Auxiliares Sala, de 60A, 400-231 Volts, 50 Hz		1.900

En base a lo indicado en el ítem 1.1 de la tabla 5.1, el valor neto de la sala es de aproximadamente USD 71.530, esto es la sala como estructura. En un siguiente análisis expuesto en la tabla 5.2 se presenta un desglose de precios de la sala, considerando sus diferentes etapas de proceso.

Tabla 5.2 — Desglose de precios sala en acero sin equipos.

Ítem	Descripción	Precio total USD	Precio estimado de partidas USD
1	Valor sala eléctrica (estructura)	71.535	
1.1	Ingeniería (5%)		3.577
1.2	Materiales de construcción (45%)		32.191
1.3	Mano de obra (40%)		28.614
1.4	Utilidades de venta (10%)		7.154

De la tabla anterior, se estima que el valor neto de materiales para la fabricación de la sala en acero es aproximadamente USD 32.200.

De la definición de la estructura de la sala en FRP indicada en el capítulo anterior, junto con los materiales a utilizar de revestimiento, una estimación de materiales a utilizar en las conexiones de la sala, y del material para su habilitación, se obtiene el siguiente valor para la fabricación de la sala en FRP.

Tabla 5.3 — Desglose de precios sala en FRP.

Ítem	Descripción	Cantidad	Precio unitario USD	Precio estimado de partidas USD
1	Elementos de FRP	3.183 kg	8,00	25.464
2	Elementos de acero (chasis)	1.143 kg	1,50	1.714
3	Conexiones (acero)	648,9 kg	2,25	1.460
4	Recubrimiento	30 un	225,00	6.750
5	Materiales de habilitación	1 gl	6.750,00	4.375
			TOTAL	39.763

De la estimación anterior, los costos en materiales para la fabricación de la sala en FRP suman un valor de USD 39.760, correspondiente aproximadamente a un 23% más que la fabricación en acero.

Si bien no se cuenta con información respecto a los valores de mano de obra para el armado de sala de FRP, es posible estimar que no debiese existir una diferencia mayor respecto a valor promedio de la hora-hombre (HH) entre la mano de obra para la solución en acero como en la mano de obra para la solución bajo elementos de FRP. Los trabajos de perforación o corte de los perfiles de FRP para el dimensionamiento de los elementos no requiere de herramientas especiales o particulares para el material, siendo posible utilizar las mismas que las utilizadas en el dimensionamiento de los elementos de acero. En el proceso de ensamblaje sí podría existir alguna diferencia, considerando la especialización del personal encargado de las soldaduras en el caso de la sala de acero, pero que puede obedecer a alguna política de la maestranza el certificar de manera interna o externa a sus trabajadores (supervisores certificados externos y trabajadores de manera interna). En función de esto, se estima que el nivel de especialización promedio del personal que trabajase con elementos de FRP sería del mismo orden que la especialización del personal que trabaja el acero, con un alcance respecto al cuidado que se debe tener en el dimensionamiento de modo de no dañar la pieza, dado que las opciones de reparación son menores que para el acero.

Considerando el proceso ya de armado de una sala, se estima que la cantidad total de HH podría diferir entre ambas soluciones, inicialmente producto de que el proceso de la sala en FRP tendría un proceso de terminaciones reducido en comparación al proceso de la sala en acero. El elemento de FRP no requiere de pinturas para su terminación como sí lo requiere la solución en acero, lo que lleva a no tener que considerar al personal necesario para esta etapa.

Las horas de ingeniería que se consideren para el diseño en FRP se pueden estimar en iguales o un poco mayores a las consideradas en el diseño de la sala en acero. A la fecha no hay programas que entreguen el cálculo, diseño y verificación de la sala en FRP como sí lo hay para sala de acero, lo que hacen para este último el proceso de diseño un poco más rápido.

Según los puntos planteados previamente, se estima para este proyecto que la diferencia en costo del proyecto en acero y en FRP se asocia principalmente al costo y volumen de los materiales utilizados y en segunda instancia por el proceso de ensamblaje. Según estas estimaciones, resulta la solución en FRP en torno a un 10% más costosa que la solución en acero. Se presenta en la tabla 5.3 la comparativa según las estimaciones y puntos comentados.

Tabla 5.4 — Resumen partidas y comparación de soluciones.

Ítem	Descripción	Acero Precio partida USD	FRP Precio partida USD	% de diferencia respecto a acero
1	Ingeniería	3.577	3.755	+5%
2	Materiales de construcción	32.191	39.763	+23,5%
3	Mano de obra	28.614	27.614	-3,5%
4	Utilidades de venta	7.154	7.904	+10,5%
Total		71.535	79.036	+10,5%

5.2 Transporte y Montaje en Obra

Para revisar las condiciones de transporte de la sala existen dos ítems principales: dimensiones y peso. Respecto a las dimensiones, la sala en FRP busca ajustarse a cumplir con el espacio interior proyectado en la solución en acero, pero producto de las diferencias en las dimensiones particularmente de los perfiles, la solución en FRP resulta levemente más ancho, largo y alto en sus medidas exteriores (del orden de 0,3m más). En cualquier caso, las nuevas dimensiones de la sala en FRP no pasan las condiciones límite que la pudiesen considerar en considerar otras exigencias adicionales a las necesarias para cumplir con el transporte de la sala en acero [19].

Respecto al peso, para la sala de acero su fabricante declara un peso de aproximadamente 28 toneladas. Para la sala de FRP, incluyendo igualmente su equipamiento, se estima un peso final de 18 toneladas. Esta diferencia permitiría pasar de considerar un camión de capacidad 30-35 toneladas en su plataforma a uno de 20-25. Sin embargo, la diferencia entre las plataformas a nivel de costo puede ser no significativa considerando:

- Uso de plataformas sobredimensionadas a la carga para seguridad y mejor distribución de carga
- Pasar de un nivel a otro en la definición de la plataforma no debiera considerar una diferencia porcentual en lo que respecta a su valor de arriendo.
- El transporte, aparte de la definición del equipo para el desplazamiento, considerar otros ítems como seguros, gestiones de permisos, alojamiento y alimentación del equipo transportista, entre otros, que porcentualmente sumen más que la propia definición del camión.

Según lo planteado, se estima una diferencia no mayor al 10% aproximadamente entre las gestiones de transporte de la sala de acero y la sala de FRP, siendo favorable hacia la sala de FRP.

