



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

**EVALUACIÓN DE SOLUCIONES DE ENCAPSULAMIENTO DE GRANELES SUCIOS PARA CONTROL DE
DISPERSIÓN DE POLVOS CONTAMINANTES.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

GONZALO PATRICIO TAPIA VALENCIA

PROFESOR GUÍA
HUGO BAESLER CORREA
MIEMBROS DE LA COMISIÓN
RICARDO HERRERA MARDONES
JOSÉ GONZÁLEZ WILLSON

SANTIAGO DE CHILE

JUNIO 2012



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

**EVALUACIÓN DE SOLUCIONES DE ENCAPSULAMIENTO DE GRANELES SUCIOS PARA CONTROL DE
DISPERSIÓN DE POLVOS CONTAMINANTES.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

GONZALO PATRICIO TAPIA VALENCIA

PROFESOR GUÍA
HUGO BAESLER CORREA
MIEMBROS DE LA COMISIÓN
RICARDO HERRERA MARDONES
JOSÉ GONZÁLEZ WILLSON

SANTIAGO DE CHILE

JUNIO 2012

Resumen.

El objetivo principal del presente trabajo es realizar una evaluación entre distintas soluciones que se pueden adoptar para solucionar el problema de la dispersión de polvos contaminantes producido a partir de acopios de graneles sucios. Se da énfasis principalmente a los acopios de carbón utilizados en las centrales termoeléctricas.

Actualmente en Chile se evalúan nuevas normativas para regular las emisiones al ambiente y las exigencias para aprobar los proyectos potencialmente dañinos para la población son cada vez mayores. De aquí la importancia que tiene evaluar medidas para minimizar el impacto de los nuevos proyectos en el ambiente.

En este trabajo se evalúan cuatro soluciones de almacenamiento de graneles sucios que actualmente son utilizados con diferentes propósitos en varios países, desde un punto de vista técnico y económico, buscando el que más se acomoda a un escenario representativo de la realidad nacional.

Las soluciones de almacenamiento que se evalúan son: estructura de acero de marcos rígidos, estructura mixta acero-hormigón de marcos rígidos, estructura de acero tipo domo y estructura tipo domo de hormigón proyectado.

Se determina el escenario a desarrollar a partir de proyectos energéticos que han sido aprobados durante los últimos años o que actualmente se encuentran en etapa de evaluación de modo que represente de manera fidedigna los requerimientos de futuros proyectos del área de interés.

Con el fin de poder realizar una comparación entre las soluciones se realiza una evaluación según distintos parámetros medibles de modo de poder determinar cual es la más adecuada dependiendo de las características de cada proyecto.

ÍNDICE.

1	Introducción.	9
1.1	Objetivos.....	10
1.1.1	Objetivos Generales.	10
1.1.2	Objetivos específicos.....	10
1.2	Metodología.	10
2	Antecedentes generales y marco teórico.	11
2.1	Aumento sostenido de la matriz energética en Chile.....	11
2.2	Antecedentes Ambientales.....	12
2.3	Normas ambientales presentes en Chile.	14
2.4	Centrales Termoeléctricas aprobadas durante los últimos años.	15
2.5	Efecto del viento sobre los acopios.	17
2.6	Medidas utilizadas para controlar la dispersión de polvos contaminantes.	18
2.6.1	Almacenamientos de cielo abierto.....	18
2.6.2	Almacenamientos encapsulados.....	19
2.7	Configuración pilas de acopio.....	23
2.7.1	Pila longitudinal.	23
2.7.2	Pilas cónicas.....	24
2.7.3	Pilas de anillo.	24
2.7.4	Pilas de forma libre.....	25
2.8	Materiales.	25
2.8.1	Acero.....	26
2.8.2	Hormigón Armado.	27
2.8.3	Hormigón proyectado.	28
3	Determinación de escenario a analizar.....	31
3.1	Características del escenario a trabajar.....	32
3.1.1	Antecedentes Relevantes.....	32
3.1.2	Escenario propuesto.....	33

4	Estructuración, diseño y modelación de las estructuras.	34
4.1	Estructura de marcos rígidos.	34
4.1.1	Requerimientos generales.....	34
4.1.2	Definición de la estructura.	35
4.1.3	Definición de los modelos estructurales computacionales.....	40
4.2	Estructura mixta hormigón armado-acero.	41
4.2.1	Requerimientos generales.....	41
4.2.2	Definición de la estructura.	42
4.2.3	Definición de los modelos estructurales computacionales.....	45
4.3	Domo monolítico de hormigón proyectado.	46
4.3.1	Requerimientos generales.....	46
4.3.2	Estructura a considerar.	47
4.4	Domo estructura metálica.	48
4.4.1	Requerimientos generales.....	48
4.4.2	Definición de la estructura.	48
4.4.3	Definición de los modelos estructurales computacionales.....	50
4.5	Definición de los modelos y estados de carga.....	51
4.5.1	Cargas permanentes.....	51
4.5.2	Sobrecargas de uso.....	51
4.5.3	Cargas medioambientales.	51
4.5.4	Combinaciones de carga.....	52
4.6	Definición de análisis sísmico.	53
4.6.1	Método de análisis.	53
4.6.2	Punto de aplicación de las cargas sísmicas.	53
4.6.3	Dirección de las cargas sísmicas.	53
4.6.4	Parámetros sísmicos de las estructuras.	54
5	Análisis de las estructuras.	55
5.1	Análisis de factibilidad técnica de las estructuras.	55

5.1.1	Solución galpón marcos rígidos.....	57
5.1.2	Solución tipo estructura mixta.	59
5.1.3	Estructura tipo domo de Hormigón proyectado.	60
5.1.4	Estructura tipo domo metálico.....	61
5.2	Presupuestos.....	62
5.2.1	Estructura de marcos rígidos.....	63
5.2.2	Estructura Mixta acero hormigón.	64
5.2.3	Estructura tipo domo de hormigón proyectado.	65
5.2.4	Estructura tipo domo de acero.....	66
5.3	Evaluación soluciones.	66
5.3.1	Descripción de ponderadores.	66
5.3.2	Ponderación de soluciones.....	68
5.3.3	Observaciones a la evaluación.	69
6	Conclusiones.....	71
6.1	Conclusiones de la factibilidad técnica.....	71
6.2	Factibilidad económica.	71
6.3	Conclusiones de la evaluación de las estructuras.	72
6.4	Otros alcances.....	72
7	Bibliografía y referencias.....	74

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1: Centrales Termoeléctricas a carbón aprobadas recientemente en Chile	16
Tabla 3.1: Centrales Termoeléctricas y capacidad instalada.....	32
Tabla 4.1: Elementos estructura marcos rígidos.....	38
Tabla 4.2: Propiedades geométricas elementos estructura marcos rígidos.....	38
Tabla 4.3: Elementos estructura mixta.	44
Tabla 4.4: Propiedades geométricas elementos estructura mixta.	44
Tabla 4.5: Elementos estructura domo de acero.	49
Tabla 4.6: Propiedades geométricas estructura domo de acero.	50
Tabla 4.7: Parámetros análisis sísmico	54
Tabla 5.1: Presupuesto estructura marcos rígidos.....	63
Tabla 5.2: Presupuesto estructura mixta.	64
Tabla 5.3: Presupuesto estructura domo Turner según área.	65
Tabla 5.4: Presupuesto domo Turner según volumen almacenado.	65
Tabla 5.5: Presupuesto estructura domo de acero.....	66
Tabla 5.6: Ponderación por estructura.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 2.1: Esquema central Termoeléctrica a carbón.....	13
Figura 4.1: Vista frontal estructura marcos rígidos.....	36
Figura 4.2: Vista lateral estructura marcos rígidos.....	36
Figura 4.3: Vista superior estructura marcos rígidos.	37
Figura 4.4: Vista isométrica estructura marcos rígidos.....	37
Figura 4.5: Detalle vista frontal elementos estructura marcos rígidos.....	39
Figura 4.6: Detalle vista lateral elementos estructura marcos rígidos.	39
Figura 4.7: Detalle vista superior elementos estructura marcos rígidos.	40
Figura 4.8: vista frontal estructura mixta.	42
Figura 4.9: Vista lateral estructura mixta.	42
Figura 4.10: vista superior estructura mixta.	43
Figura 4.11: Vista isométrica estructura mixta.	43
Figura 4.12: Elementos estructura mixta.	45
Figura 4.13: Elementos estructura mixta.	45
Figura 4.14: Vista isométrica estructura domo de acero.	49

1 Introducción.

El creciente requerimiento energético del país ha propulsado grandes inversiones en sistemas de generación de energías: centrales hidroeléctricas, eólicas y termoeléctricas. Si bien las dos primeras no presentan problemas desde el punto de vista que enfrenta esta memoria, las centrales termoeléctricas basan su funcionamiento en la combustión de carbón, material que almacenan en acopios que no evitan la dispersión de polvos contaminantes. Dada además la economía relativa que presenta esta solución energética es de esperar que se sigan construyendo este tipo de centrales a una tasa similar o mayor que en la actualidad.

Si bien hasta hoy ha sido posible mantener estos sistemas de almacenamiento solo con soluciones de barras de control de polvo, de un tiempo a esta parte los criterios de las autoridades ambientales han ido cambiando, no siendo ya permitido en algunos proyectos, lo cual posiblemente en un corto plazo sea establecido como una regla a cumplir por todos los proyectos, con un estándar similar o siguiendo las tendencias de países desarrollados donde todos los acopios de gráneles sucios deben encapsularse de manera de controlar de forma total y efectiva la dispersión de polvo debido al viento.

Es en este momento cuando se hace necesario tener una evaluación de las posibles soluciones que se manejan en otros países, o que se pueden desarrollar en Chile, de manera de poder tomar la mejor decisión técnica y económica frente a esta ineludible situación.

En el desarrollo de este trabajo de título se evaluarán cuatro sistemas de almacenamiento que actualmente se utilizan en Chile para almacenar otro tipo de materiales o productos, pero dadas las dimensiones de los acopios, por ejemplo de carbón, deberán ser modificados, de manera que en primera instancia se evaluará la factibilidad técnica de desarrollar dichas tecnologías a tal escala y posteriormente se concluirá con una evaluación económica de aquellas que resulten viables.

1.1 Objetivos.

1.1.1 Objetivos Generales.

El objetivo de este trabajo de título es la evaluación de distintas soluciones para el encapsulamiento de almacenamientos de gráneles sucios de manera de evitar o controlar la dispersión de partículas de polvo que puedan resultar contaminantes.

1.1.2 Objetivos específicos

Determinar cuál de las soluciones evaluadas resuelve de mejor manera el problema planteado, tanto técnica como económicamente.

1.2 Metodología.

- Recopilación de antecedentes

- Determinación de la situación actual y futura de los almacenamientos de gráneles sucios de modo de poder realizar una evaluación que responda a las necesidades reales del medio.

- Pre diseño de estructuras que puedan solucionar el problema de dispersión de polvos contaminantes en acopios de gráneles sucios.

- Análisis de posibles falencias de las soluciones de modo de afinar los modelos.

- Diseño final de modelos a aplicar como solución del problema.

- Comparación entre soluciones desde un punto de vista técnico.

- Comparación de soluciones desde un punto de vista económico.

- Determinación, en base a los antecedentes recopilados de la mejor solución al problema, dadas las características de la situación analizada.

- Conclusiones y recomendaciones.

2 Antecedentes generales y marco teórico.

2.1 Aumento sostenido de la matriz energética en Chile.

Dado el crecimiento económico que ha presentado Chile durante los últimos años y las tasas de crecimiento proyectadas, se espera que los requerimientos energéticos igualmente sean mayores que los actuales. En Chile el principal punto de ingreso proviene de la gran minería, actividad en la que se utilizan cantidades importantes de energía eléctrica, de modo que aumentar la generación de electricidad es un tema prioritario en la agenda país. Asimismo la industria de manufactura ha mostrado un desarrollo sostenido durante los últimos años aumentando los requerimientos energéticos de este sector.

En el año 2010 el crecimiento de nuestro país fue cercano al 6% y cifras similares se manejan para el año 2011 y si bien no se espera que el país crezca a esta tasa indefinidamente, si se ve un escenario favorable para el desarrollo económico nacional en el corto y mediano plazo ya que varias de las condiciones necesarias para que dicho crecimiento se logre ya están, o se están tomando las medidas necesarias para fomentarlas. Pero todas estas condiciones de desarrollo y crecimiento necesitan como base fundamental un aumento de la generación eléctrica acorde a los nuevos requerimientos.

De aquí que se haga importante buscar alternativas para satisfacer estos crecientes requerimientos y aumentar la matriz generadora del país. Las alternativas de generación más utilizadas actualmente en Chile, son la energía hidroeléctrica (embalse y pasada), centrales termoeléctricas (carbón, gas natural GN, ciclo combinado y petróleo) y en menor medida fuentes no convencionales (eólicas, pequeña hidroeléctrica, etc.) y para lograr cumplir con las proyecciones de la demanda actualmente se trabaja en proyectos en cada uno de estos frentes.

Para este trabajo tienen importancia principalmente aquellas centrales que basan su funcionamiento en energía termoeléctrica obtenida en base a combustión de carbón. De modo que se enfocará el crecimiento de la matriz energética desde este punto de vista.

En Chile actualmente hay en funcionamiento más de 10 centrales termoeléctricas que funcionan con carbón con potencias instaladas desde unos pocos MegaWatts (MW) hasta grandes centrales con varias turbinas que pueden llegar a los 350 MW cada una. Esta generación de energía si bien tiene efectos adversos, principalmente para el medio ambiente, ha probado ser eficiente, confiable e independiente, en cierta medida, al país de

la disponibilidad de material de los proveedores, ya que puede ser obtenido de diversos lugares con calidades similares.

El tema de la economía también se hace presente al momento de elegir como opción a las centrales termoeléctricas por sobre otras tecnologías que han probado ser mas amigables con el ambiente. Si se compara el costo de instalación de una central termoeléctrica con fuentes de energía limpias tipo centrales geotérmicas, parques eólicos o energía solar el balance es muy positivo en favor de la energía a carbón. Existe abundante bibliografía respecto de los beneficios y contras de este tipo de energía, pero por el enfoque de este trabajo no se profundizará mayormente al respecto.

Teniendo en cuenta los antecedentes mencionados, además de otras particularidades que se mencionan más adelante en este trabajo, en Chile recientemente se han desarrollado numerosos proyectos de centrales termoeléctricas, algunos de los cuales ya se encuentran en operación, otros en construcción y un número importante aun en diseño o tramitación para su aprobación definitiva.

Uno de los principales problemas a los que se ven enfrentados este tipo de centrales, viene dado por las regulaciones ambientales respecto de emanaciones a la atmosfera, suelo y aguas.

2.2 Antecedentes Ambientales

Las centrales termoeléctricas actualmente son sometidas a estrictos procesos de evaluación de impacto ambiental antes de ser aprobadas, no solo se consideran las emanaciones ambientales producidas a partir de la combustión del carbón, si no que se someten a un proceso exhaustivo donde cada componente potencialmente dañino para el ambiente es revisado, tanto para la etapa de construcción, operación y abandono.

En la figura 2.1 se ve un esquema de una central termoeléctrica emplazada en el borde costero de modo de poder identificar los distintos componentes de estas centrales.



Figura 2.1: Esquema central Termoeléctrica a carbón.

Cada componente de las centrales debe cumplir con requerimientos de construcción y operación especificados claramente en normas chilenas o extranjeras, en caso de no existir normas nacionales, las instalaciones marítimas deben procurar no alterar los ecosistemas existentes en la zona o aledañas, los depósitos de ceniza deben ser confeccionados de manera tal que no se produzca dispersión por acción de los vientos tanto en la etapa de operación como en las etapas posteriores, además de procurar que no se contaminen fuentes hídricas existentes o que se afectan poblaciones autóctonas. Importantes son también las emisiones derivadas de la combustión del carbón como son dióxido de sulfuro (SO_2), dióxido de carbono (CO_2), partículas en suspensión, y óxidos del nitrógeno (NO_x), que alternadamente generan el ozono de superficie. Existe también control de las temperaturas de las aguas utilizadas en el sistema de refrigeración de las centrales, ya sea que utilicen agua de mar, como es el caso de las centrales ubicadas en el borde costero u otra fuente de agua donde se pueda comprometer el bienestar de los ecosistemas existentes o las fuentes de abastecimiento locales. Otra fuente de emisiones son las llamadas emisiones fugitivas, que son las emisiones que se liberan al aire producto

de la manipulación indirecta de los materiales, transporte de combustible, acción del viento sobre las canchas de acopio, fugas en las bandas transportadoras, etc.