La descarga de la sala en terreno es una actividad de rápida ejecución, siendo el transporte de la grúa a obra y su posicionamiento óptimo las actividades que llevan más tiempo. Es por ello que este equipo es la mayoría de las veces sobredimensionado, ya que cualquier eventualidad respecto, por ejemplo, a su posicionamiento, podría mermar la capacidad de carga de la grúa, con la posterior falla en el desconsolidamiento de la carga y los sobrecostos que ello acarrea producto de la estadía tanto de la propia grúa como de los equipos de transporte. Es por lo descrito que no se prevén diferencias respecto a la actividad de montaje de la sala entre una u otra solución.

Para el caso de la fundación, siempre respecto al escenario de estudio, se considera de manera similar. La fundación diseñada para la sala en acero es del tipo losa, según se presenta en la figura (ver anexo 1).

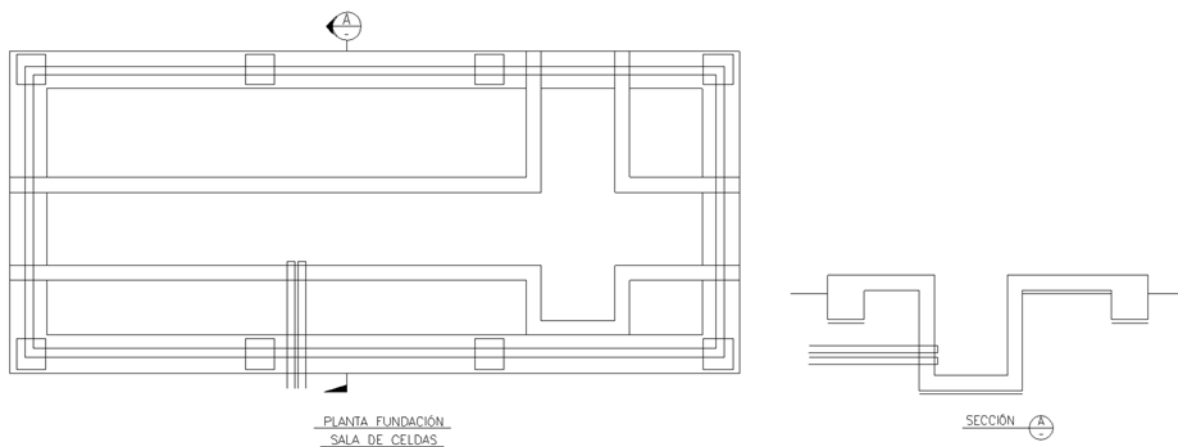


Figura 5.1. Fundación sala eléctrica, solución acero.

Al no tener consideraciones particulares, como podrían ser las fundaciones de pedestales que desplazan la sala respecto al piso para efectos de mantenimiento, se considera que no hay variaciones en el diseño para la sala de FRP. En base a lo indicado, se asume una diferencia nula en los costos de su construcción.

5.3 Resumen

En los puntos anteriores se revisan los ítems donde el cambio de materialidad de la sala tiene efectos en el valor final de la misma, en base al listado de partidas presentada en la oferta del fabricante para el caso de la sala en acero. En la tabla 5.5 se presentan las partidas afectadas y el costo para ambas soluciones.

Tabla 5.5 — Partidas con variación de costos.

Ítem	Descripción	Precio total sol. acero USD	Precio total sol. FRP USD
1	Sala eléctrica	71.535	79.036
2	Transporte sala eléctrica	16.190	14.571
	Total	87.725	93.607

Para el caso analizado, la diferencia entre los totales corresponde a USD 5.882, resultando en un 6,7% más costosa la solución en perfiles de FRP que la solución en elementos de acero. Este valor considera los ítems indicados en la tabla 5.4, excluyendo otras partidas de la oferta original asociadas a los equipos e instalaciones de los mismos, que se consideran sin variaciones para cualquiera de las dos soluciones.

El valor de la oferta completa como proyecto para la solución en elementos de acero, esto es incluyendo el precio de sala, equipos, tableros y armarios, además del costo de transporte es de USD 539.873, y de manera equivalente a nivel de partidas la solución en FRP llevaría al proyecto a un valor de USD 545.755, un 1,1% más que la solución original.

Tabla 5.6 — Desglose de precios sala en acero.

Ítem	Descripción	Precio total sol. acero USD	Precio total sol. FRP USD
1.1	01 Sala Eléctrica Control (incluye equipos indicados en 1.2)	85.635	93.136
1.2	01 Montaje de Equipamientos en Sala Eléctrica	9.545	9.545
	01 Montaje de Tablero de Distribución 125Vdc.		
	01 Montaje de Tablero de Alumbrado 480/400-231Vac.		
	04 Montaje de Columnas Switchgear M.T. 23kV		
	02 Montaje de Tablero Gabinete Paño de Control y Protecciones.		
1.3	Tablero T.A. SS/AA 125VDC (T.D.C.C.)	1.927	1.927
1.4	Switchgear 23kV (SWG), Modelo XGIS	322.748	322.748
1.5	Gabinete AC_7 / HT3	53.492	53.492
1.6	Gabinete AP_9 / HT3	50.336	50.336
	Subtotal	523.683	531.184
2.1	Transporte sala	16.190	14.571
	Total	539.873	545.755

Viendo el proyecto como un global, la diferencia generada por el cambio de materialidad parece ser baja en comparación de su total, lo que invita a analizar la posibilidad de generar una sala en estructura de FRP. Incluso el 10,43% de diferencia si sólo se contempla la sala (considerando diseño, suministros y fabricación), deja abierta la opción de estudiarla como una posible alternativa a las soluciones en acero, en función de los requerimientos propios del proyecto.

6 Conclusiones y Comentarios

6.1 Perfiles de FRP como Elemento Estructural

Los elementos de FRP de uso estructural se promocionan como elementos tan resistentes como el acero. Sin embargo, esta característica es necesaria aclararla para no caer en una mala interpretación. La “letra chica” indica que la comparativa con el acero es realmente en base a la razón resistencia/peso o resistencia/masa (resistencia específica), y además esta resistencia es principalmente enfocada a la tracción o compresión. Es por eso que a la hora de decidir en el uso de este material se debe tener en cuenta las condiciones de carga a las que estará sometido, en caso de que la flexión y/o corte no sea despreciable. Otro punto es el hecho de que la resistencia a la flexión de los elementos de FRP sea menor que los elementos de acero, si bien es posible dar cumplimiento a los requerimientos mecánicos, trae consigo otros temas a considerar y que tienen que ver con el aumento de dimensionamiento de los elementos para llegar a dar con las resistencias solicitadas, con las consideraciones a nivel arquitectónico que ello trae.

Tabla 6.1 — Resistencia específica.

Material	Resistencia a la tracción [MPa]	Densidad [kg/m ³]	Razón resistencia/densidad [m ² /m ³]
Acero (A270ES)	270	7.850	34,4 x 10 ⁶
FRP (según tabla 2.3)	207	1.800	115,0 x10 ⁶

A modo de ejemplo, si se considera una viga simplemente apoyada en sus extremos, de largo L y carga uniformemente distribuida q , su deformación al centro se define por la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{q \cdot L^4}{8 \cdot K \cdot E \cdot I} \quad (6-1)$$

Donde:

q = Carga uniformemente distribuida.

L = Largo de la viga.

E = Módulo de elasticidad.

K = Factor asociado a la condición de apoyo de la viga (para este caso, 9,6).

I = Inercia de la sección de la viga.

Si en el ejercicio de reemplazo de una viga de acero por una de FRP, manteniendo su deformación, obtenemos una relación entre las inercias de los materiales según sigue:

$$I_{FRP} = \frac{E_{ACERO}}{E_{FRP}} \cdot I_{ACERO} \approx 10 \cdot I_{ACERO} \quad (6-2)$$

Para una viga de acero IPE240, de inercia 3.892 cm⁴, se logra una deformación igual con una viga de FRP de inercia aproximada de 38.920 cm⁴. Comercialmente en el país no hay perfiles de FRP

que cumplan ese requerimiento, y en el extranjero, del catálogo de Strongwell [30] presenta en sus perfiles de mayor tamaño una inercia de 21.400 cm^4 (450mm de alto) y 79.200 cm^4 (610mm de alto)

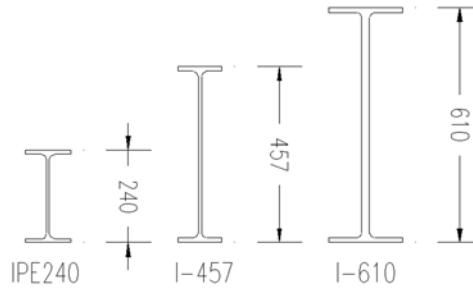


Figura 6.1 – Comparación de perfiles (comerciales).

Manteniendo como base el perfil I-610 en cuanto anchos de ala y espesores de ala y alma, si se reduce su altura a 450 mm se obtiene una inercia aproximada de 39.430 cm^4 , resultando un poco más cercano al valor buscado.

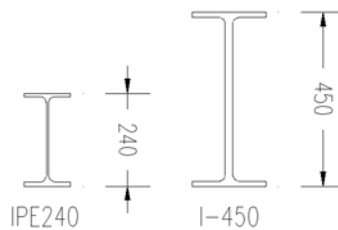


Figura 6.2 – Comparación de perfiles (adaptado).

El perfil requerido para el reemplazo es factible de fabricar para la empresa indicada, sin embargo la fabricación del molde apropiado para el perfil y su implementación en un proyecto de bajo volumen de requerimiento eleva los costos de fabricación [24]. Además, la diferencias en sus dimensiones (entre el perfil de acero y el perfil de FRP) puede acarrear condiciones arquitectónicas que si bien puede no sean definitivas, se deban considerar para la habilitación del proyecto.

Junto con lo anterior, para el diseño en FRP resulta necesario conocer no solo las sollicitaciones mecánicas a las que será sometida la estructura, sino también las condiciones ambientales a las que se verá enfrentado. Agentes externos como la temperatura o la humedad se deben tener en consideración cuando sus valores se escapen del rango de normalidad por un periodo prolongado de tiempo, situación que podrá estar relacionada al tipo de industria a la que prestará servicios la estructura. Y si bien los elementos de FRP tienen grados de resistencia ante ataque químicos o de fuego, y pueden ser mejorados teniendo consideraciones en la composición de sus componentes, en el diseño se debe considerar elementos de protección adicional.

El FRP, como material, tiene un comportamiento elástico y no presenta un rango de deformación plástica como sí lo tiene el acero. Esto lleva a que, ante eventualidades no consideradas en el diseño como impactos externos, se pueda generar un daño tal en el elemento que obligue a su cambio. La matriz de FRP es un elemento frágil, y que a diferencia del acero tiene pocas posibilidades de repararse a nivel estructural. La fibra de vidrio, una vez dañada, no es posible reparar a diferencia

de la matriz del elemento, la cual podría ser rehabilitada mediante la inyección de algún tipo de resina, pero el elemento no tendrá el comportamiento original. La fibra de vidrio controla las deformaciones que pueda sufrir la matriz del perfil y, como el acero de refuerzo en el hormigón armado, distribuye y soporta los esfuerzos de tracción, por lo que en caso de que resulten dañadas las tramas de fibra de vidrio en elementos sometidos a flexión disminuirá su capacidad de soportar este tipo de esfuerzos. Por consecuencia, según el posicionamiento de la estructura en el proyecto u obra, necesite de protección perimetral externa para evitar alguna interacción no considerada ni deseada.

La condición elástica del material también es visible en su diseño y en lo planteado en el anteproyecto de norma [1], particularmente en lo asociado al diseño de las conexiones apernadas. El diseño de éstas en materiales de FRP resultan más complejas que en el caso de materiales más dúctiles como el acero, debido al hecho de que los elementos de FRP tienen diferentes formas de falla, y a que su resistencia está condicionada a la geometría de la carga (dirección en función a la dirección de pultrusión). Es por ello además que el documento [1] recomienda que los conectores entre piezas de FRP sean de acero por su ductilidad, y además resultar para el proyectista más versátil para su diseño.

Los puntos anteriormente indicados son factibles de considerar en el diseño de la estructura. Pero el anteproyecto de norma [1], en el cálculo de la resistencia a compresión, incorpora un factor asociado a la fabricación del elemento de FRP y relacionado a las desviaciones en la rectitud del elemento (*out-of-straightness*). Esto obliga a solicitar al fabricante de los elementos de FRP la verificación de este parámetro, teórica y prácticamente. Esta desviación es usualmente controlada por los fabricantes (al menos los internacionales) pero por características del propio proceso de pultrusión no resulta evidente su cumplimiento.

Si bien la proyección de estructuras en elementos de FRP tiene puntos de cuidado, como probablemente exista para otros tipos de materiales. las herramientas presentadas por [1] permiten el diseño, particularmente para una sala eléctrica. Para un desarrollo más certero y confiable, se esperaría el paso de [1] a una versión definitiva para posterior exploración de los diferentes interesados, y de manera de universalizar el diseño en FRP más allá de las guías de diseño de cada fabricante. Esta versión definitiva es camino además para que los programas de diseño lo incorporen a su biblioteca, abriendo la opción de un diseño más rápido ya sea totalmente en FRP, o como complemento a estructuras de otros materiales.