Son justamente estas emisiones fugitivas las que pretende estudiar este trabajo, específicamente las ligadas a la acción del viento sobre las pilas de acopio de material. Si bien la motivación y modelos utilizados para la realización de este trabajo apuntan específicamente a acopios de carbón, el problema de la dispersión en Chile no solo ocurre en este tipo de acopios, se da también en acopios de caliza, concentrado de cobre y hierro, de modo que los conceptos aplicados aquí pueden ser extrapolados a otros campos.

2.3 Normas ambientales presentes en Chile.

La normas ambientales que regulan la dispersión de partículas contaminantes en Chile [1] son aquellas que rigen las cantidades de material particulado que un cierto tipo de proyecto puede liberar a la atmosfera, estos agentes contaminantes se agrupan, generalmente, en dos categorías, PM10 y PM2,5, cada una de estas representa un tamaño de partícula que puede ser respirado por las personas y afecta seriamente a la salud, PM10 hace referencia a las partículas de 10 μ m (diez micrómetros) consecuentemente PM2,5 son partículas de 2,5 μ m (dos y medio micrómetros).

Cada uno de estos grupos de contaminantes trae distintas consecuencias a la salud de las personas, pero ambas son importantes de controlar. Los problemas de salud asociados a estos contaminantes son principalmente de tipo respiratorio o derivados de estos, cáncer pulmonar, muertes prematuras, síntomas respiratorios severos, irritación de nariz y ojos, silicosis, asbestosis, asma y enfermedades cardiovasculares se cuentan entre los problemas que la exposición continua a estas partículas puede acarrear. Estudios internacionales relacionan directamente aumento de enfermedades y muerte a la exposición a estas fuentes de contaminantes.

Los antecedentes dan base para limitar las emisiones de partículas de este tipo a la atmosfera, es por eso que a partir del año 1972 se ha trabajado en normas que garanticen la seguridad de las personas. En 1972 se creó la primera norma que tiene relación con el material particulado en el aire, la TSP, que posteriormente han sido remplazadas por las normas PM10, a partir del año 1997 las normas PM10 se empezaron a complementar con las PM2,5 y a partir del año 2006 recién están siendo remplazadas parcialmente.

En el año 1996 la USEPA dictó la primera normativa regulando la emisión de PM2,5 y a partir de ahí la han seguido algunos estados de Canadá en el año 2000, el estado de

California (E.E.U.U.) en el 2002 y Australia y Ecuador en 2003, posteriormente México actualizo su normativa PM10 a PM2,5 en el año 2005 y Estados Unidos regularizo se sumo a las nuevas disposiciones en el año 2006.

En Chile solo en el año 2011 se estableció la NORMA PRIMARIA DE CALIDAD AMBIENTAL PARA MATERIAL PARTICULADO FINO RESPIRABLE MP 2,5, esta norma entraría en funcionamiento el año 2012 y viene a remplazar a la actual exigencia respecto de PM10.

Tomando en cuenta las crecientes exigencias ambientales respecto de las emisiones se hace necesario controlar las emanaciones causadas por cada elemento de los proyectos, así para una central termoeléctrica es tan necesario controlar sus emisiones derivadas de la combustión, como las emisiones fugitivas producto del manejo y acopio de materiales.

En este sentido la nueva norma no hace referencia a un tipo específico de sitio de almacenamiento de material, se limita a restringir las concentraciones diarias y anuales de PM2,5 y PM10.

2.4 Centrales Termoeléctricas aprobadas durante los últimos años.

En pro de satisfacer las exigencias de crecimiento que presenta la matriz energética nacional, revisado anteriormente, se han desarrollado proyectos de generación eléctrica utilizando diferentes tecnologías, pero como ya se ha destacado el tipo de central que genera interés para este trabajo son las termoeléctricas, específicamente las que funcionan a base de combustión del carbón. En la tabla 2.1 se resumen algunos proyectos de esta naturaleza que se han puesto en funcionamiento recientemente, otros que han sido recientemente aprobados y se encuentran en su etapa de construcción o puesta en marcha y algunos en tramitación para su aprobación.

Tabla 2.1: Centrales Termoeléctricas a carbón aprobadas recientemente en Chile

Nombre	Región	Titular	Inversión (MMU\$)	Estado	Fecha calificación	Generación [MW]
Central Termoeléctrica Pacífico	Primera	Río Seco S.A.	750,0	Aprobado	11-may-2011	350
Central Termoeléctrica Patache	Primera	Compañía de Electricidad	220,0	Aprobado	16-dic-1996	150
Central Termoeléctrica Cochrane	Segunda	NORGENER S.A.	1100,0	Aprobado	10-sep-2009	280x2
CENTRAL TERMOELECTRICA	Segunda	Norgener S.A.	1,0	Aprobado	13-sep-2007	150x4
Central Termoeléctrica Nueva Tocopilla Unidad 2	Segunda	Norgener S.A.	13,5	Aprobado	7-feb-1997	32,4
Central Termoeléctrica Nueva Tocopilla	Segunda	Norgener S.A.	180,0	Aprobado	16-sep-1994	132,4
Central Termoeléctrica Mejillones	Segunda	E-CL S.A.	180,0	Aprobado	26-abr-1995	150
Central Termoeléctrica Punta Alcalde	Tercera	Empresa Nacional de Electricidad S.A.	1400,0	En Calificación		370x2
Central Termoeléctrica Castilla	Tercera	CGX CASTILLA GENERACIÓN	4400,0	Aprobado	7-mar-2011	350x6
Central Termoeléctrica Guacolda y Vertedero	Tercera	Empresa Eléctrica Guacolda S.A.	480,0	Aprobado	24-may-1995	150
Central Termoeléctrica Campiche	Quinta	AES GENER S.A	500,0	Aprobado		270
Central Termoeléctrica Nueva Ventanas	Quinta	AES GENER S.A	317,0	Aprobado	4-sep-2006	250
Central Termoeléctrica Energía Minera	Quinta	Energía Minera S.A.	1700,0	Aprobado	13-mar-2009	1050
CENTRAL TERMOELÉCTRICA LOS	Séptima	AES GENER S.A	1300,0	Aprobado	15-dic-2008	375x2
CENTRAL TERMOELÉCTRICA	Octava	S.W. Business S.A.	82,0	En Calificación		50

Cada una de las centrales presentadas en la tabla 2.1 tiene definida en su infraestructura sitios de acopio de carbón, también llamadas canchas de carbón. Las dimensiones de dichas canchas de acopio son variables y dependen de varios factores que están relacionados con la capacidad de generación de la central, así como con el flujo de combustible que se maneje en cada proyecto. Cada proyecto considera un periodo de autonomía distinto dependiendo de sus requerimientos específicos, disponibilidad de suministro, tipos de carbón, en caso que se utilice más de uno, etc. de modo que es difícil relacionar directamente la capacidad generadora de la central con el tamaño de las canchas de acopio. Sin embargo los datos de las canchas de acopio de carbón así como la capacidad de procesamiento del material que se espera para cada central son de dominio público, de modo que es posible tener un escenario real para el desarrollo de este trabajo.

2.5 Efecto del viento sobre los acopios.

Los acopios de carbón producen emisiones fugitivas de material principalmente debido a la acción directa del viento sobre las pilas. Estas emisiones terminan por afectar de distinta manera el entorno a las centrales y es por esta acción que los acopios deben ser protegidos. La dispersión del viento a los lugares aledaños afecta el paisaje, las partículas de mayor tamaño se depositan en las cercanías de las centrales afectando, por sus características estéticas, el entorno natural. Se produce además deterioros en los ecosistemas cercanos, ya que el suelo se contamina afectando la flora y fauna del lugar. Las partículas que se depositan en mares o ríos cercanos afectan a los ecosistemas de estos, además de la posibilidad de afectar reservas de agua dulce. Las partículas de menor tamaño afectan considerablemente la salud de las personas en un radio mayor que las partículas grandes debido a la suspensión en el aire facilitado por su pequeño tamaño.

De aquí que se exija a los distintos proyectos desarrollar medidas para controlar este arrastre de material debido al viento.

En Chile en los estudios de impacto ambiental que se presentan, la mayoría de las veces se incluye un estudio de mitigación de los efectos del viento sobre las pilas y en caso de que no se incluyan en el estudio original se les hace la observación a los proyectistas de modo que las canchas de acopio no queden nunca expuestas a la acción directa del viento.

La metodología utilizada para calcular los efectos del viento es variada, existen manuales para suponer el arrastre de material que produce el viento basándose en la configuración de las pilas y las velocidades conocidas del viento para distintas alturas y épocas del año, con estos datos se pueden realizar algunas aproximaciones y determinar el material dispersado. Otros proyectos se desarrollan utilizando simulaciones de las condiciones de viento en programas de elementos finitos, donde se obtiene una idea más realista de lo que ocurre en las canchas de carbón.

En Chile se acepta cualquiera de estas formas de cálculo en tanto se cumpla con las normas de emisiones vigentes (PM10 próximamente PM2,5) de modo que en los estudios de impacto ambiental presentados se pueden encontrar estos dos tipos de cálculo indistintamente.

2.6 Medidas utilizadas para controlar la dispersión de polvos contaminantes.

Actualmente se utilizan distintas alternativas para controlar la acción del viento sobre los acopios de materiales que puedan resultar en dispersión de polvos contaminantes. Barreras de protección de viento, barreras naturales para aislar las pilas, silos de almacenamiento de material, hangares, galpones y domos son algunas de las más utilizadas.

2.6.1 Almacenamientos de cielo abierto.

2.6.1.1 Barreras de dispersión de viento.

Este tipo de medida mitigante consiste en barreras perimetrales a los acopios que disminuyen la acción lateral del viento sobre las pilas de material. Estas barreras pueden estar constituidas por mallas tipo raschel u otro material que permita el paso parcial de aire, de esta forma disminuyen la velocidad con la que el viento enfrenta los acopios parcialmente disminuyendo la velocidad de este y así controlando la cantidad de material que es arrastrado fuera de las pilas. Existen actualmente manuales para diseñar estos sistemas de protección contra el viento; en estos se debe considerar la configuración de las pilas, el área expuesta a la acción del viento y las velocidades que éste presenta. Posteriormente se agregan los datos de las barreras protectoras que se utilicen, porcentaje de viento que pasa, velocidad con la que pasa y altura de las barreras y con esto se puede determinar cuanto será la dispersión después de agregar esta protección perimetral.

En Chile este tipo de cierre al viento es de los más utilizados para evitar la dispersión de material contaminante, numerosas centrales termoeléctricas que basan su funcionamiento en carbón las utilizan para proteger sus acopios y otras varias centrales en proyecto o construcción las han adoptado como solución al problema de las emisiones fugitivas de las canchas de carbón u otro granel dispersante.

2.6.1.2 Barreras naturales para aislar las pilas.

Otro tipo de medida que se ha utilizado en Chile para evitar la dispersión de carbón consiste en disminuir la acción del viento sobre los acopios utilizando material natural del entorno que puede haber sido retirado de otras partes del proyecto, por ejemplo material sobrante de las canchas para depósito de ceniza o de la excavación para algún edificio, o material de relleno. Con esto se forman pretiles de protección que disminuyen la acción lateral directa del viento. Recientemente en Chile esta medida fue utilizada por la ya operativa central termoeléctrica Angamos en la localidad de Mejillones.

La utilización de este tipo de protección contra el viento cumple básicamente los mismos propósitos que las barreras de dispersión de viento, las diferencias principales se pueden apreciar en cuanto al paisajismo del entorno ya que mantienen la línea natural del terreno modificado. Además evitan completamente el paso del viento a través de los pretiles, no así las mallas que tienen un eficiencia media de entre 80% y 90%.

2.6.2 Almacenamientos encapsulados.

Dependiendo del tipo de estructura se pueden dividir en tres grandes categorías, estructuras de acero, hormigón y membranas.

2.6.2.1 Estructuras de acero.

2.6.2.1.1 Estructura de marcos rígidos

El desarrollo de nuevas tecnologías en acero ha permitido la evolución del sistema de marcos rígidos, nuevos métodos de análisis y dimensionamiento.

En este tipo de estructuras, los marcos forman parte de esta, ya sea que estén compuestos por uniones tipo viga-columna o por uniones muro-losa. Los marcos presentan facilidad en el diseño por cuanto es fácil entender el modo en que las cargas afectan las distintas partes de la estructura.

Los marcos formados por columnas y vigas unidas, formando uniones rígidas capaces de transmitir los esfuerzos mecánicos a la viga sin que se produzcan desplazamientos lineales ó angulares en sus extremos y las columnas donde se apoyan. Sobre las vigas principales, que además de resistir las cargas verticales ayudan a soportar los esfuerzos horizontales de la estructura, se apoyan en algunos casos vigas secundarias encargadas de soportar el sistema de piso.

La división interna de un marco estructural repetitivo definido por los claros entre columnas se denomina vano.

El sistema de marco rígido transfiere el momento flector de las vigas a las columnas de apoyo, dando como resultado que las columnas compartan la resistencia a la flexión con la viga. Esta interacción entre los entreejes permite que la sollicitación a flexión resultante por una determinada carga se distribuya entre diversos entreejes.

Entre los usos que se cuentan para este tipo de estructuras se tienen, gimnasios, supermercados, hangares, bodegas o cualquier aplicación donde se necesite un espacio interior libre.

Los marcos rígidos pueden ser diseñados con dos aguas y unión centrada, excéntrica o de una sola pendiente. Además la pendiente de techo puede llegar a ser tan baja como 2%.

En el diseño de estructuras de marcos rígidos se puede además combinar con otros sistemas estructurales, como estructuras de hormigón y madera.

Con esta sólida red estructural es posible lograr luces entre apoyos que van desde los 9 a 90 metros o más con alturas de hombros que pueden superar los 25 metros.

Las configuraciones que se pueden adoptar para lograr estas estructuras son variadas. De columna recta, semirecta o de sección variable. Además el enrejado soportante del techo puede variar dependiendo de las luces que se quieran lograr, este puede estar constituido por vigas únicas o sistemas de enrejados.

2.6.2.1.2 Parques circulares.

Los parques circulares conformados de estructuras tipo domos de acero se presentan como una solución importante en estos días por la gran capacidad de almacenamiento que presentan. Dependiendo del sistema de pila que se defina para el almacenamiento, los parques circulares, también llamados domos geodésicos, se pueden construir apoyados sobre un muro de hormigón o directamente sobre el terreno a utilizar.

Las luces libres que se pueden alcanzar con este tipo de estructuras varían dependiendo de la configuración del parque, pero fácilmente superan los 140 metros de diámetro con alturas superiores a 30 metros.

Los sistemas de construcción adoptados para este tipo de estructuras son variados, perfiles de acero tipo columnas soportados por anillos en tracción y compresión, sistemas de anillos concéntricos para descargar las solicitaciones, sistemas de perfiles especiales tipo cilíndricos, etc. asimismo las uniones utilizadas varían dependiendo del sistema adoptado.

2.6.2.1.3 Estructuras tipo hangar parabólico.

Se presentan como solución para configuraciones de pila longitudinales, al igual que lo hacen las estructuras de marcos rígidos, estas pueden desarrollarse con sistemas de domos parabólicos alargados para lograr cumplir con los requerimientos específicos.

En general los sistemas constructivos de este tipo de estructuras no distan mucho de los utilizados en domos metálicos.

Como características principales presentan su buena respuesta en zonas de fuertes vientos por su perfil curvo, asimismo son capaces de distribuir grandes cargas de manera eficiente a lo largo de su estructura permitiendo lograr grandes luces de diseño.