6.2 Costos en el Uso de Elementos de FRP

Se ha mencionado que los elementos de FRP tienen una resistencia específica mayor que el acero, pero un punto en contra es que su valor por peso o volumen es mayor. A nivel local, con la información facilitada por el fabricante, el valor es de aproximadamente 8,3 [USD/kg], corresponde a aproximadamente 5 veces el valor del acero (considerando el acero a 1,75 [USD/kg]). Y para una misma función, particularmente para un elemento sometido a flexión como es planteado en el ejemplo del apartado 6.1, un elemento de FRP está en torno a costar 3 a 3,6 veces más que el elemento de acero para la misma función. Estos son ejemplos que nos conducen a que la fabricación de la estructura en FRP resulta más costosa que implementarla en acero y lo que coincide con otros documentos que presentan como desventaja el hecho de que los costos iniciales de elementos de FRP son elevados [28]. En el punto 5.1 de este documento, si bien no sigue esa proporción, se presenta que la solución de la sala en FRP, comparando costos de materiales, es un

23% más costosa que la solución en acero, considerando que para este caso el cambio de materialidad no es uno a uno, al mantener perfiles de acero en el chasis y elementos de acero en su recubrimiento.

Una de las razones de que el cambio de material no fuera total se menciona en 6.1, asociado al cumplimiento de la resistencia a la flexión y limitación de las deformaciones. En el caso de los elementos de acero del chasis, la solución en FRP implica importar material desde el extranjero, en donde por catálogo tienen el elemento en las dimensiones necesarias. Esta opción encarecería el proyecto, tanto por los efectos de transporte como por el cambio de material, poniendo en duda su implementación. Este asunto resalta también el limitado abanico de perfiles con los que se cuentan en el país, ya que podemos considerar sólo a un fabricante. Esta nula competencia deja a manos del fabricante la determinación de precios, dejando como límite el valor de importación del material, el cual además debe ser en volumen para conveniencia.

La poca promoción del uso de los perfiles estructurales en FRP limita su venta a proyectos de mediana o gran envergadura. El fabricante no maneja un stock permanente de elementos por lo que su fabricación es directa para el proyecto. Según información del fabricante, la compra mínima ideal son 100 metros por perfil, de manera de distribuir las mermas generadas por la puesta en marcha del proceso de fabricación bajo el sistema de pultrusión. El proyecto de sala eléctrica, según lo presentado en la tabla 4.10, contempla el uso de 3 tipos de perfil de FRP. El mayor metraje llega a los 80 metros, por debajo de lo recomendado. Esto podría llevar a sobreestimar los elementos de manera de llegar a la cuota mínima, a no ser que se proyecten varias unidades.

En el punto 5.2 se plantea que puede existir una disminución de costos producto del transporte de la sala, al resultar ésta más liviana. Esta disminución no es principalmente considerable, pero colabora en bajar los costos de material.

Según lo planteado, la fabricación de una sala eléctrica en FRP resulta más costosa que su fabricación en elementos de acero. Serán otras condiciones, como por ejemplo la logística de su montaje según la accesibilidad al área de faena, o si es parte de una serie de partidas como parte de un proyecto que permita compensar el costo adicional, lo que definiría su implementación o elección en vez del acero, entre otras razones que podrían ser consideradas en evaluaciones futuras y asociadas a cada proyecto en particular.

6.3 Conclusiones

De acuerdo con los resultados de este trabajo, técnicamente es posible proyectar una sala eléctrica en elementos de FRP. Se cuenta con el anteproyecto de norma el cual entrega directrices para su diseño en base a la recopilación de años de investigación. Su aprobación final podrá dar curso a su consideración masiva para el diseño y su implementación sobre programas de cómputo que faciliten la tarea. Como resultado final, es posible obtener una solución más liviana, lo que permite una mayor maniobrabilidad en las operaciones de montaje, un mejor desempeño cuando las vías de acceso a la obra están condicionadas al peso, e incluso en caso de que se deba armar directamente en sitio a modo de mecano.

Esta ventaja no resulta directa para condiciones normales, en donde no hay inconvenientes en el transporte o montaje. En este escenario, la solución en FRP resulta más costosa y, cuando no se instala en ambientes especiales, no presenta ventajas que destaquen por sobre la construcción en

acero. De hecho, la versatilidad de las conexiones entre elementos de acero, en particular su capacidad de ser unidos por cordones de soldadura, elimina la necesidad de piezas adicionales para la conexión entre elementos y, quizás más importante para este tipo de salas, permite la generación de unidades del tipo monocasco, en donde su envolvente además colabora en su comportamiento estructural.

El diseño planteado se asemeja a la construcción de un pequeño galpón, y es planteado así debido a las siguientes razones: primero, busca disminuir el peso de la pared, que en el caso de acero al funcionar como elemento estructural tiene una participación no menor; segundo, las conexiones planteadas en [1] son apernadas; tercero, la disponibilidad de elementos estructurales de FRP es limitada en el país y asociada principalmente a perfiles. Dado que el sistema de marcos es la principal portante de cargas, la pared de la sala, si bien se mantuvo en acero, se pudo optar por una opción más liviana. Para las conexiones, y en lo que podría ser un acercamiento a la soldadura, no se plantea el uso de adhesivos entre elementos para fijación estructural. Este tipo de unión es utilizada en elementos no estructurales, pero su incorporación a uso estructural abre un abanico no menor de posibilidades según el fabricante y fórmula del adhesivo, de la composición del elemento FRP, entre otros. En el caso de que se normalizara el uso de adhesivos podría permitir aproximarse a diseñar una estructura monocasco, considerando que fabricantes extranjeros manejan en sus catálogos paneles que podrían funcionar de manera estructural para los muros. Sin embargo, soluciones como esta, que pudieran ser fabricadas en el país, se ven lejos de ser implementadas.

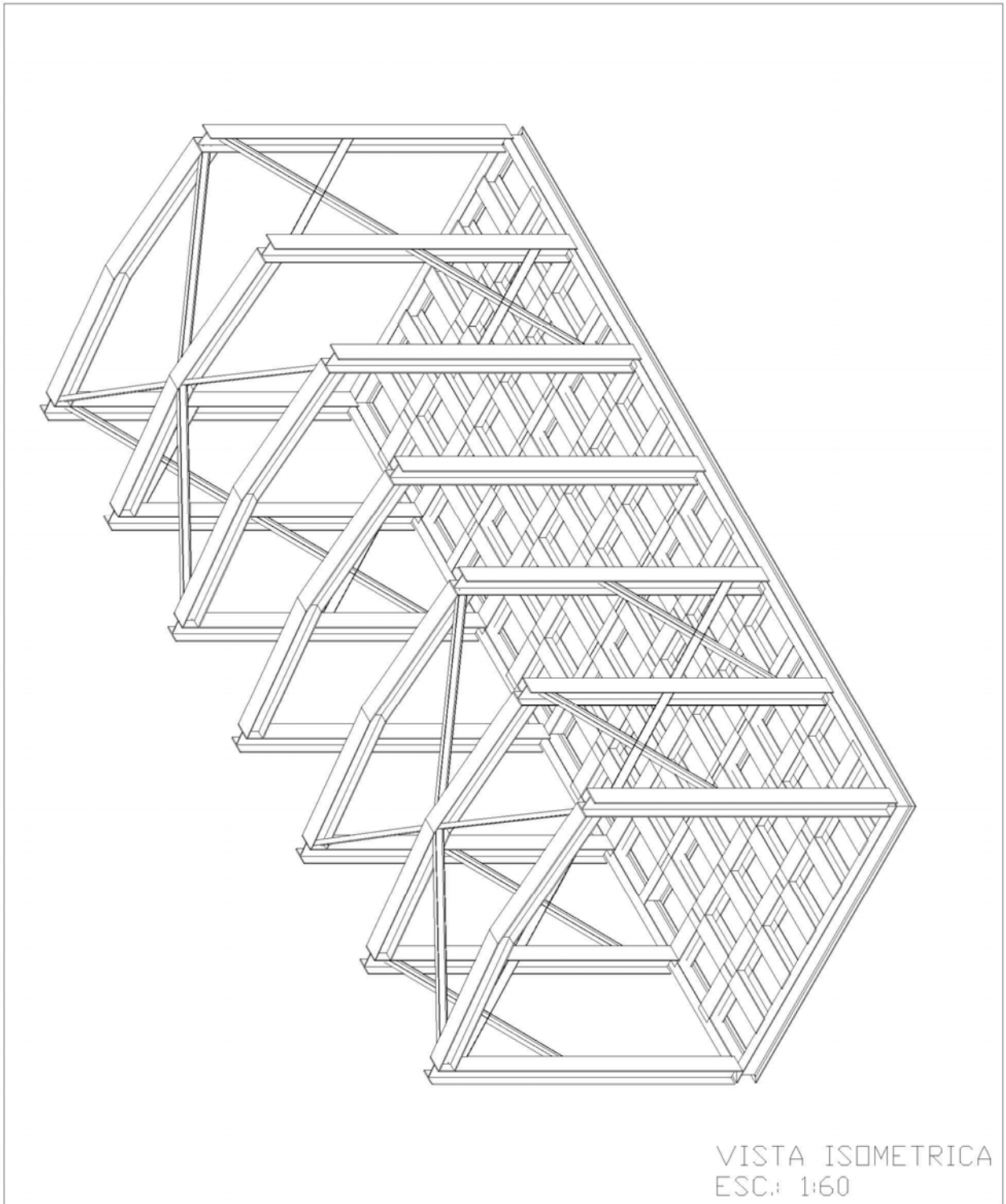
El trabajo resuelve la interrogante respecto a la posibilidad de diseñar una sala en elementos de FRP, pero es posible que este tipo de construcción no sea el óptimo para su uso. Sus ventajas como material están en el comportamiento longitudinal del elemento, lo que podría llevarlo a tener un mejor comportamiento en estructuras reticuladas, como son las asociadas a equipos de patio en subestaciones, o a estructuras altas como marcos de línea y torres de tendido eléctrico. Su bajo peso en comparación al acero podría ser ventaja para estructuras de emergencia. Y el uso en conjunto con otros materiales en el mismo elemento (uniones FRP-acero) da pie para optimizar sus ventajas y controlar sus desventajas. Lo anterior debe ir en conjunto con el aumento de las opciones en el mercado nacional, tanto en el número de participantes como en el abanico de productos que se ofrezcan. Será necesario entonces, continuar circulando por la curva de aprendizaje asociado a este material, para aumentar el interés y atractivo de utilizar elementos de FRP.