2.6.2.2 Estructuras de hormigón

2.6.2.2.1 Silos.

Las estructuras tipo silo son principalmente cilíndricas de radios relativamente pequeños comparados con su altura. Pueden estar construidos en madera, hormigón o estructura metálica, dependiendo del uso que se les de. Generalmente se diseñan de modo tal de ser cargados, con los graneles, superiormente y descargar por su parte inferior, pero se han construido otros tipos de silos de almacenamiento que funcionan de manera distinta, los que se detallan más adelante.

Originalmente las estructuras tipo silo se diseñaron con el fin de almacenamiento de graneles derivados de la agricultura, granos, pasto o forraje con el fin de producir fermentación anaeróbica en su interior, pero actualmente se utilizan para almacenar prácticamente cualquier tipo de granel, cemento, carbón y distintos minerales de la minería.

Por su posibilidad de construcción en hormigón armado y acero, los volúmenes de almacenamiento que se pueden lograr con este tipo de estructuras son mucho mayores que los que se lograban en la antigüedad, donde se construían principalmente en madera, de modo que se presentan como una alternativa viable para evitar la dispersión de partículas por la acción del viento.

2.6.2.2.2 Estructuras de hormigón armado.

Las estructuras de hormigón armado se presentan como solución constructiva para un sinnúmero de escenarios de tipo habitacionales, carreteras o grandes obras civiles. Tanto el cálculo de este tipo de estructuras como la construcción ha sido estudiado y utilizado ampliamente durante muchos años y hoy en día mediante la implementación de nuevas tecnologías en cemento y acero se pueden lograr estructuras impensadas en tiempos pasados.

La incorporación de aditivos al hormigón, ha permitido, entre otras, darle mayor resistencia ante climas adversos, mayores o menores tiempos de fraguado, mayores resistencias, posibilidad de mayores volúmenes en hormigones masivos, etc. A las anteriores hay que agregar además nuevos métodos constructivos, como son hormigones armados pre y post tensados, que permiten cubrir grandes luces o dar soluciones innovadoras donde el hormigón tradicional no es suficiente.

Así es que se puede aplicar este tipo de estructuras cuando se diseña un depósito o sitio de almacenamiento de graneles. Ya se mencionaron los silos construidos en hormigón armado, pero se pueden conformar otras estructuras donde se utilice este producto. Estructuras tipo domo con armadura tipo doble-malla y hormigón proyectado, estructura de marcos rígidos con columnas de hormigón armado y cerchas metálicas (se podría pensar en una solución completa de hormigón con losa armada o losa colaborante, pero se aleja de las pretensiones de diseño de este trabajo), estructuras con arcos de hormigón pre-tensado y muchas otras dependiendo de los requerimientos que se necesiten en el proyecto.

Se menciona especialmente la configuración de columnas de hormigón con muro perimetral formando marco rígido con cerchas de acero, ya que, como se detalla en capítulos posteriores forma parte de las soluciones a evaluar en este trabajo.

Este tipo de estructura funciona de la misma manera que la estructura de marcos rígidos definida anteriormente, pero para la conformación de las columnas se utiliza hormigón armado. El hormigón tiene una excelente respuesta a las sollicitaciones de compresión y gracias a la armadura de acero incorporada, sus prestaciones a tracción, compresión, corte y flexión son adecuadas para la construcción prácticamente de cualquier estructura.

2.6.2.2.3 Estructuras de hormigón tipo domo.

Las estructuras tipo domo se han utilizado a través del tiempo para resolver diversos problemas constructivos por sus distintas prestaciones, estética, resistencia, grandes luces y volúmenes. Otra característica relevante que ha fomentado la implementación masiva de este tipo de soluciones son los cortos plazos de construcción que durante los últimos años se han alcanzado, gracias al desarrollo de tecnologías como hormigón proyectado en domos inflados.

Para la construcción de estas estructuras se utilizan principalmente los siguientes métodos constructivos: método tradicional de moldaje, método de hormigón proyectado tradicional, método voladizo, método de hormigón proyectado con membrana externa (tipo Turner) y método de hormigón proyectado con membrana interna (tipo Binishell).

a. **Método tradicional de moldaje.**

Este sistema se basa en la elaboración de estructuras de hormigón armado mediante un complejo sistema de moldajes y alzaprimado para lograr la forma de domo característica de estas estructuras. Se trabaja el hormigón de manera tradicional, con la enfierradura correspondiente al diseño para resistir las cargas involucradas.

b. **Método de hormigón proyectado tradicional.**

Este método no requiere sistema de alzaprimado, pero al igual que el anterior si requiere un complejo sistema de moldaje para luego realizar el enmallado y la proyección del hormigón.

c. **Método de hormigón proyectado con membrana exterior (Método Turner)**

No requiere sistemas de alzaprimado ni de moldajes, el procedimiento para desarrollar este sistema consta básicamente de una membrana inflable donde se elabora la enfierradura de la estructura, posteriormente se proyecta el hormigón contra la membrana desde el interior de esta en capas hasta lograr el espesor deseado.

Si bien este método no requiere sofisticados sistemas de moldaje como los métodos anteriormente analizados, si se requieren equipos especiales para el inflado de las membranas, además las membranas utilizadas no son reutilizables y son de compleja elaboración. No obstante, este método es utilizado ampliamente dado los cortos plazos de ejecución que se consiguen al ser implementado por personal capacitado.

En Chile se ha utilizado este método en sistemas de almacenamiento de luces medianamente grandes, pero existe la posibilidad, según fabricantes, de aumentar dichas luces y así presentarse como solución viable en el almacenamiento de grandes cantidades de material.

d. Método de hormigón proyectado con membrana interior (Método Binishell).

Este sistema tiene características similares al anterior, igualmente se trabaja proyectando el hormigón sobre una membrana, pero en este caso la proyección se realiza desde el exterior de la membrana, quedando esta recubierta por el hormigón. Igualmente se requieren sistemas de inflado especiales de modo de soportar el peso del hormigón sobre la membrana y se evita el uso de moldajes y alzaprimado.

Las luces libres obtenidas por este método no alcanzan los 100 metros de diámetro.

Actualmente esta solución se utiliza para estructuras con diversos propósitos, de uso civil e industrial. Entre las prestaciones de este sistema se cuenta el corto periodo de ejecución de los proyectos así como la versatilidad del sistema para lograr diversas configuraciones mediante la superposición de más de un domo.

2.6.2.3 Estructuras de membranas.

Estructuras diseñadas a partir de membranas de alta resistencia capaces de soportar altas cargas. La estructura se desarrolla a partir de elementos que pueden ser de hormigón, acero u otro material y la membrana se tensa mediante cables y sistemas de anclaje de manera de cubrir la luz necesaria.

Las configuraciones que se pueden lograr con este sistema son innumerables, y se utilizan en recintos deportivos, carpas para eventos y cubierta de grandes áreas.

En términos de almacenamientos se han utilizado en remplazo de placas metálicas en estructuras metálicas, pero dado que sus propiedades estructurales trabajan en tensión no es fácil lograr encapsulamientos totales de los materiales sin la utilización de estructuras adicionales.

2.7 Configuración pilas de acopio.

Actualmente son cuatro las principales configuraciones que se adoptan al momento de generar los acopios de carbón.

2.7.1 Pila longitudinal.

Este esquema consiste en acopiar el material en una pila longitudinal de largo de dimensiones variables, la altura de la pila depende del ancho que ésta presente, y de las características de los equipos apiladores y recogedores del material.

No existe un largo característico para este sistema de acopio ya que puede ser tan extenso como se requiera para cada proyecto

Esta configuración se utiliza tanto en almacenamientos a cielo abierto como encapsulados y es uno de los esquemas que se evalúan en este trabajo.

La maquinaria que se utiliza para manejar este tipo de acopios es igualmente variada, Apiladoras de pórtico, semi-pórtico, de carril con giro de 360 grados, etc. Para recoger el material se utilizan bandas transportadoras o cargadores frontales. Esta maquinaria dependerá de las características de la central.

2.7.2 Pilas cónicas.

Consiste de un acopio en una pila única con forma de cono. Se obtiene mediante la descarga del material en un punto desde gran altura.

Es utilizada generalmente en acopios encapsulados más que en acopios abiertos por la gran cantidad de material que se levanta con la caída de altura.

Las formas que se adoptan para encapsular este tipo de acopios son generalmente siguiendo la línea de la pila de modo que formas parabólicas tipo domo se adaptan de manera eficiente a esta configuración.

En general el método que se utiliza para recoger el material de estas pilas consiste en correas transportadoras instaladas en túneles subterráneos bajo el sitio de acopio.

Se utiliza la incorporación de un muro perimetral de hormigón armado capaz de resistir cargas de material en la base de las estructuras de modo de maximizar el volumen de acopio de la estructura.

Esta configuración es poco utilizada en acopios de carbón y no será evaluada en este trabajo.

2.7.3 Pilas de anillo.

Configuración utilizada en grandes parques circulares, carbón, caliza, fertilizantes, sulfuros y otros materiales se acopian generalmente siguiendo este esquema.

Un apilador giratorio en el centro acomoda el material y forma la pila, mientras un puente reclamador apoyado en el centro del anillo recobra el material desde una cara de la pila.

El material recogido se transporta a través de bandas transportadoras construidas bajo el sitio de acopio.

En almacenamientos encapsulados el domo es la configuración predilecta para lograr las luces necesarias para almacenar los grandes volúmenes que esta configuración puede manejar.

Los rendimientos en el acopio y recuperación de material logrados por este sistema se cuentan entre los más eficientes y son ampliamente utilizados en todo el mundo.

Se construyen parques circulares con esta configuración de anillo en estructuras tipo domo que superan ampliamente los 100 metros de diámetro.

Es la configuración que se utiliza en este trabajo para evaluar las estructuras tipo domo.

2.7.4 Pilas de forma libre.

No se considera un esquema determinado para el apilamiento del material, puede estar constituido por más de una de las configuraciones anteriores dependiendo, generalmente, del espacio con que se cuente.

En acopios abiertos donde el apilamiento se realiza por medio de cargadores frontales es común encontrar este tipo de configuración. Asimismo la recuperación del material se realiza por medio de este tipo de maquinarias.

Existen soluciones para encapsular este tipo de acopios, la empresa GEOMETRICA [2] por ejemplo ha desarrollado sistemas para recubrir estas pilas sin patrón definido de modo que el aporte de material al ambiente sea mínimo.

Si bien en Chile se pueden encontrar centrales termoeléctricas operando con este sistema de acopio, no se consideran de interés para este trabajo.

2.8 Materiales.

La gran cantidad de materiales existentes en el mercado y nuevas e innovadoras técnicas constructivas dan una amplia gama de alternativas desde el punto de vista del diseño. (acero, hormigón armado, membranas inflables, estructuras textiles tensadas, hormigón proyectado, etc.)

Luego los materiales a utilizar se evalúan desde dos puntos de vista, experiencia en diseño y construcción y confiabilidad.

Así se llega a que las alternativas a utilizar en el diseño de las estructuras son acero, hormigón armado y hormigón proyectado. Para los primeros dos (acero y hormigón armado) existen manuales de diseño ampliamente aceptados a nivel nacional, además de normas que especifican claramente la confiabilidad relacionada al material. En el caso del hormigón proyectado no hay una norma chilena que defina o especifique las dosificaciones o aplicaciones que permite este producto, pero si se encuentran recomendaciones extranjeras, así como manuales y normas, de modo que su aplicación es igualmente factible. Asimismo la experiencia que existe en el país en cuanto al trabajo en este tipo de materiales es amplia y confiable de modo que se puede emprender un proyecto de las características definidas sin mayores complicaciones.

2.8.1 Acero.

Ventajas del acero.

Alta resistencia: la alta resistencia del acero por unidad de peso, permite estructuras relativamente livianas, lo cual es de gran importancia en la construcción de puentes, edificios altos y estructuras cimentadas en suelos blandos.

Homogeneidad: las propiedades del acero no se alteran con el tiempo, ni varían con la localización en los elementos estructurales.

Elasticidad: el acero es el material que más se acerca a un comportamiento linealmente elástico (Ley de Hooke) hasta alcanzar esfuerzos considerables.

Precisión dimensional: los perfiles laminados y soldados están fabricados bajo estándares que permiten establecer de manera muy precisa las propiedades geométricas de la sección.

Ductilidad: el acero permite soportar grandes deformaciones sin falla, alcanzando altos esfuerzos en tracción, ayudando a que las fallas sean evidentes.

Tenacidad: el acero tiene la capacidad de absorber grandes cantidades de energía en deformación (elástica e inelástica).

Facilidad de unión con otros miembros: el acero en perfiles se puede conectar fácilmente a través de remaches, pernos o soldadura con otros perfiles.

Rapidez de montaje: la velocidad de construcción en acero es muy superior al resto de los materiales.

Disponibilidad de secciones y tamaños: el acero se encuentra disponible en perfiles para optimizar su uso en gran cantidad de tamaños y formas.

Costo de recuperación: las estructuras de acero de desecho, tienen un costo de recuperación en el peor de los casos como chatarra de acero.

Reciclable: es un material 100 % reciclable además de ser degradable por lo que no contamina.

Permite ampliaciones fácilmente: permite modificaciones y/o ampliaciones en proyectos de manera relativamente sencilla.

Se pueden prefabricar estructuras: permite realizar la mayor parte posible de una estructura en taller y la mínima en obra consiguiendo mayor exactitud.

2.8.2 Hormigón Armado.

Ventajas del hormigón armado.

Seguridad contra incendios, ya que el hormigón además de ser un material incombustible es mal conductor del calor y por lo tanto el fuego no afecta peligrosamente la armadura metálica, lo que si sucede en las estructuras puramente metálicas. El calor penetra lentamente al interior de la masa de hormigón.

Su carácter monolítico, ya que todos los elementos que forman la estructura de una obra de hormigón armado, columnas, vigas y losas están sólidamente unidos entre sí, presentando una elevada estabilidad contra vibraciones y movimientos sísmicos, siendo por lo tanto una estructura ideal para regiones azotadas por terremotos.

Facilidad de construcción y fácil transporte del acero para las armaduras. La construcción se ejecuta con rapidez. La preparación de la armadura metálica y su colocación en obra es simple. Los encofrados, de madera ordinaria, son rudimentarios, pero deben ser robustos.

Bajo costo de mantención. En las estructuras puramente metálicas es necesario pintar periódicamente el acero, a fin de evitar su oxidación y desgaste. Mientras que en las estructuras de hormigón armado, el acero, envuelto y protegido por la masa del hormigón, se conserva intacto y en perfectas condiciones.

La dilatación del acero y del hormigón, entre 0º y 100º centígrados es prácticamente igual.

El hormigón armado se presta para ejecutar estructuras de formas más variadas, satisfaciendo cualquier exigencia arquitectónica del proyecto. Por sus reducidas dimensiones, en comparación con la albañilería, representa una considerable economía de espacio.

Agradable aspecto de solidez y limpieza que presenta, en conjunto, la estructura de columnas, vigas y losas, una vez retirado el encofrado.

En las fundaciones para máquinas es preferible un monolito de hormigón, por ser más insensible a los choques y vibraciones, que la albañilería de ladrillos con sus numerosas juntas.

2.8.3 Hormigón proyectado.

Ventajas hormigón proyectado.

El hormigón proyectado tiene muchas ventajas, entre las cuales tenemos:

Mayores rendimientos de la puesta en obra al eliminar los encofrados y moldes.

Permite realizar proyectos que por métodos convencionales de hormigonado, serían difíciles de ejecutar.

Perfecto para la reparación y rehabilitación por recubrimiento de estructuras de hormigón deteriorado, sin necesidad de demolición total o parcial.

Bajo índice de rebote.

Excelente defensa contra el fuego, al igual que el hormigón tradicional es excelente ante la acción del fuego y retarda la acción de este sobre las barras de refuerzo.