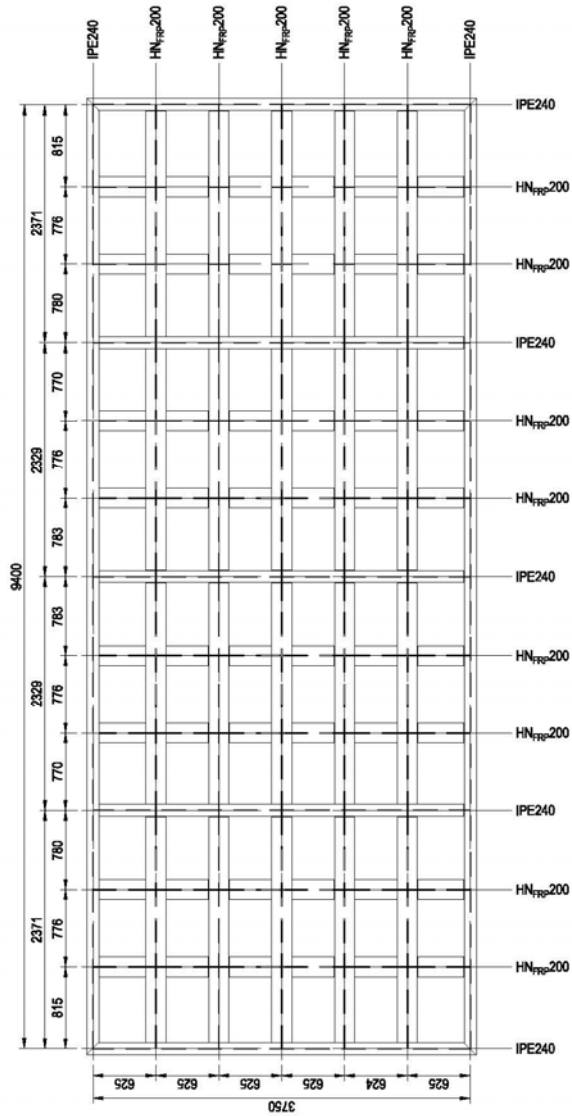
Bibliografía

1. American Society of Civil Engineers: ASCE. 2010. Pre-Standard for Load & Resistance Factor Design (LRFD) of Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures.
2. Instituto Nacional de Normalización: INN. 2010. Diseño estructural - Disposiciones generales y combinaciones de cargas. NCh3171:2017.
3. Instituto Nacional de Normalización: INN. 2003. Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales. NCh2369:2003.
4. Instituto Nacional de Normalización: INN. 2009. Diseño estructural - Cargas permanentes y cargas de uso. NCh1537:2009.
5. Instituto Nacional de Normalización: INN. 2010. Diseño estructural - Cargas de viento. NCh432:2010.
6. Bakis, C. E., Bank L. C Brown., V. L., Cosenza E., Davalos J. F., Lesko J. J., Machida A., Rizkalla S. H. y Triantafillou T. C. 2002. Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction - State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction* 6(2): 73-87.
7. Masuelli, M.A. 2013. Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes. *En: Fiber Reinforced Polymers-The Technology Applied for Concrete Repair*. Rijeka, Intech, pp. 3-40.
8. The Pultrusion Process. [En línea] <<https://www.creativepultrusions.com/index.cfm/products-solutions/fiberglass-pultrusion-process/>> [Consulta: 23/08/2020].
9. Velo, estera y tejido de fibra de vidrio. [En línea] <https://www.fibreglast.com/category/Fiber-glass_Mat> [Consulta: 04/06/2020].
10. Cintac S.A. 2019. Cubiertas y Revestimientos. [En línea] <<https://www.cintac.cl/wp-content/uploads/2020/09/Catalogo-instapanel-2020-1.pdf>> [Consulta: 23/08/2020].
11. Fibra de vidrio FRP. [En línea] <<https://femoglas.com/>> [Consulta: 23/08/2020].
12. Franco, E. Diseño de pasarelas de emergencia conformadas por perfiles FRP. Tesina. Barcelona, España. Universidad Politecnica de Cataluña. 2008.
13. Puente peatonal construido con GFPR. [En línea] <<http://www.ctsbridges.co.uk/>> [Consulta: 23/08/2020].
14. National Research Council. CNR. 2004. Guide for the design and Construction of Structures made of FRP Pultruded Elements. CNR-DT 200/2004.
15. Ascione, L., Caron, J.F., Godonou, P., Van IJselmuiden, K., Knippers, J., Mottram, T., Oppe, M., Gantriis Sorensen, M., Taby, J. y Tromp, L. 2016. Prospect for new guidance in the design of FRP. EUR 27666 EN; doi:10.2788/22306.
16. American Society for testing and Material: ASTM. 2017. Standard Practice for Evaluating Material Property Characteristic Values for Polymeric Composites for Civil Engineering Structural Applications. ASTM D7290 – 06:2017.
17. Catálogo de productos. [En línea] <<https://www.topglass.it/en/home-en/>> [Consulta: 08/08/2020].
18. Sala eléctrica modular. [En línea]. < https://www.ingeteam.com/cl/es-cl/sectores/siderurgia/p15_29_61/ingehouse.aspx> [Consulta: 08/08/2020].
19. Ministerio de Obras Públicas. 2018. Manual de autorizaciones para transportes especiales. [En línea] <http://www.vialidad.cl/DocumentosAreasVialidad/Manual_Autorizaciones_para_transportes_especiales_v2018.pdf> [Consulta: 15/07/2020].
20. The Match Up – FRP vs Steel. [En línea] <<https://protector.com.au/q-the-match-up-frp-fibre-reinforced-polymers-vs-steel/#:~:text=Pound%20to%20pound%2C%20FRP%20is,of%20FRP%20over%20steel%20appear>> [Consulta: 22/05/2020].

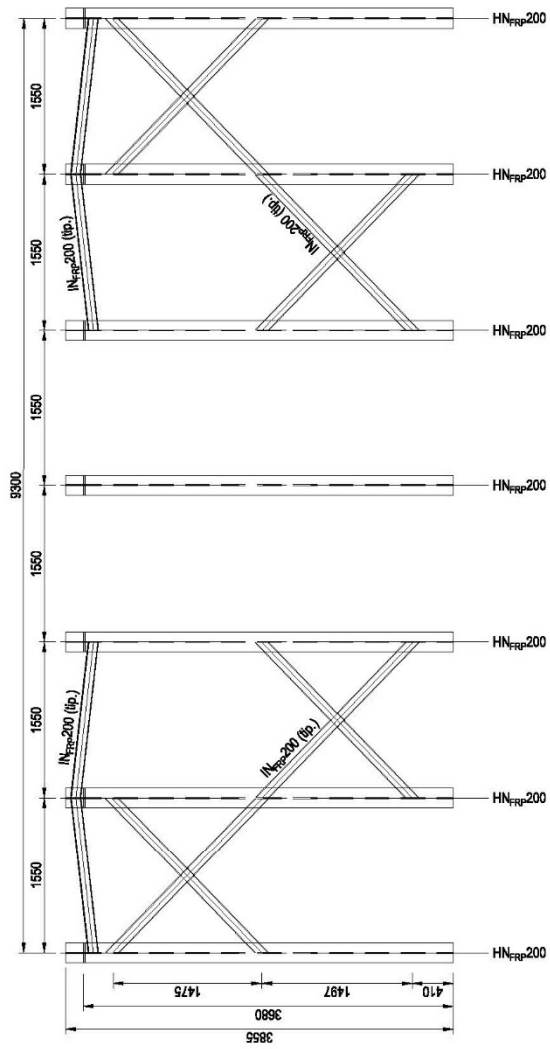
21. Barbero, E.J. 2011. Introduction to composite materials design. 2da. Ed. EE.UU. CRC Press. 552 p.
22. Hull, D. 1995. An Introduction to Composite Material. EE.UU. Cambridge University Press. 246 p.
23. Carbon Fiber Reinforced Polymer (GFRP). [En línea] <<https://www.sika.com/en/construction/structural-strengthening/carbon-fiber-reinforced-polymer-plates.html>>[Consulta: 30/10/2020].
24. Starr, T. 2000. Pultrusion for engineers. Inglaterra. CRC Press. 303 p.
25. 2014. Salas Eléctricas: Integrando tecnologías en beneficio de la industria. [En línea] Revista Electroindustria. Diciembre 2014. <<http://www.emb.cl/electroindustria/revista.mvc?edi=124>> [Consulta: 18/07/2020].
26. Instituto Nacional de Normalización: INN. 2001. Construcción – Barras de plástico reforzado con fibras de vidrio, fibras de carbono y fibras arámida – Requisitos. NCh2577:2001.
27. Catálogo de productos. [En línea] <<https://www.strongwell.com/products/structural-shapes-and-plate/>> [Consulta: 04/04/2020].
28. Kluff, C. 2011. Feasibility of Constructing a Fibre Reinforced Polymer Composite Bridge. University of New South Wales at the Australian Defence Force Academy. 18 p.