Los materiales usados en el proceso del hormigón proyectado son generalmente iguales a los usados para el hormigón normal: cemento convencional, cemento Portland, árido

entre 4 y 12 mm, el agua, y aditivos. En las obras que se utiliza el hormigón proyectado se utilizan los mismos tipos de armadura o refuerzo especificados para el hormigón convencional, incluyendo barras de refuerzo, malla electro soldada, y acero pretensado.

De esta forma el hormigón proyectado se presenta como solución igualmente válida para la elaboración de estructuras que el hormigón convencional, guardando las precauciones necesarias relativas a la aplicación de este método.

Actualmente existen dos métodos de aplicación para el hormigón proyectado: el proceso por vía seca y el de vía húmeda. Las primeras aplicaciones del hormigón proyectado se realizaron mediante la vía seca si bien hoy en día su empleo es muy limitado. En la proyección por vía seca, la mezcla de cemento y áridos se transporta por mangueras mediante la utilización de aire comprimido hasta la boquilla de proyección donde se incluye el agua necesaria para la hidratación del cemento. En la fabricación de la mezcla seca se utiliza usualmente una cantidad de conglomerante de entre 350 y 450 Kg por cada 1000 litros de áridos (en densidad aparente). Si bien, la relación agua/cementante tiene una influencia fundamental en la calidad de hormigón proyectado por vía seca, no existe un valor definido debido a que el operario de la boquilla es quien controla y regula la cantidad de agua que se incluye en la mezcla. No obstante, en la práctica el factor Agua/Cementante es bastante constante debido a que el alcance de la variación es limitado: si se agrega poco agua se crea un exceso de polvo; si se agrega demasiada, la mezcla no se adherirá a la superficie.

Un aspecto importante a tener en cuenta en la elaboración de mezclas secas es el contenido de humedad natural de los áridos. Si la mezcla está demasiado seca, la proyección produce una cantidad de polvo excesiva; si la humedad es demasiado elevada, el rendimiento disminuye, se producen atranques de las máquinas y mangueras y existe el riesgo de fraguado del hormigón en el interior del silo o la cuba. A pesar de los continuos desarrollos en la maquinaria y la especialización de los operarios, factores como la elevada generación de polvo, el alto porcentaje de rechazo y los bajos rendimientos de proyección hacen de la vía seca un método con demasiadas desventajas, sólo aplicable para casos excepcionales o volúmenes de hormigón poco importantes. La proyección por vía húmeda, el método más utilizado actualmente, se realiza con equipos especiales (robot de proyección) que bombean el hormigón preparado en planta con el agua y aditivos necesarios y que posteriormente es proyectado mediante la aplicación de aire comprimido en la boquilla.

La proyección de hormigón por vía húmeda presenta innumerables ventajas:

Economía: La importante inversión que supone la adquisición de un equipo de proyección por vía húmeda queda contrarrestada con la caída significativa del costo de colocación del hormigón proyectado y del tiempo de preparación por cada ciclo. A esto hay que sumar el rendimiento que estos equipos son capaces de obtener (en algún caso superior a 30 m por hora) y el ajustado porcentaje del rebote de proyección (por debajo del 10%)

Calidad: Con el empleo de aditivos reductores de agua de última generación y microsílíce o nanosílíce, se puede obtener hormigones proyectados de muy altas resistencias a compresión, incluso superiores a 80 MPa. La proyección por vía húmeda permite conseguir una gunita de características muy homogéneas a lo largo de toda la obra

3 Determinación de escenario a analizar.

Con el fin de que el escenario a analizar sea lo más realista posible y adaptable a las necesidades actuales de la industria generadora en Chile se analizan una variada gama de proyectos existentes, recientemente aprobados y en evaluación. Para no realizar una evaluación para cada uno de estos proyectos se trabaja con uno que sea representativo de la situación de las termoeléctricas.

El método utilizado para determinar cual de los proyectos se toma como modelo en este trabajo consta de tres etapas. En primer lugar se determinó a partir de la cartera de proyectos que se maneja, la potencia instalada de cada central. Este dato tiene mayor relevancia al evaluar el tamaño de la central que otros, como puede ser el área total que utiliza la central emplazada, por cuanto habla de los requerimientos de combustible que tendrán que ser abastecidos a base de carbón.

Una vez establecido el orden de generación de cada central se probaron tres métodos para establecer la central con la generación más representativa (entre las centrales con datos disponibles).

El primer método se basa en tomar el promedio simple entre los datos de generación presentados en cada proyecto, de esta forma la potencia aproximada promedio es de 489 MW.

El segundo toma el promedio de las centrales aprobadas en los últimos diez años más aquellas que se encuentran en proceso de evaluación, la generación media aumenta a 716 MW, esta forma de evaluar la generación podría ser más representativa de las necesidades actuales del país, ya que se consideran proyectos cercanos a la fecha de este trabajo.

El tercero supone tomar el promedio simple de todas las centrales aprobadas menos las dos que generan menor electricidad ya que su generación es muy inferior a las de las demás centrales (32 y 50 MW), con esta ponderación se obtiene una generación promedio de 558 MW.

Considerando cualquiera de estas formas simples de calcular una generación promedio el resultado es similar, de modo que un tercer paso para determinar la termoeléctrica modelo se hace necesario. Observando las termoeléctricas de la tabla 3.1 con su respectiva capacidad de generadora, se distinguen tres que se aproximan a los valores esperados, Central termoeléctrica Angamos (segunda región), Central termoeléctrica Cochrane (segunda región) y Central termoeléctrica Los Robles (séptima región). La tercera se descarta porque la mayoría de los proyectos se encuentran en la zona norte de modo que es más representativo situar el escenario en estas localidades.

Tabla 3.1: Centrales Termoeléctricas y capacidad instalada.

Nombre	Generacion [MW]
Central Termoeléctrica Pacífico	350
Central Termoeléctrica Patache	150
Central Termoeléctrica Cochrane	280x2
Central Termoeléctrica Angamos	150x4
Central Termoeléctrica Nueva Tocopilla Unidad 2	32,4
Central Termoeléctrica Nueva Tocopilla	132,4
Central Termoeléctrica Mejillones	150
Central Termoeléctrica Punta Alcalde	370x2
Central Termoeléctrica Castilla	350x6
Central Termoeléctrica Guacolda y Vertedero	150
Central Termoeléctrica Campiche	270
Central Termoeléctrica Nueva Ventanas	250
Central Termoeléctrica Energía Minera	1050
Central Termoeléctrica Los Robles	375x2
Central Termoeléctrica Pirquenes	50

Finalmente la elección de escenario se reduce a dos posibles termoeléctricas prefiriéndose la de mayor potencia instalada, 600 MW frente a 560 MW, aunque por ubicación potencia generada y clima podría trabajarse indistintamente con cualquiera de ellas.

3.1 Características del escenario a trabajar.

Una vez que se ha decidido que se tomará como escenario de trabajo la central termoeléctrica Angamos se deben ver las características que ésta presenta.

3.1.1 Antecedentes Relevantes.

La central termoeléctrica Angamos cuenta con cuatro unidades generadoras, cada una con una potencia de generación de 150 MW. Se espera, según antecedentes del proyecto, que cada unidad trabaje e inyecte energía al sistema interconectado norte 24 horas al día, siete días a la semana. Con el fin de cumplir estas expectativas se diseñan las canchas de acopio de material de manera de mantener combustible de reserva en ellas y no detener la generación por contratiempos ajenos al funcionamiento propio de la central, como sería la escasez de combustible por problemas por ejemplo de clima.

Se estima que la central termoeléctrica Angamos tiene un consumo diario de 1936 toneladas diarias (dato de proyecto), pero por las razones señaladas anteriormente las canchas de acopio están diseñadas para contener un máximo de 180000 toneladas en cada una de sus dos pilas de almacenamiento, para dar un total de 360000 toneladas.

3.1.2 Escenario propuesto.

Dados los datos presentados anteriormente se puede tener una idea del tamaño de almacenamiento a diseñar en este trabajo.

Primero, si se considera el máximo acopio posible en el diseño de las estructuras, estas posiblemente estén sobredimensionadas para los consumos y almacenamientos reales de la central, lo que significaría incurrir en gastos innecesarios, esto debido a que con el consumo conocido de la termoeléctrica Angamos de 1936 toneladas/día, un acopio de carbón de 360000 toneladas significa una autonomía de 186 días.

De esta forma se considera un periodo de autonomía de 30 días, pero lo cual se requeriría un acopio de aproximadamente 58000 toneladas. Si bien este periodo de autonomía es considerable hay otros factores que se deben considerar para determinar el tamaño de los acopios de carbón de una central termoeléctrica:

- Valor de combustibles, dado lo variable del precio de los combustibles existen periodos donde será más conveniente realizar compras de este insumo que en otros periodos donde el precio se encuentre más alto, para esto es necesario tener la capacidad de almacenamiento suficiente para realizar estas operaciones estratégicas oportunamente.
- Disponibilidad de materia prima, si eventualmente no se pudiera conseguir carbón durante un periodo de tiempo por razones externas a la central termoeléctrica, se debe mantener un stock lo suficientemente grande para asegurar el funcionamiento normal de la central más allá de condiciones normales de abastecimiento.
- Distintos tipos de carbón acopiados, las centrales termoeléctricas tienen actualmente la capacidad de operar con distintos tipos de carbón, variando su poder calorífico, grado u otra característica, en vista de esto debe existir en los acopios la posibilidad de almacenar estos distintos materiales por separado así no se puede diseñar solo para la autonomía calculada originalmente deseada si no además se debe considerar este factor.

En vista de los puntos anteriores se decide considerar una capacidad de acopio de diseño tres veces superior a la requerida para mantener una autonomía de 30 días, llegando a un acopio base de 120000 toneladas.

Actualmente, las pilas de acopio en la central modelo están configuradas de modo de trabajar con solo una máquina apiladora entre ambas pilas con capacidad de rotación en 360 grados de modo de poder alimentar ambas pilas de carbón, las que tienen una altura máxima, según proyecto, de 10 metros.

La configuración pila-apiladora podría modificarse en favor de optimizar el volumen de las estructuras, modificar el tipo de apiladora, configuración de la pila o sistema de recogedora tienen influencia directa en la capacidad de acopio. Este punto se analiza más en detalle en capítulos posteriores

4 Estructuración, diseño y modelación de las estructuras.

Como se determinó en el capítulo anterior, el diseño de las estructuras a evaluar se realiza basándose en las características de la central termoeléctrica Angamos. Sin perjuicio de esto las estructuras son aplicables o modificables de modo de satisfacer los requerimientos de otras situaciones en las que se requiera almacenamiento de graneles sucios.

Las pilas de carbón detalladas en el proyecto presentado por la central termoeléctrica Angamos presentan una altura que varía entre 8 y 10 metros. Considerando el ángulo de roce para el carbón bituminoso (aproximado a 38°) se determina que el ancho mínimo de la pila debe ser aproximado a 30 metros. Sin embargo como se ha mencionado no es esta la configuración que se adoptará en el desarrollo de los modelos, si no más bien una pila longitudinal única con la capacidad de almacenamiento ya determinada. Con esta configuración se determina que la luz libre mínima entre apoyos (ancho) debe ser de aproximadamente 65 metros. Se considera además una franja libre a cada lado de la pila de manera que el material no esté en contacto con las estructuras y permita el tránsito del personal, de modo que la luz libre a considerar en el diseño es de 72 metros.

En el caso de la estructura tipo domo esta configuración no es adoptable, además se deben considerar otros factores que se detallan en este capítulo referentes al diseño de esta estructura.

Como se ha visto en el desarrollo de este trabajo a las tres estructuras que originalmente se evaluaron se ha sumado una cuarta consistente en un domo a base de estructura metálica para solucionar el problema de dispersión de graneles sucios por acción del viento. Para evitar en un 100% la acción del viento sobre los acopios se opta por almacenamientos encapsulados.

4.1 Estructura de marcos rígidos.

4.1.1 Requerimientos generales.

La estructura se diseña de modo que su capacidad de almacenamiento sea superior a 120000 toneladas, para esto se analizan dos posibles configuraciones de pila.

4.1.1.1 Dos pilas longitudinales con apilador entre las pilas con radio de giro en 360 grados.

Utilizando esta configuración es posible la reutilización de los equipos con los que actualmente se cuenta en la central termoeléctrica Angamos, pero no es la configuración que permite mayores volúmenes de almacenamiento por unidad de área.

Utilizando este esquema la estructura que se debe diseñar presenta las siguientes características.

Largo: 400 metros

Alto: 25 metros

Ancho 72 metros.

4.1.1.2 Una pila longitudinal con apilador de pórtico.

Esta configuración si bien significa inversiones en nuevos equipos apiladores, permite almacenar mayores cantidades de material por unidad de superficie logrando disminuir los tamaños de las estructuras de encapsulamiento.

Con esta configuración las dimensiones de la estructura a diseñar son las siguientes.

Largo 200 metros.

Alto: 20 metros.

Ancho: 72 metros.

Dado que el costo de remplazar los equipos de apilamiento no es superior al de duplicar el área de la estructura de almacenamiento se decide por utilizar para el diseño la configuración número dos, compuesta por una pila longitudinal y equipo apilador tipo pórtico.

4.1.2 Definición de la estructura.

Se diseña la estructura en base a marcos rígidos de acero, constituidos como se muestra en las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4. La distancia entre marcos se considera igual a 7 metros desde el eje de cada perfil.

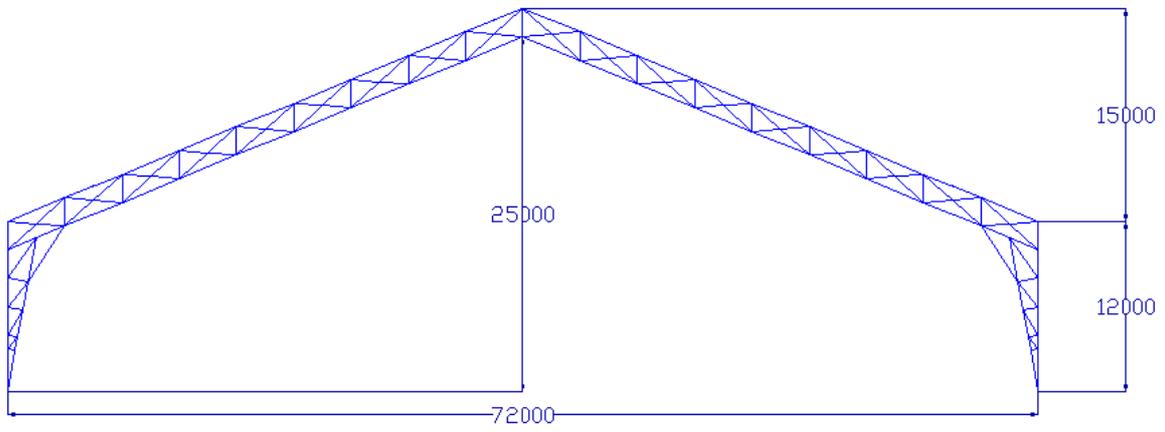


Figura 4.1: Vista frontal estructura marcos rígidos.

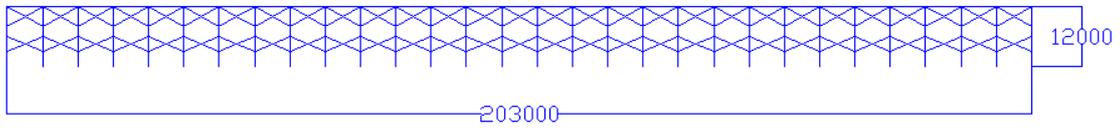


Figura 4.2: Vista lateral estructura marcos rígidos.

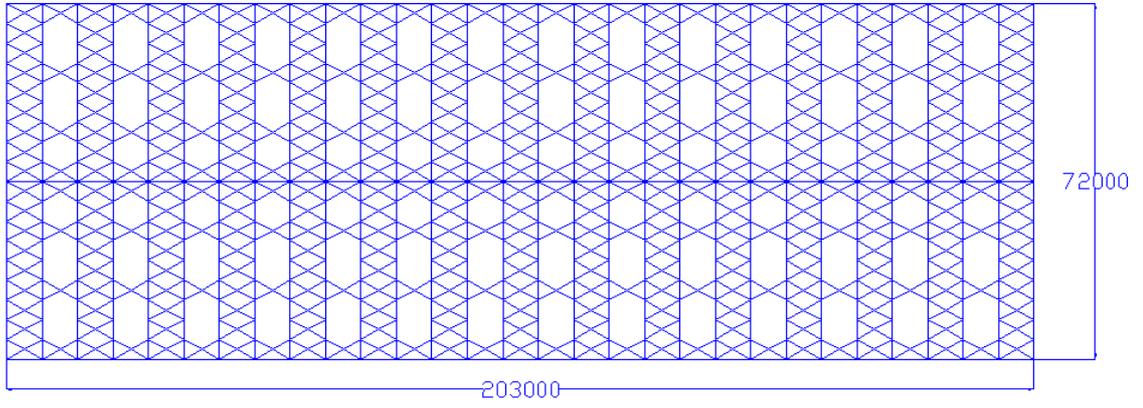


Figura 4.3: Vista superior estructura marcos rígidos.

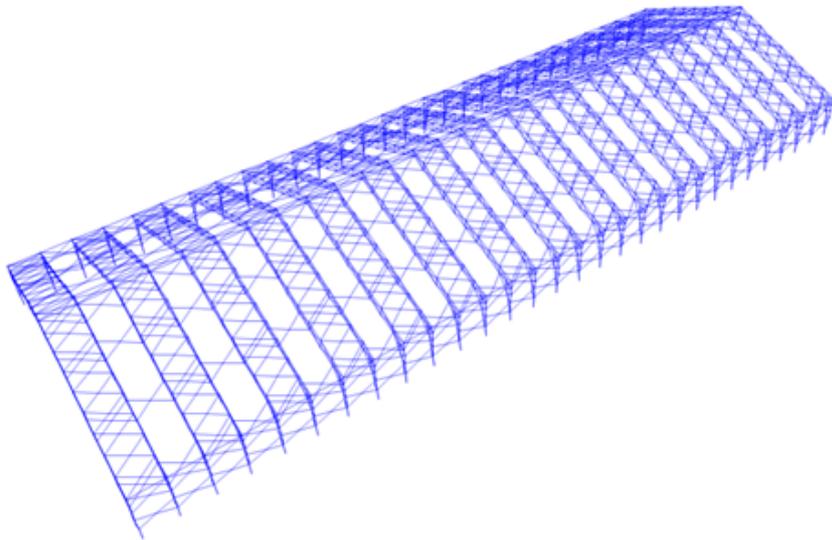


Figura 4.4: Vista isométrica estructura marcos rígidos.

La estructura se compone por los elementos de la tabla 4.1 según las figuras 4.5, 4.6 y 4.7.

Tabla 4.1: Elementos estructura marcos rígidos.

Elemento	Tipo Perfil	Numero de elementos	Largo total	Peso
			m	Tonf
ARRIOSTRAMIENTO LATERAL	Canal	464	1.819	38
COLUMNA 1	IN	750	1.561	249
COLUMNA 2	IN	60	282	46
DIAGONAL 1	Canal	1080	2.167	82
DIAGONAL 2	Canal	1560	3.695	125
MONTANTES	Angulo	420	840	5
PUNTAL ARRIOSTRAMIENTO EXTRA	Canal	232	955	20
PUNTAL ARRIOSTRAMIENTO INFERIOR	Angulo	696	2.865	88
PUNTAL ARRIOSTRAMIENTO SUPERIOR	Angulo	1080	4.446	82
VIGA INFERIOR CERCHA	IN	600	2.340	159
VIGA SUPERIOR CERCHA	IN	540	2.340	194
VIGA SUPERIOR	IN	58	406	12

En la tabla 4.2 se definen las propiedades geométricas de los perfiles utilizados.

Tabla 4.2: Propiedades geométricas elementos estructura marcos rígidos.

Elemento	Perfil	H	B	e	t
		mm	mm	mm	mm
ARRIOSTRAMIENTO LATERAL	C20x20,3	200	75	8	8
COLUMNA 1	IN50x128	500	350	18	8
COLUMNA 2	IN50x129	500	350	18	8
COSTANERA	C30X19	300	100	8	8
DIAGONAL 1	C30x36,7	300	100	10	10
DIAGONAL 2	C25x32,7	250	100	10	10
MONTANTES	L6,5x5,91	65	65	6	6
PUNTAL ARRIOSTRAMIENTO EXTRA	C20x20,3	200	75	8	8
PUNTAL ARRIOSTRAMIENTO INFERIOR	L6,5x8,3	65	65	8	8
PUNTAL ARRIOSTRAMIENTO SUPERIOR	L6,5x8,4	65	65	8	8
VIGA CERCHA INFERIOR	IN60x60,1	300	250	14	6
VIGA CERCHA SUPERIOR	IN30x83,1	300	250	18	6
VIGA SUPERIOR	IN25x24,7	250	100	10	5

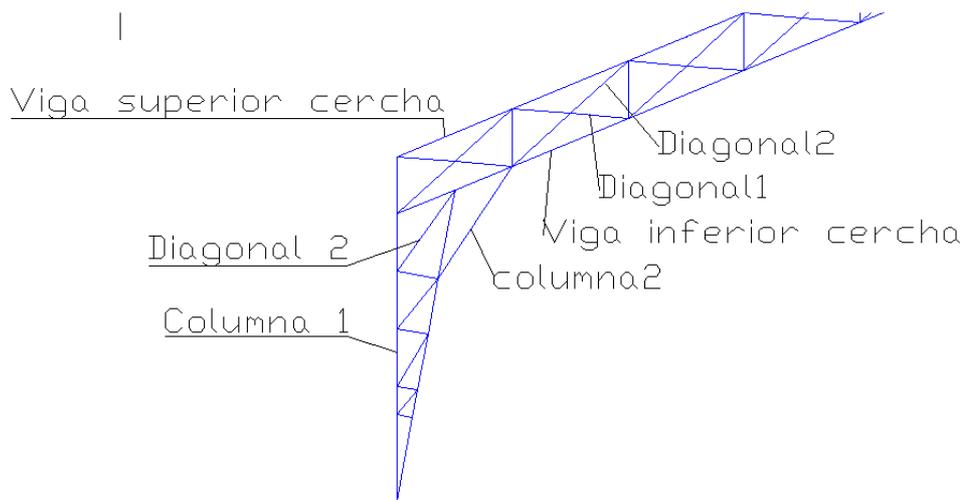


Figura 4.5: Detalle vista frontal elementos estructura marcos rígidos.

En la figura 4.5, 4.6 y 4.7 se muestra la estructura elemental de la nave compuesto por columnas y vigas de modo de formar el marco rígido que será repetido a lo largo de la estructura longitudinalmente.

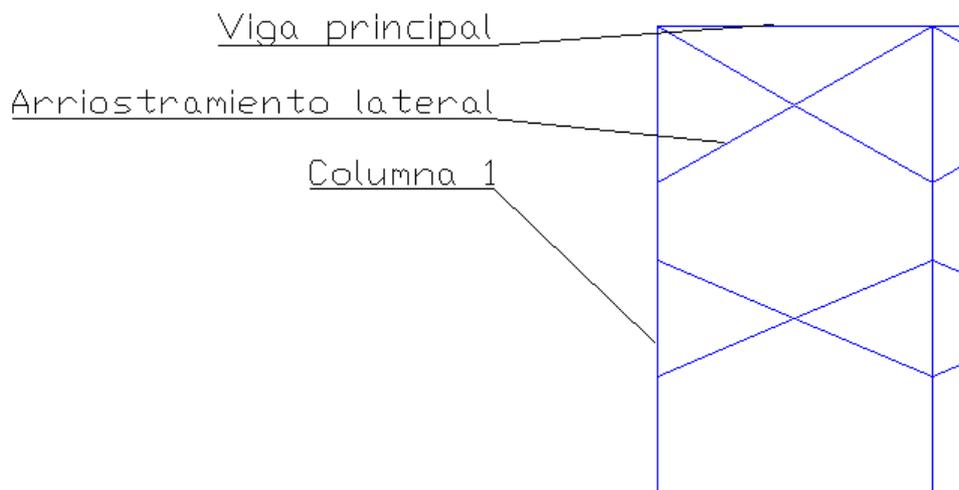


Figura 4.6: Detalle vista lateral elementos estructura marcos rígidos.

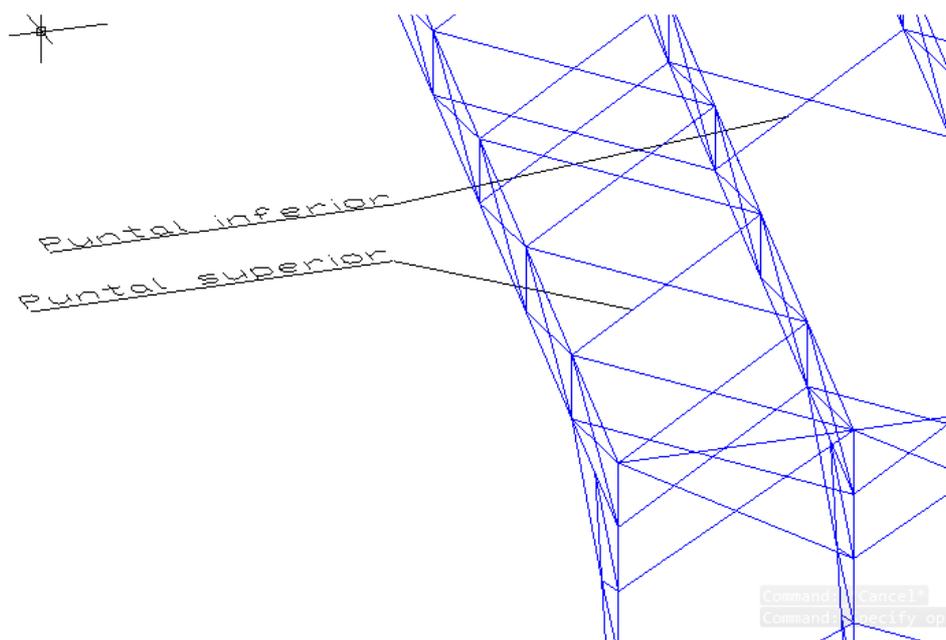


Figura 4.7: Detalle vista superior elementos estructura marcos rígidos.

La estructura está diseñada de forma que tanto las diagonales como los puntales de arriostramiento trabajen solo con cargas axiales, de manera que los esfuerzos de momento sean transmitidos a los apoyos por las vigas y columnas.

Debido a que este trabajo se centra en el pre diseño de las estructuras de modo de obtener un presupuesto aproximado, no se considera el diseño de conexiones entre perfiles. Producto de esto tampoco se realiza el cálculo de los elementos a tracción. De la misma manera tampoco se diseñan las fundaciones requeridas para cada estructura, asumiendo que el monto destinado para cada caso será similar.

4.1.3 Definición de los modelos estructurales computacionales.

La estructura fue modelada en el software SAP2000 de modo de poder obtener los esfuerzos por elementos así como el comportamiento modal de la estructura.

Para la definición de la estructura se modeló inicialmente una estructura básica de marcos rígidos y mediante un proceso iterativo se obtuvo la configuración final de la nave.

Las conexiones entre perfiles se modelan como empotramientos o rótulas dependiendo del elemento en cuestión de modo de no traspasar momentos a los elementos de arrioste o diagonales.

Se realiza un arriostramiento de techo y lateral continuo como lo establece la norma NCh2369 Of.2003; además, se modela un arriostramiento de techo en el sentido de la pendiente del techo.

Los apoyos se diseñan de forma de restringir movimiento lateral, vertical y volcante en el eje débil de la estructura.

Las columnas se modelan unidas por diagonales con conexiones rotuladas.

La unión entre la columna y la cercha se modela empotrada en el perfil más externo de la columna compuesta y rotulado en el extremo interior.

No se consideran las costaneras en el modelo ya que se considera que están no aportan rigidez a la estructura, las cargas muertas por este ítem son incluidas en las solicitaciones de la estructura. De la misma forma no se consideran las costaneras para el calculo de la longitud de volcamiento de los elementos.

4.2 Estructura mixta hormigón armado-acero.

4.2.1 Requerimientos generales.

La estructura propuesta está pensada para acopios de tipo longitudinal, al igual que el caso de la estructura de marcos rígidos. En este caso se agrega a la estructura un muro perimetral de hormigón armado, las columnas se consideran en hormigón empotradas a los apoyos.

Al igual que para el caso de la estructura de marcos rígidos, la configuración de la pila determina los requerimientos básicos de la estructura, en este caso se dispondrá de la misma configuración anterior, que como ya se analizó prueba ser la más conveniente. De esta forma los requerimientos mínimos para esta estructura, en términos de dimensionamiento son:

Largo: 200 metros

Ancho: 72 metros

Alto: 20 metros.

4.2.2 Definición de la estructura.

Se considera una estructura de cerchas armadas en base a vigas, montantes y diagonales para soportar el peso del techo y las cargas correspondientes a este, dichas cerchas traspasan las cargas a los apoyos a través de columnas dispuestas a lo largo de un muro perimetral de baja altura.

La estructuración de la nave se observa en las figuras 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11.

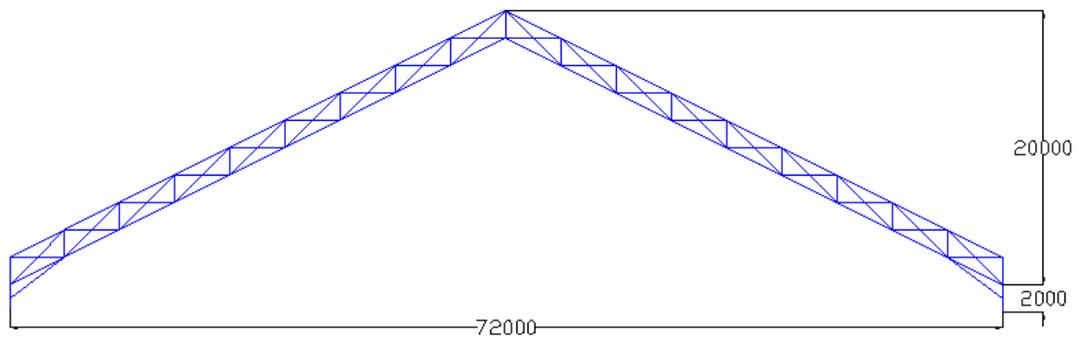


Figura 4.8: vista frontal estructura mixta.

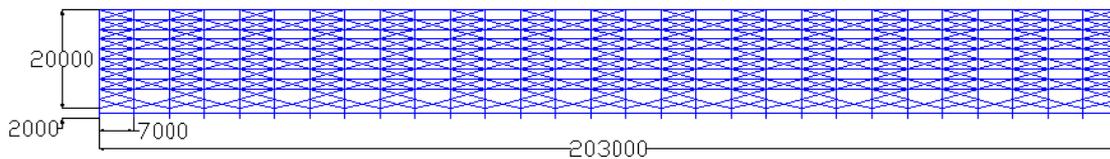


Figura 4.9: Vista lateral estructura mixta.

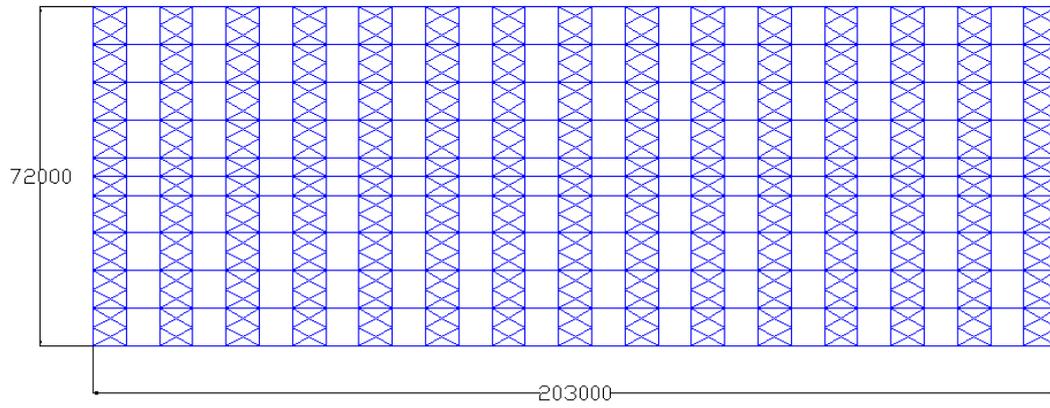


Figura 4.10: vista superior estructura mixta.