Anexo 2: Diagramas Sala FRP

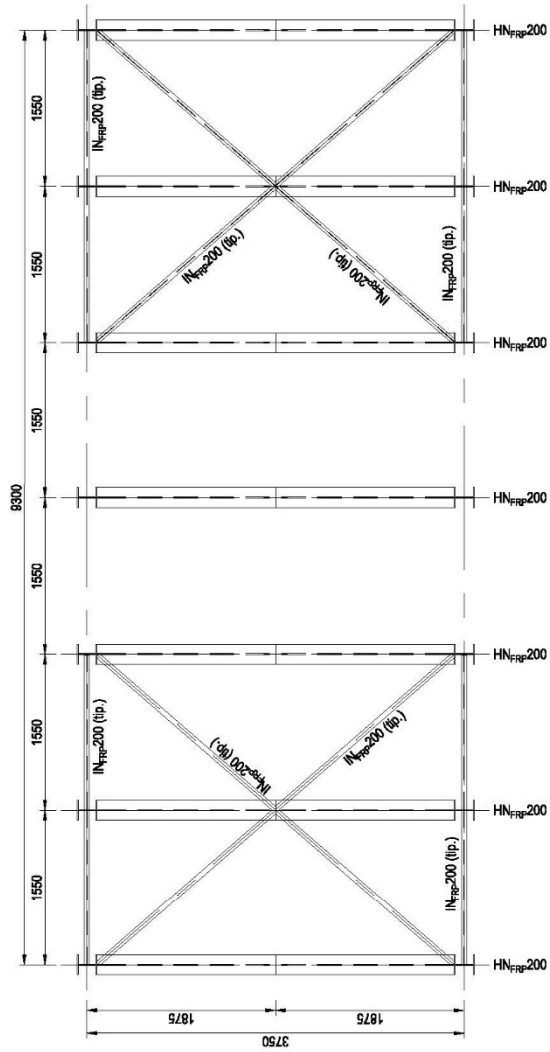




PLANTA CHASIS
 ESC.: 1:75



ELEVACION LATERAL
 ESC.: 1:75



PLANTA TECHO
 ESC.: 1:75

Anexo 3: Revisión Elementos Marco

DISEÑO A TRACCIÓN

$$P_u \leq \lambda \phi P_n \quad \longleftrightarrow \quad \frac{P_u}{\lambda} \leq \phi P_n$$

λ	<i>Según combinación de carga</i>	
ϕ	0,65	
F_n	206,85	MPa
F_n	2,11E+07	kgf/m ²

Resistencia nominal a la tracción

$$P_n = F_n A_g$$

Perfil	HN200x200x12	
A_g	6.912	mm ²
P_n	1.430	kN
P_n	145.893	kgf
ϕP_n	929	kN
ϕP_n	94.830	kgf

Fractura en area efectiva

$$P_n = 0,7 F_n A_e$$

Perfil	HN200x200x12	
A_g	6.912	mm ²
A_{min}	5.184	mm ²
A_n	6.169	mm ²
U	0,7	
A_e	4.318	mm ²
P_n	625.273	kN
P_n	63.803	kgf
ϕP_n	406.428	kN
ϕP_n	41.472	kgf

<u>Pilar</u>		
P_u/λ	910	kgf
ϕP_n	41.472	kgf
FU	0,02	
<u>Cercha</u>		
P_u/λ	210	kgf
ϕP_n	41.472	kgf
FU	0,01	

DISEÑO A COMPRESION

$$P_u \leq \lambda \phi_c P_n \leq 0.7 \lambda F_L^c A_g \quad (4.2-1)$$

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g \quad (4.2-2)$$

$$P_u \leq \phi_c \frac{\pi^2 E_L}{\left(\frac{KL_e}{r}\right)^2} A_g \leq 0.3 F_L^c A_g \quad (4.2-3)$$

λ	Según combinación de carga			
ϕ_c	Según geometría de sección			
EL	2,11E+09	kgf/m ²		
ET,w	7,04E+08	kgf/m ²		
vlt	0,33			
Glt	2,81E+08	kgf/m ²		
Ps	630	kgf		
Perfil	HN200x200x12		HN200x200x12	
Ubicación	Pilar		Cercha	
bf	200	mm	200	mm
tf	12	mm	12	mm
tw	12	mm	12	mm
h	200	mm	200	mm
Ag	0,006912	m ²	0,006912	m ²
Condicion x-x	emp-emp			
Kx	0,5		0,5	
rx	81,6	mm	81,6	mm
Lx	3760	mm	1975	mm
	23,0	razon de esbeltez	12,1	razon de esbeltez
Condicion y-y	emp-emp			
Ky	0,5		0,5	
ry	47,2	mm	47,2	mm
Ly	3760	mm	1975	mm
	39,8	razon de esbeltez	20,9	razon de esbeltez
Pd	630	kgf	50	kgf
	213	límite razón de esbeltez (o 300)	300	límite razón de esbeltez (o 300)
Fcrx	39.245.857	kgf/m ²	142.244.441	kgf/m ²
	4,0	MPa	14,5	MPa
fcx	0,7		0,7	
fcxFcrx	27.472.100	kgf/m ²	99.571.109	kgf/m ²
	2,8	MPa	10,2	MPa
fcxPnx	189.887	kgf	688.236	kgf
	19.376	N	70.228	N
Fcry	13.130.991	kgf/m ²	47.592.551	kgf/m ²

Øcy	0,7		0,7	
ØcyFcy	9.191.693	kgf/m ²	33.314.786	kgf/m ²
ØcyPcy	63.533	kgf	230.272	kgf
Fcrf	4.052.571	kgf/m ²	4.052.571	kgf/m ²
Øcf	0,8		0,8	
ØcfFcrf	3.242.057	kgf/m ²	3.242.057	kgf/m ²
ØcfPcrf	22.409	kgf	22.409	kgf
Fcrw	11.924.400	kgf/m ²	11.924.400	kgf/m ²
Øcw	0,8		0,8	
ØcwFcrw	9.539.520	kgf/m ²	9.539.520	kgf/m ²
ØcwPcrw	65.937	kgf	65.937	kgf
ØcPn	22.409	kgf	22.409	kgf
0,7FclAg	102.125	kgf	102.125	kgf
∣Pu/λ	2.608	kgf	660	kgf
FU	0,026		0,006	