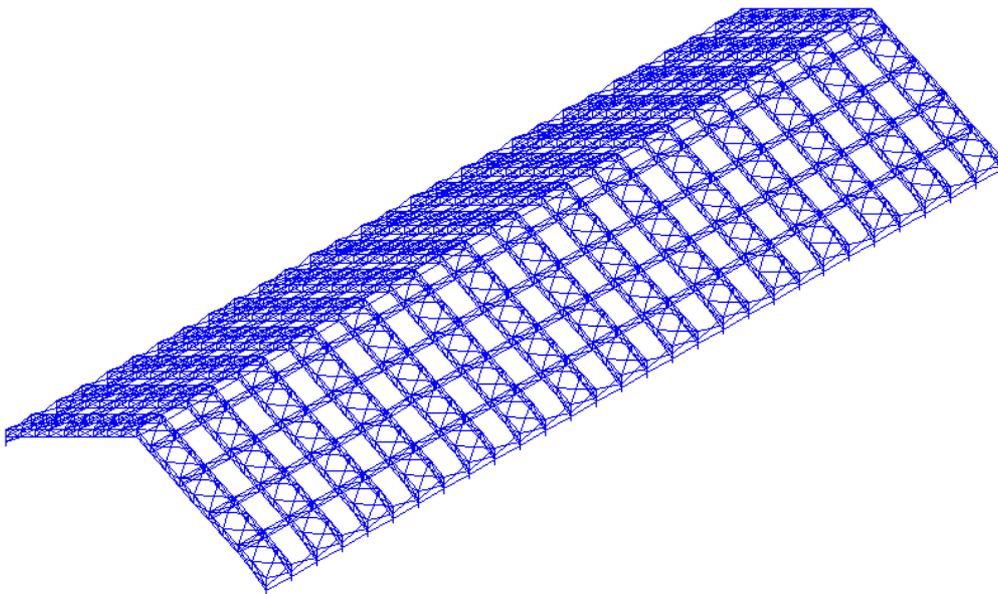


Figura 4.11: Vista isométrica estructura mixta.

La estructura se compone por los elementos detallados en la tabla 4.3 según las figuras 4.12 y 4.13.

Tabla 4.3: Elementos estructura mixta.

Elemento	Tipo Perfil	Numero de elementos	Largo total	Peso
			m	Tonf
ARRIOSTRAMIENTO	CANAL	928	3.378	81
ARRIOSTRAMIENTO LATERAL	CANAL	232	844	32
ARRIOSTRE CORDON SUPERIOR	CANAL	1.080	4.486	76
COLUMNA CERCHA	IN	60	300	10
COLUMNA DESCARGA	IN	60	120	21
COLUMNA H30	HORMIGON	120	120	81
DIAGONAL	CANAL	2.160	5.215	89
MONTANTE	CANAL	510	1.020	21
MURO	HORMIGON	58	406	438
PUNTAL VOLCAMIENTO	ANGULO	464	3.248	31
VIGA INFERIOR CERCHA	IN	540	2.415	177
VIGA SUPERIOR CERCHA	IN	540	2.415	211
VIGA SUPERIOR	IN	58	406	14

Las propiedades geométricas de los perfiles se detallan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Propiedades geométricas elementos estructura mixta.

Elemento	Tipo Perfil	H	B	e	t
		mm	mm	mm	mm
ARRIOSTRAMIENTO	C20X20,3	200	75	8	8
ARRIOSTRAMIENTO LATERAL	C30X36,7	300	100	10	10
ARRIOSTRE CORDON SUPERIOR	C20X13,2	200	50	6	6
COLUMNA CERCHA	HN40X160	400	400	20	12
COLUMNA DESCARGA	IN30X36,7	300	150	8	6
COLUMNA H30	H30	30	30		
DIAGONAL	C30X29,7	300	100	8	8
MONTANTE	C30X20,3	300	75	6	6
MURO	H30	2.000		200	
PUNTAL VOLCAMIENTO	L6,5X9,9	65	65	10	10
VIGA INFERIOR CERCHA	IN30X60,1	300	250	14	6
VIGA SUPERIOR CERCHA	IN30X60,1	300	250	14	6
VIGA SUPERIOR	IN30X36,7	300	150	8	6

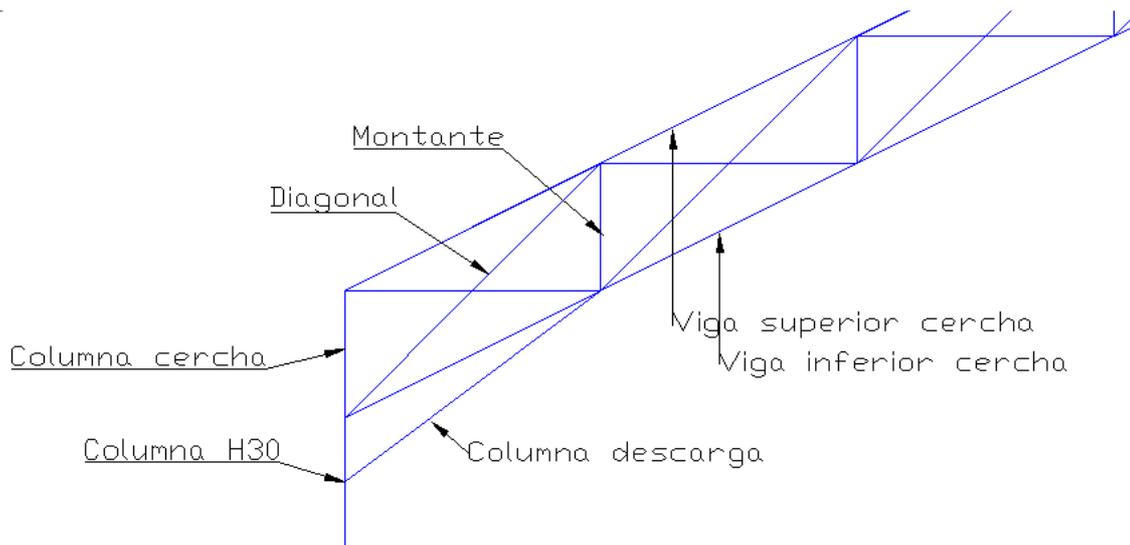


Figura 4.12: Elementos estructura mixta.

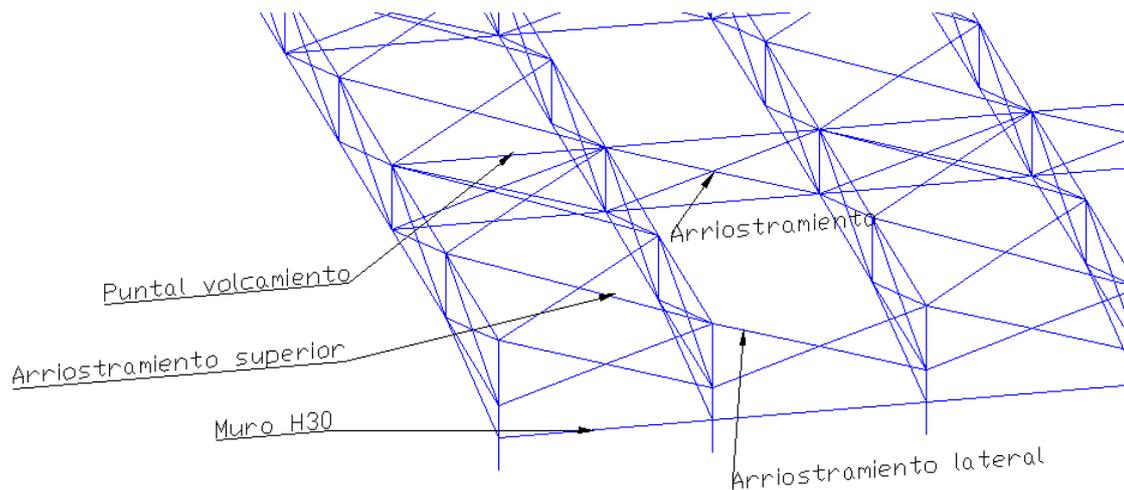


Figura 4.13: Elementos estructura mixta.

Al igual que la estructura de marcos rígidos, la estructura está pensada de modo tal que las diagonales y puntales de arriostamiento no transmitan momentos.

4.2.3 Definición de los modelos estructurales computacionales.

Al igual que en la estructura de marcos rígidos, la estructura se modela en el programa SAP2000.

Análogamente a la estructura anteriormente analizada, ésta se modela de modo que las uniones de las diagonales, montantes y puntales de arriostramiento solo trabajen con cargas axiales.

Se modela un muro perimetral de hormigón entre las columnas de hormigón a lo largo de la estructura.

Las columnas de hormigón se consideran empotradas en los apoyos.

Se considera que las costaneras no aportan rigidez a la estructura de modo que las cargas proporcionadas por estas se agregan a la estructura adicionalmente.

Al igual que en la estructura anterior no se diseñan las conexiones de los perfiles ni se calcula esfuerzos de los elementos en tracción.

4.3 Domo monolítico de hormigón proyectado.

4.3.1 Requerimientos generales.

Los requerimientos, en términos de dimensionamiento del domo dependen en primer lugar del sistema de pila que se utilice para almacenar el material. Estas configuraciones pueden ser las ya mencionadas pilas cónicas o pilas de anillo.

4.3.1.1 Pila cónica.

Utilizar una configuración de pila cónica permite mayores volúmenes de almacenamiento por unidad de área, ya que la mayor parte de la superficie es utilizada en el almacenamiento del material, de esta forma los requerimientos para una estructura tipo domo para lograr el almacenamiento de las 120000 toneladas estipuladas son:

Diámetro: 85 metro

Altura: 45 metros

Esta configuración dificulta el acopio de más de un tipo de material.

La estructura se somete a cargas de operación considerables producto de que el material se apila desde la parte superior de la estructura utilizándola como soporte.

4.3.1.2 Pila de anillo.

Si bien esta configuración no optimiza el área utilizable del domo para el almacenamiento se utiliza frecuentemente en los acopios de carbón por cuanto evita solicitaciones de operación sobre las estructuras, además permite almacenar de manera separada distintos tipos de carbón en el caso de que la central trabaje con más de un tipo de material.

La configuración mínima para el almacenamiento requerido se presenta como:

Diámetro: 100 metros

Altura: 30 metros.

Esta configuración considera que la base de la estructura está diseñada para resistir cargas producto del empuje del material almacenado de modo de poder maximizar el volumen del mismo.

Por los motivos expuestos se opta por beneficiar la posibilidad de almacenar distintos tipos de materiales por sobre la eficiencia de la pila de almacenamiento y se define como pila de diseño la tipo anillo.

Otro beneficio que presenta la pila tipo anillo es la posibilidad de monitorear con mayor facilidad las temperaturas del material almacenado, punto que resulta importante para materiales combustibles como es el caso del carbón.

4.3.2 Estructura a considerar.

Para el caso del domo de hormigón proyectado, en la etapa de pre diseño de la estructura se determinó que el método escogido para realizar la evaluación no cumple con los requerimientos técnicos para el diseño propuesto.

El método que se evaluaría es el domo de hormigón proyectado con membrana interna tipo Binishell.

Este método constructivo se descarta del trabajo por las siguientes razones:

- No es posible alcanzar las luces de diseño, según fabricante.
- Los espesores de cascara de este tipo de estructuras varían entre 5 y 10 centímetros, de modo que no pueden soportar la acción de las cargas debido al

empuje del material almacenado en el interior (requerimiento de pila tipo anillo con la configuración de pila a desarrollar)

No obstante se realiza la comparación con otro tipo de domo que si logra los requerimientos expuestos, domos tipo Turner, la evaluación de este tipo de estructuras se obtiene a partir del trabajo de titulo de E. Solar (2007) [3]

4.4 Domo estructura metálica.

4.4.1 Requerimientos generales.

Los requerimientos para esta estructura son los especificados en el punto 4.3.1 para la estructura tipo domo de hormigón proyectado, ya que en este caso también se trata de una estructura tipo domo.

Diámetro: 100 metros

Altura: 30 metros.

Con estas dimensiones mínimas se diseña la estructura tipo domo metálico.

4.4.2 Definición de la estructura.

La estructura se define a partir de una figura parabólica de modo de adquirir la forma característica de los domos. Se considera para el diseño perfiles tipo columnas principales para transmitir las cargas a los apoyos y perfiles de arriostamiento lateral, así como un anillo superior en compresión y un anillo medio en tracción.

En la figura 4.14 se presenta la estructura definida.

Altura: 32 metros.

Diámetro: 100 metros.

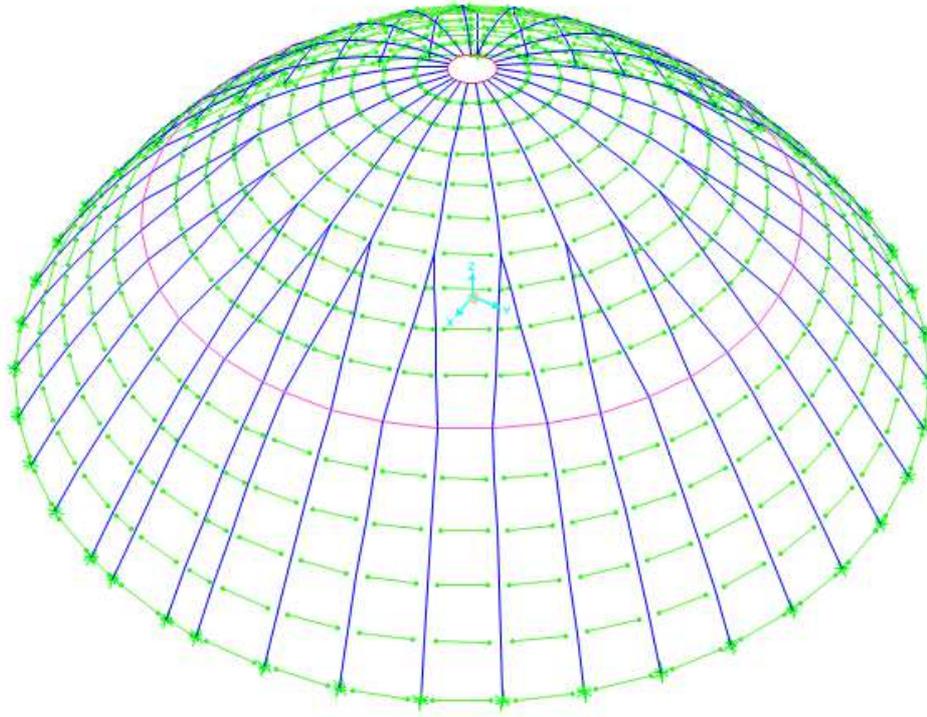


Figura 4.14: Vista isométrica estructura domo de acero.

La estructura se compone por los perfiles detallados en la tabla 4.5

Tabla 4.5: Elementos estructura domo de acero.

Elemento	Tipo perfil	Numero elementos	Largo total	Peso total
			m	Tonf
ARRIOSTRAMIENTO	CANAL	506	2.394	90
COLUMNA	IN	553	2.234	350
ANILLO EN COMPRESIÓN	HN	23	16	2
ANILLO EN TRACCIÓN	HN	46	215	38

Las propiedades geométricas de la estructura se definen en la tabla 4.6

Tabla 4.6: Propiedades geométricas estructura domo de acero.