DISEÑO A FLEXION

l	Según combinación de carga	
Ø	Según tipo de falla estudiado	
Ømr	0,65	por ruptura de material
Øfwi	0,80	por inestabilidad local (ala, alma)
Øltb	0,70	por pandeo lateral-torsional

Ruptura de material

FLf	2,11E+07	kgf/m ²			
	206,85	MPa			
FLw	2,11E+07	kgf/m ²			
	206,85	MPa			
FL	2,11E+07	kgf/m ²			
	206,85	MPa			
ELf	2,11E+09	kgf/m ²			
	20685,00	MPa			
ELw	2,11E+09	kgf/m ²			
	20685,00	MPa			
ETf	7,04E+08	kgf/m ²			
	6895,00	MPa			
ETw	7,04E+08	kgf/m ²			
	6895,00	MPa			
GLT	2,81E+08	kgf/m ²	2,99E+08		
	2758,00	MPa	2930	420000	psi
vLT	0,33				
Mnx	116.586.866	N-mm			
	11.896,62	kgf-m			
ØmrMnx	75.781.463	N-mm			
Mny	7.732,80	kgf-m			
	41.420.637	N-mm			
ØmrMny	4.226,60	kgf-m			

Perfil HN200x200x12

Ubicación Pilar

bf 200 mm

12mm, original. 15mm, para cumplimiento del pandeo local ala por momento en eje debil

tf 15 mm

tw 12 mm

h 200 mm

Ag 8040 mm²

Ag 0,006912 m²

Ifx 51.450.000 mm⁴

Iwx 4913000 mm⁴

Ix 5,64E+07 mm⁴ 47.922.176 110.293.333 2,301509292

Ify 2,00E+07 mm⁴

Iwy 2,45E+04 mm⁴

Iy 2,00E+07 mm⁴

Inestabilidad local (ala, alma)

Pandeo local por flexion del ala

kr	9103,653	(kN/rad)			
ξ	2,13E-06				
fcrx	333,54	MPa			
Mn_fx	187.995.652	N-mm			
	19.183,23	kgf-m			
fcrx	62,06	MPa			
Mn_fy	12.426.191	N-mm			
	1.267,98	kgf-m			
ØfwiMny	9.940.953	N-mm	12	13	15
	1.014,38	kgf-m	519,55	660,47	1.014,38

Pandeo local por flexion del alma

fcr	746,69	Mpa
Mn_wx	420.858.536	N-mm
Mn	187.995.652	N-mm
	19.183,23	kgf-m
ØfwiMnx	150.396.522	N-mm
	15.346,58	kgf-m

Pandeo Lateral Torsional

Cb	1,6		l = conservador; calculado en hoja de Estados de Carga		
				division de	
Lb	3760	mm	1	pilar	optimo 600mm (3760/6)
Elf	20685,00	MPa			
Iy	2,00E+07	mm ⁴			
GLT	2758,00	MPa			
Dj	1.511.163.360	N-mm ²			
C ω	2,00E+11	mm ⁶			
Mn	57.066.273	N-mm			
	5.823,09	kgf-m			
ØltbMn	39.946.391	N-mm			
	4.076,16	kgf-m			
ØMn	4.076,16	kgf-m	1.014,38	kgf-m	
Mu/λ	979	kgf-m	733,33	kgf-m	sap, 4.1
FU	0,240		0,723		

DISEÑO A CORTE

λ Según combinación de carga

Ø	Según tipo de falla estudiado	
Ørs	0,65	ruptura por corte
Øwsb	0,80	pandeo del alma

Ruptura por tensión de corte

FIt	55,16	Mpa
As	6912	mm ²
Vn	381.266	N
ØVn	247.823	N
	25.288	kgf

Pandeo en alma por tensión de corte

GLT	2758,00	Mpa
Etw	6895,00	Mpa
vLT	0,33	
Elw	20685,00	Mpa
[1]	7791,35	MPa
[2]	11942,49	MPa

[1]

[2]

$$2G_{LT} + E_{T,w}v_{LT} \text{ and } \sqrt{E_{L,w}E_{T,w}}$$

[1] < [2]	VERDADERO	
kLT1	11,36	
fcr	123,72	MPa

[1] > [2]	FALSO	
kLT2	14,99	
fcr	131,84	MPa

Vn	855.176	N
ØVn	684.141	N
	69.810	kgf

ØVn	25.288	kgf
Vu/λ	710	kgf
FU	0,028	

DISEÑO A CARGAS PUNTUALES

Aplica en soportes o cargas puntuales

λ	Según combinación de carga	
Ø	Según tipo de falla estudiado	
Øns	0,65	
Øwc	0,70	
Øwcb	0,80	
Øfff	0,65	

Resistencia nominal de elementos debido a ruptura por tracción del alma

lten	3	mm
Ftw	48,27	Mpa
tw	12	mm
Rn	1.738	N
ØnsRn	1.129	N

Resistencia nominal de elementos ante aplastamiento del alma

h	200	mm	7,9	in
tw	12	mm		
Fsh	24,13	Mpa		
k	0	mm		

tplate	0	mm
bplate	0	mm
dw	170	mm
Rn	40.543	N
ØwcRn	28.380	N

Resistencia nominal de elementos ante el pandeo del alma por compresion

dw	170	mm	
leffo	0	mm	distancia entre atiesadores
leff	170	mm	mínimo entre distancia entre atiesadores y profundidad del alma (dw)
tw	12	mm	
Aeff	2.040	mm ²	
Elw	20685,00	Mpa	
Etw	6895,00	MPa	
GLT	2758,00	MPa	
vlt	0,33		
fcR	161,74	Mpa	
Rn	329.955	N	
ØwcbRn	263.964	N	

Resistencia nominal de elementos ante falla por flexión del ala

Cargas excentricas respecto al alma de la sección

Ftf	48,27	Mpa	
tf	15	mm	
le	50	mm	excentricidad de la carga respecto al alma
b	100	mm	
Rn	3.620	N	
ØffRn	2.353	N	
ØRn	1.129	N	
Rn/λ	483,6	N	403
FU	0,428		N

DISEÑO A FUERZAS AXIALES Y FLEXIÓN

Flexocompresion

$$\frac{P_u}{P_c} + \frac{M_{ux}}{M_{cx}} + \frac{M_{uy}}{M_{cy}} \leq 1.0 \quad (6.2-1)$$

FU_comp	0,026	
FU_flex.x	0,240	
FU_flex.y	0,723	
	0,989	OK

Flexotraccion

FU_tracc	0,022	
FU_flex.x	0,240	
FU_flex.y	0,723	
	0,985	OK