Elemento	Tipo perfil	H	B	e	t
		mm	mm	mm	mm
ARRIOSTRAMIENTO	C30X36,7	300	100	10	10
COLUMNA	IN45X157	450	300	28	8
ANILLO EN COMPRESIÓN	HN40X147	400	400	18	12
ANILLO EN TRACCIÓN	HN40X147	400	400	18	12

4.4.3 Definición de los modelos estructurales computacionales.

Al igual que las anteriores estructuras evaluadas computacionalmente, el cálculo se realiza en el programa SAP2000.

La estructura se modela a partir de una figura parabólica de diámetro basal 100 metros y altura 32 metros.

Para la estructuración se realiza un proceso iterativo de manera de llegar a la configuración que responda mejor ante las solicitaciones requeridas.

Las columnas se diseñan de modo que transmitan los esfuerzos a los apoyos. Los que se modelan de forma tal que restrinjan el movimiento vertical, horizontal y volcante en el eje débil de la columna.

Los arriostramientos se modelan de manera que solo trabajen los esfuerzos axiales.

Los anillos en compresión y tracción se modelan con secciones de viga rectas, se modelan de modo que soporten las cargas de momento de la estructura transmitida por la columna. La modelación de estos elementos se puede mejorar mediante la utilización de elementos finitos de modo de afinar el diseño de este elemento especial.

Las conexiones de la estructura no han sido diseñadas por tratarse de un modelo preliminar de la nave. Asimismo no se ha considerado el diseño de los elementos en tracción.

La cubierta de la estructura se modela de modo que no aporte rigidez a la estructura.

Se debe considerar además el refuerzo de una sección de la estructura por concepto de carga de material. En las estructuras analizadas se considera un refuerzo que aporte rigidez a la sección específica de la estructura que se somete a la carga extra.

4.5 Definición de los modelos y estados de carga

Cada estructura se diseña para las solicitaciones siguientes:

- Cargas permanentes.
- Sobrecarga de uso.
- Sobrecargas medioambientales.

4.5.1 Cargas permanentes.

4.5.1.1 Cargas de peso propio.

Se consideran en esta categoría todas aquellas cargas constituidas por el peso de cada elemento de la estructura, además del peso de los equipos o instalaciones que se encuentren ligados de forma permanente a la estructura.

En este caso solo se consideran los pesos de los elementos de la estructura ya que no se dispone de elementos ni equipos extras.

4.5.2 Sobrecargas de uso.

4.5.2.1 Sobrecargas de techo.

Dada la naturaleza de las estructuras, solo están pensadas para almacenar material, las sobrecargas consideradas se limitan a aquellas referidas a sobrecargas de techo según la NCh1537 Of.2009.

4.5.3 Cargas medioambientales.

4.5.3.1 Acción del viento.

Esta se determina a partir de la NCh432 Of.1971 donde se estipulan las condiciones para determinar la acción del viento sobre determinada estructura.

4.5.3.2 Acción de la nieve.

Se determina a partir de la NCh431 Of.1977. Dada la ubicación de la estructura, no se hace necesario considerar cargas de nieve en el proyecto.

4.5.3.3 Acción sísmica.

Se determina de acuerdo a lo estipulado en la norma de diseño sísmico para estructuras industriales NCh 2369 Of2003.

4.5.4 Combinaciones de carga.

Se definen a partir de la norma Chilena NCh 2369 Of.2003 y la ASCE 7-02 (ASD)

$$C1 := D + F$$

$$C2 := D + H + F + L + T$$

$$C3 := D + H + F + \max(L_t + S + R)$$

$$C4 := D + H + F + 0.75(L + T) + 0.75(\max(L_t, S, R))$$

$$C5 := D + H + F + \max(W, 0.7E)$$

$$C6 := D + H + F + 0.75 \max(W, 0.7E) + 0.75L + 0.75 \max(L_t, S, R)$$

$$C7 := 0.6D + W + H$$

$$C8 := 0.6D + 0.7E + H$$

Donde:

D : esfuerzos debido al peso propio.

F : esfuerzos debido a la acción de fluidos.

T : esfuerzos debido a la acción de temperatura y retracción.

L : esfuerzos debido a sobrecargas.

H : esfuerzos debido a la acción del suelo o del agua del suelo.

Lt : esfuerzos debido a sobrecargas de techo.

S : esfuerzos debido a cargas de nieve.

R : esfuerzos debido a cargas por lluvia.

E : esfuerzos debido a acción sísmica.

W : esfuerzos debidos a la acción del viento.

4.6 Definición de análisis sísmico.

Las estructuras son diseñadas de modo que puedan soportar las sollicitaciones sísmicas. Deben ser capaces de absorber grandes cantidades de energía más allá del rango elástico, antes de que se produzca la ruptura de los elementos.

Se debe diseñar tal que la estructura sea dúctil de modo de evitar falla del tipo frágil o inestabilidades que produzcan el colapso de la estructura.

4.6.1 Método de análisis.

Se utiliza programa computacional para evaluar las estructuras ante la acción sísmica, según lo estipulado en la norma de diseño sísmico para estructuras industriales, se desarrolla un modelo de análisis elástico dinámico que incluye análisis tipo modal espectral.

Las combinaciones de cargas se realizan de manera lineal para cada caso de análisis del modelo.

4.6.2 Punto de aplicación de las cargas sísmicas.

Según el modelo desarrollado se considera que las cargas sísmicas actúan en el centro de masa de cada elemento que compone la estructura.

4.6.3 Dirección de las cargas sísmicas.

Acción sísmica horizontal.

El análisis modal espectral se realiza para el espectro de diseño especificado en la norma en cada dirección. Suponiendo estas dos direcciones perpendiculares entre ellas.

Acción sísmica vertical.

Según lo especificado en la norma de diseño sísmico para estructuras industriales las cargas verticales pueden ser obviadas en caso de que no afecten de manera significativa el dimensionamiento de la estructura, en este caso no se considera ya que la carga vertical presenta una magnitud poco relevante para el peso de la estructura.

4.6.4 Parámetros sísmicos de las estructuras.

A partir de la norma de diseño sísmico de estructuras industriales NCh 2369 Of.2003 se determinan los parámetros sísmicos que rigen la estructura según tipo de suelo, zona sísmica e importancia de la estructura.

Tabla 4.7: Parámetros análisis sísmico

Parámetro	Valor
Importancia estructura	C2
I	1
Zona	3
Tipo de Suelo	II
Ao	0,4g
ξ	0,003
R	5
Cmax	0,4
T'	0,36 seg.
n	1,33

5 Análisis de las estructuras.

5.1 Análisis de factibilidad técnica de las estructuras.

El análisis de factibilidad se realizara en forma independiente para cada una de las tres soluciones planteadas en este trabajo.

En primer lugar se identifican los factores que influirán en el desarrollo de cada una de las estructuras de manera de evaluar cada una de estas para las mismas condiciones ambientales, de trabajo y de disponibilidad.

a) Factores de trabajo y ambientales:

Solicitaciones sobre la estructura: La estructura debe ser capaz de soportar las cargas operacionales a las que estará sometida, como en este caso la función de las estructuras está pensada como netamente de almacenamiento, sin incluir equipos porta grúa o similares, las mayores solicitaciones serán de tipo ambientales y sísmicas. En caso de que se deseara incluir este tipo de equipos en la estructura deberá considerarse las solicitaciones adicionales que estos presentan.

Cargas por viento: En cada caso se debe evaluar la acción del viento sobre la estructura, para esto se consideran las cartas de viento de cada localidad donde se evalúa el proyecto. En cada caso, debido a la configuración de la estructura, el viento afectara de manera distinta.

Cargas por nieve: Las cargas por nieve se vuelven importantes cuando el proyecto se sitúa en lugares donde las nevazones son regulares o incluso esporádicas, pero para los escenarios que se evalúan en este trabajo no tienen mayor relevancia debido a que los escenarios planteados se sitúan en la zona norte del país, cerca del borde costero, donde no existen registros de fenómenos nivosos.

Solicitaciones sísmicas: Debido a que Chile en su mayor parte del territorio presenta características sísmicas importantes, se debe realizar una evaluación de la capacidad de las estructuras para soportar estas solicitaciones. Para esto se utilizan los espectros definidos en las normas de diseño de estructuras industriales.

Resistencia a la corrosión: En vista de la cercanía a la costa que presentan los proyectos desarrollados en este trabajo las estructuras diseñadas o propuestas deben cumplir con una resistencia a la corrosión o la factibilidad de implementar medidas para evitar el

rápido deterioro de las estructuras por este concepto. Otro factor ambiental que afecta al deterioro por corrosión de las estructuras es el ambiente desértico característico de la zona en que se sitúa el proyecto. Pinturas anticorrosivas, hormigones con adiciones, tratamiento iónico son algunas de las alternativas que se pueden evaluar.

- b) Disponibilidades: Se enumeran algunos factores que si bien, no son intrínsecos del lugar ni del correcto funcionamiento de la estructura, son primordiales para el desarrollo del proyecto.

Disponibilidad de materiales: En la construcción de cada proyecto se utilizan gran cantidad de recursos materiales que pueden ser difíciles de conseguir si no se realiza una adecuada programación o investigación de los proveedores adecuados. Piezas a medida, membranas aislantes, aditivos para hormigones, etc. En este caso cada estructura tiene sus propias características consecuentes con su diseño y este ítem debe ser evaluado de forma individual para cada una.

Disponibilidad de mano de obra calificada para la construcción: Para la construcción de cada estructura debe existir el personal capacitado para el desarrollo de esta. Soldadura, montaje, hormigonado, son solo algunas de las múltiples partidas que una obra de estas características involucra.

Disponibilidad de mantención: Debido al deterioro por corrosión ya mencionado, sumado al deterioro por uso de las instalaciones, a las estructuras se les debe realizar mantenciones periódicamente. Establecer los tiempos de mantención y determinar el personal calificado para realizarlas debe ser un punto a considerar antes de la construcción de modo que no sea un problema en la etapa de funcionamiento.

Diseño consecuente con maquinaria: Para el transporte de graneles se utilizan distintos tipos de maquinarias, cintas transportadores, apiladoras, remolcadoras, etc. Es importante que el diseño de la estructura sea consecuente con las máquinas que se requieran para suplir las demandas de carbón u otro tipo de granel que se almacene en las estructuras.

Accesos, vías de evacuación: Verificar que el modelo propuesto cumpla con las normas nacionales de modo que no sea un problema su puesta en operación por este ítem.

5.1.1 Solución galpón marcos rígidos.

Como se definió anteriormente una de las soluciones evaluadas consiste en una estructura de marcos rígidos construida en acero, Para esta estructura se realiza el análisis de factibilidad como se detalla.

Cargas de trabajo: Las cargas de trabajo a las que esta afecta la estructura no tienen relación con los equipos que se operen dentro de esta, las cintas transportadoras y apiladoras para el material se montan en forma independiente a la estructura de galpón, de esta forma las solicitaciones que se consideraron en el diseño incluyen solo cargas de mantenimiento y montaje que son las definidas en el Anexo A.

Cargas por viento: Las cargas por viento a las que se somete la estructura están definidas en el Anexo A. Dado que la estructura se diseña para soportar estas solicitaciones la factibilidad de la construcción no se ve amenazada por las cargas por viento presentes en la zona del proyecto.

Cargas por nieve: Según lo estipula la norma chilena no se deben considerar cargas por nieve en la zona geográfica donde se emplaza el proyecto por lo que no se incluyen en el diseño de la estructura.

Solicitaciones sísmicas: En el capítulo de diseño se incluyen las solicitaciones sísmicas que si se vuelven relevantes al definir la estructura. La estructura se diseña de tal forma que sea capaz de resistir dichas solicitaciones y permitir su correcto funcionamiento.

Resistencia a la corrosión: Al tratarse de una estructura de acero expuesta al ambiente marino la corrosión se convierte en un problema si no se toman las medidas pertinentes, en este caso se propone pintar la estructura con pintura anticorrosiva de manera de evitar el daño causado por el ambiente. Se recomienda que todas las partes metálicas, uniones y soldaduras estén igualmente cubiertas con este tipo de protección. Otras soluciones que se pueden encontrar en el mercado son la galvanización mediante fuego, uso de aceros patinables (aceros del tipo corten o similares, con un contenido de cobre que forma una patina, capa de óxido externa que inhibe la corrosión ulterior), uso de productos revestidos en zinc o zinc-aluminio, y otras.

En resumen una estructura de este tipo presenta sus limitaciones en la etapa de diseño, pero si se evalúan las solicitaciones involucradas, así como las cargas sísmicas necesarias, la factibilidad no se ve limitada desde el punto de vista de las solicitaciones a las que se

somete la estructura, asimismo la corrosión es un problema estudiado en el país y existen en el mercado soluciones para minimizarla.

Disponibilidad de materiales: Los problemas en esta área podrían surgir desde el punto de vista de la fabricación de perfiles especiales, gussets a medida o planchas de refuerzo adicionales a los perfiles comercializables en el país. Para evitar mayores contratiempos en este punto se utilizan en el diseño perfiles que se encuentran actualmente en catálogos comerciales y en caso de necesitar alguna pieza extraordinaria se puede programar su adquisición de manera anticipada. Actualmente es posible importar piezas a pedido en caso de no encontrarse en el mercado local por lo que no representa mayor problema.

Disponibilidad de mano de obra calificada para la construcción: En Chile hay numerosas empresas constructoras que han desarrollado proyectos de magnitudes similares e incluso muy superiores en tonelaje al que se presenta, el montaje de las estructuras de acero, así como las soldaduras, fundaciones, uniones especiales, etc. Lo pueden realizar numerosas empresas en el área de montaje industrial y/o construcción.

Disponibilidad de Mantención: Los mayores requerimientos en mantención para este tipo de instalaciones vienen del lado de evitar la corrosión, al estar expuesta al clima marítimo la estructura podría presentar, si no es mantenida adecuadamente, este tipo de desgaste. Afortunadamente se pueden encontrar en el mercado numerosos productos para evitar la corrosión sobre estructuras de acero. Pinturas, emulsiones y tratamientos iónicos son algunos de los productos que se pueden conseguir. Usualmente este problema se soluciona aplicando pinturas anticorrosivas periódicamente (establecido según fabricante) a las estructuras. Mano de obra para este tipo de trabajo no es difícil de contratar si se gestiona con el tiempo correspondiente.

Diseño consecuente con maquinaria: Como se vio en el capítulo de diseño de las estructuras, la configuración de pila que se adopta para el diseño de la estructura considera la modificación de la maquinaria actualmente existente en la central Angamos de modo de optimizar el área de acopio de material.

La implementación de nuevos sistemas de apilamiento no solo beneficiaría la capacidad de almacenamiento, además se pueden obtener mayores rendimientos con apiladores de pila única longitudinal.

Otro sistema que se puede mejorar dentro del funcionamiento de la central es el de extracción del material de las pilas. Actualmente esta tarea se desarrolla mediante la utilización de cargadores frontales y camiones tolva lo que además de ser poco eficiente y

utilizar grandes cantidades de combustible, produce dispersiones de polvos contaminantes, que es precisamente lo que se busca disminuir en este trabajo. Existen en el mercado soluciones más elegantes para esta tarea, que si bien significan una inversión inicial considerable presentan soluciones a todos estos problemas. Sistemas de recogedoras tipo pórtico o semipórtico son ideales para la remoción del carbón de las pilas por su rendimiento y seguridad de operación, esto sumado a un sistema de bandas transportadoras pueden llegar a rendimientos de 2000 toneladas por hora disminuyendo los gastos en combustible y con mínima dispersión de emisiones fugitivas.

5.1.2 Solución tipo estructura mixta.

En lo que se refiere a solicitudes sobre este tipo de estructuras la factibilidad se resuelve de igual manera que en el punto anterior, donde la factibilidad técnica de la estructura viene dada por el diseño de la misma, como en este caso se diseña sobre un escenario propuesto, todo lo referido a resistencia de materiales, perfiles, uniones y resistencia a factores ambientales se tratan en la etapa de diseño.

La diferencia principal que se presenta con respecto a la llamada estructura de marcos rígidos la da la utilización de hormigón armado, material que solo se considera en los cimientos de la estructura de marcos rígidos, pero que en este modelo pasa a tener un papel estructural principal. De igual manera se analizan las solicitudes a las que se verán sometidos los elementos en forma individual para lograr el correcto funcionamiento de la estructura desde el punto de vista de resistencia a las diferentes solicitudes.

En lo que se refiere a disponibilidades se da de manera similar, el trabajo en acero y hormigón armado en Chile se realiza hace varios años y existen un sinnúmero de empresas capaces de realizar las faenas de acuerdo a las indicaciones de diseño, de modo que la mano de obra calificada para el trabajo se encuentra disponible dentro del país.

Lo mismo pasa con el requerimiento de materiales, donde los mayores insumos se refieren a perfiles de hormigón, pero como el diseño se realiza según catálogo de fabricante se garantiza que existe la oferta de dichos perfiles. El requerimiento de hormigón por su parte no presenta mayor problema, ya que se han llevado a cabo proyectos mayores al presentado (centrales termoeléctricas) en la zona y, en su momento, se resolvieron, de modo que la solución para el requerimiento de hormigón no es un tema a tratar.

El tema de la corrosión se trata de igual manera que para la estructura de marcos rígidos, ya que la parte de la estructura que merece mayor cuidado en este aspecto es

precisamente la que corresponde a las cerchas de acero. En caso de que el hormigón se viera afectado por lo extremo del clima se podría considerar la inclusión de algún aditivo (disponible en el mercado) que le otorgue mayor resistencia a los factores ambientales correspondientes, pero por ahora no se considerara.

Lo correspondiente al diseño acorde a las maquinarias disponibles se resuelve en la etapa de diseño, se considera el recambio de la maquinaria actual en favor de disminuir el tamaño de la estructura. De modo que no se tiene la compatibilidad deseada en términos de maquinaria.

Como en el caso anterior, el recambio de los equipos actuales no solo presenta beneficios de espacio y constructivos, si no que se suman todos los destacados para la estructura de marcos rígidos.

5.1.3 Estructura tipo domo de Hormigón proyectado.

Como se ha descrito en capítulos anteriores la estructura a evaluar corresponde a un domo monolítico construido con hormigón proyectado con membrana inflable exterior, método Turner ya que el método de hormigón proyectado con membrana inflable interior, método Binishell no cumple con los requerimientos para presentarse como solución.

En cuanto a la resistencia a las solicitaciones que presentan este tipo de estructuras no existen mayores complicaciones al momento de alcanzar los estándares requeridos en el país, tanto para cargas permanentes y vivas como para las solicitaciones sísmicas a las que se puede ver sometida la estructura.

Asimismo la estructura presenta un adecuado comportamiento frente a la corrosión ya que se trata de estructura completamente cubierta por hormigón, material que presenta buenas prestaciones ante este fenómeno. Como medida adicional se pueden agregar aditivos al hormigón para mejorar sus prestaciones frente a la corrosión. Adicionalmente se pueden tomar medidas para proteger los materiales como recubrimientos asfálticos o aislantes para la humedad.

En cuanto se refiere a disponibilidades, si bien todos los insumos se pueden conseguir, mano de obra y maquinarias necesarias para el inflado de las membranas, este tema se vuelve un poco más complejo por la poca experiencia respecto del tema en el país.

Los insumos requeridos para la realización de este tipo de estructuras son, como se ha descrito en capítulos anteriores, membrana inflable, espuma de poliuretano, armadura de refuerzo y hormigón (en forma de hormigón proyectado). Para el caso de la membrana inflable es necesario conseguirla en el extranjero ya que no hay en este momento en el país mercado suficiente para que se haga rentable la fabricación en Chile de este tipo de insumos, esto no constituye un problema mayor ya que las empresas que prestan el servicio de construcción de domos se encargan, en general, de este trámite. El resto de los insumos se pueden conseguir dentro del territorio nacional, no ocasionando problemas en este ítem.

Si se trabaja con empresas extranjeras el tema de la mano de obra especializada (necesaria para este tipo de trabajo) deja de ser un problema, si bien puede significar incurrir en mayores gastos se garantiza el correcto desarrollo del proyecto, así como el cumplimiento de los plazos de ejecución programados.

La maquinaria necesaria para este tipo de trabajos se puede conseguir en el mercado nacional, bombas de compresión de aire, sistema de proyección de hormigón y espuma. Los costos de estos materiales y su posible reutilización se evalúan más adelante en este trabajo.

La mantención requerida por este tipo de estructuras es mínima al tratarse de un domo de hormigón, en caso de daño de la estructura, ésta se debe evaluar y la reparación se puede realizar por los métodos tradicionales para fallas en hormigones (agrietamiento tardío o fisuración).

Como se mencionó en el análisis de las estructuras anteriores se busca en este proyecto poder adaptar la maquinaria existente en la central al nuevo diseño de los acopios. En este punto esta alternativa presenta problemas, ya que la apiladora no es compatible con el diseño tipo domo de esta estructura, por lo que se debe considerar la incorporación al proyecto de nuevos equipos de transporte o apilamiento de los graneles.

5.1.4 Estructura tipo domo metálico.

La respuesta a las solicitudes que presenta la estructura tipo domo de acero es sumamente eficiente. Debido a la forma parabólica que presenta la estructura la distribución de cargas permite trabajar con perfiles de dimensiones menores que en el caso de las estructuras con marcos rígidos para lograr los volúmenes de acopio deseados. La estructura se diseña para soportar las cargas de uso y las solicitudes debido al

ambiente de modo que se presenta como una solución viable al problema de almacenamiento de grandes volúmenes de graneles.

En este trabajo se desarrolla la estructura a partir de perfiles de acero de alma llena y perfiles tipo canal, pero empresas especializadas en el rubro han ideado soluciones a partir de perfiles de aluminio con conexiones especiales que reducen considerablemente el peso de la estructura y permiten, por su sistema de ensamblaje, la construcción en periodos de tiempo realmente cortos.

La resistencia a la corrosión de esta estructura se maneja de manera similar a los casos anteriormente evaluados de estructuras de acero, pinturas anticorrosivas o aceros especialmente diseñados para soportar las condiciones ambientales permiten que la estructura no se vea afectada mayormente por la corrosión. El muro de hormigón que presenta la estructura no es de mayor cuidado en cuanto a protección ante ataque corrosivo por el buen comportamiento del hormigón frente a este fenómeno.

Los materiales utilizados en la estructura son principalmente perfiles de acero, disponibles en los catálogos nacionales y hormigón armado tradicional. No se incluyen estructuras especiales por lo que no debería presentar problema la adquisición de los materiales necesarios para la construcción de la estructura.

La mano de obra requerida, debe estar especializada para trabajos en acero de grandes estructuras, pero estructuras similares se han construido en el país, por lo que existe la mano de obra calificada necesaria para la realización del proyecto.

La maquinaria de montaje que se utiliza en este tipo de estructuras no es más compleja que un sistema de grandes grúas y las cargas que se deben alzar en ningún caso son de magnitudes por sobre las normales para una obra civil convencional.

Para mantener la estructura operativa durante el periodo que se necesite se requiere una mantención periódica de los sistemas anticorrosivos por la cercanía al mar de la nave, pero si se trabaja con pinturas anticorrosivas o algún similar, la mantención se puede realizar sin problemas durante el periodo de operación de la estructura.

5.2 Presupuestos.

Se presentan los distintos presupuestos de inversión para cada estructura según las consideraciones presentadas.

Para la evaluación de las estructuras se considera un costo por tonelada de acero instalada promedio de 5 US\$/kgf. Para el hormigón instalado se considera un valor de 1US\$/kgf (valores recopilados de obras similares)

5.2.1 Estructura de marcos rígidos.

Se considera que los perfiles de acero son adquiridos en el territorio nacional y que la estructura es montada con mano de obra igualmente nacional.

La tabla 5.1 presenta el presupuesto para la estructura de marcos rígidos.

Tabla 5.1: Presupuesto estructura marcos rígidos.

Sección	Tipo Perfil	Peso	Valor elemento
		Tonf	US\$
VIGA CERCHA SUPERIOR	IN	194	971.970
VIGA CERCHA INFERIOR	IN	159	792.710
COLUMNA 1	IN	249	1.244.828
COLUMNA 2	IN	46	231.730
DIAGONAL 1	Canal	82	408.305
DIAGONAL 2	Canal	125	623.575
MONTANTES	Canal	5	24.527
PUNTAL ARRIOSTRAMIENTO INFERIOR	Angulo	88	438.505
PUNTAL ARRIOSTRAMIENTO SUPERIOR	Angulo	82	407.566
ARRIOSTRAMIENTO LATERAL	Canal	38	190.710
VIGA SUPERIOR	IN	12	61.185
PUNTAL ARRIOSTRAMIENTO EXTRA	Canal	20	100.144
10% ADICIONAL POR CONEXIONES		110	549.575
TOTAL		1.209	6.045.328

5.2.2 Estructura Mixta acero hormigón.

Las consideraciones para esta estructura son idénticas a las presentadas para la estructura de marcos rígidos.

El presupuesto obtenido para esta estructura se presenta en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Presupuesto estructura mixta.

Sección	Tipo Perfil	Peso	Valor elemento
Text	Text	Tonf	US\$
VIGA INFERIOR CERCHA	IN	177	882.549
VIGA SUPERIOR CERCHA	IN	211	1.053.145
COLUMNA H30	HORMIGON	81	21.870
MURO	HORMIGON	438	118.390
VIGA SUPERIOR	IN	14	67.949
COLUMNA CERCHA	IN	21	105.868
VOLCAMIENTO	ANGULO	31	152.962
DIAGONAL	CANAL	89	445.733
MONTANTE	CANAL	21	105.199
ARRIOSTRAMIENTO	CANAL	81	407.253
ARRIOSTRAMIENTO LATERAL	CANAL	32	159.083
COLUMNA DESCARGA	IN	10	50.209
ARRIOSTRE CORDON SUPERIOR	CANAL	76	378.196
10% CONEXIONES		76	380.814
TOTAL			4.329.218

5.2.3 Estructura tipo domo de hormigón proyectado.

Para la evaluación de esta estructura se utilizaron valores reales a partir de estructuras similares.

En el trabajo de título de E. Solar (2007) se realiza la evaluación a través de indicadores de estructuras tipo domo de hormigón proyectado construidas en Chile. A partir de estos indicadores se determina un valor promedio entre las soluciones ahí presentadas de modo de extrapolar los resultados presentados en ese trabajo de título al escenario presentado.

En las tablas 5.3 y 5.4 se presentan los presupuestos de las estructuras tipo domo de hormigón proyectado utilizando dos indicadores distintos, el primero determina el valor de la estructura a partir del área cubierta por esta y el segundo utiliza el volumen almacenado por la estructura como cuantificador para la evaluación.

Tabla 5.3: Presupuesto estructura domo Turner según área.

Índice de costo	Valor promedio	Área	Valor estructura
	US\$/m ²	m ²	US\$
Costo de superficie cubierta	1090	7854	8.560.840

Tabla 5.4: Presupuesto domo Turner según volumen almacenado.

Índice de costo	Valor promedio	Volumen	Valor estructura
	US\$/m ³	m ³	US\$
Costo volumen almacenado	96	80000	7.680.000

5.2.4 Estructura tipo domo de acero.

Para determinar el presupuesto de esta estructura se utilizan las consideraciones de los casos de las estructuras de acero.

El presupuesto se presenta en la tabla 5.5.

Tabla 5.5: Presupuesto estructura domo de acero.

Elemento	Tipo perfil	Peso total	Valor elemento
		Tonf	US\$
ARRIOSTRAMIENTO	CANAL	90	450.899
COLUMNA	IN	350	1.748.938
ANILLO EN COMPRESIÓN	IN ESPECIAL	2	10.447
ANILLO EN TRACCIÓN	IN ESPECIAL	38	189.243
MURO HORMIGON	HORMIGON	339	91.609
10% CONEXIONES		48	12.957
TOTAL			2.504.092

5.3 Evaluación soluciones.

Para realizar la evaluación de las soluciones planteadas a lo largo de este trabajo se tomaran en cuenta 5 factores principales. Factibilidad técnica de realizar el proyecto, costos asociados a la construcción, tiempo de desarrollo, capacidad de adaptación al esquema actual del escenario escogido y capacidad de almacenamiento.

A modo de realizar un análisis comparativo entre las soluciones propuestas, cada estructura se evalúa con entre 1 y 4 puntos en cada ítem según su posición de beneficio respecto de las otras tres soluciones. Adicionalmente cada ítem se pondera según la importancia relativa que representa para el proyecto. En caso de que dos estructuras presenten igual desempeño en un ítem se evalúan con la misma puntuación.

5.3.1 Descripción de ponderadores.

5.3.1.1 Factibilidad técnica del proyecto.

Cada estructura se evalúa referente al análisis de factibilidad realizado en capítulos anteriores. Se considera capacidad de la estructura para soportar las cargas de diseño, así como las cargas sísmicas y otros factores ambientales relevantes. Además se evalúa la disponibilidad de materiales y mano de obra calificada para desarrollar el método propuesto.

Dado que la factibilidad es clave en la realización del proyecto es el ítem que recibe la mayor ponderación de los 5 factores a evaluar y se pondera con un 30% de importancia del proyecto total.

5.3.1.2 Costos asociados al proyecto.

Para cada alternativa estudiada se calculan los costos asociados a la construcción.

El método utilizado para estimar los costos de construcción de cada alternativa se detalla donde corresponde.

La ponderación de este ítem si bien resulta importante en caso de construcciones civiles, no se hace tan relevante al ponerlo en perspectiva de un proyecto tipo central termoeléctrica, los costos totales de una central están muy por sobre los costos de inversión que representan estas alternativas para almacenar graneles de modo que el factor de importancia que se le asigna es de 20%, en caso de que la evaluación se requiera para otro tipo de proyecto donde el costo del sitio de acopio se torne más relevante esta ponderación podría variar.

5.3.1.3 Tiempo de ejecución.

Como las soluciones evaluadas son relativamente rápidas de desarrollar ocurre algo similar que en el punto anterior, los plazos de construcción de la estructura de acopio será mucho menor que el tiempo de puesta en archa necesario para dejar operacional una central termoeléctrica, de modo que nuevamente el factor de importancia es relativamente bajo, así se evalúa ponderando por 15% el tiempo de ejecución de la obra.

Al igual que en el caso de los costos asociados, este ítem toma importancia en la medida que los plazos de construcción se ven acotados.

5.3.1.4 Adaptación al escenario actual.

Aquí se hace referencia a la capacidad que tiene la estructura propuesta de adaptarse al escenario determinado anteriormente en cuanto se refiere a reutilización de la maquinaria de apilamiento actual, posibilidad de ampliación de volumen de almacenamiento y utilización optima del espacio disponible.

El factor de ponderación asignado a esta categoría corresponde a 15% debido al elevado costo de los equipos involucrados, de modo que la capacidad de reutilizar la maquinaria disponible es relevante de evaluar.

5.3.1.5 Capacidad de almacenamiento por área.

Esto se refiere a la capacidad de almacenamiento que presenta la estructura evaluada, así como la posibilidad de ampliar dicha capacidad por cualquier eventualidad.

El factor de importancia de este ítem es 20% dado que es importante que se cumplan los almacenamientos requeridos y la capacidad de ampliación sin incurrir en gastos mayores es también relevante.

5.3.2 Ponderación de soluciones.

Las estructuras se evalúan como se definió anteriormente, los resultados se muestran en la tabla 5.6.

Tabla 5.6: Ponderación por estructura.

PONDERADOR	PONDERACIÓN	ESTRUCTURA			
	%	Marcos rígidos	Mixta	Domo tipo Turner	Domo Acero
Factibilidad técnica	30	4	4	3	4
Costo asociado	20	2	3	1	4
Tiempo ejecución	15	2	2	4	3
Adaptación escenario actual	15	4	4	3	3
Capacidad almacenamiento/área	20	2	2	3	4
EVALUACIÓN	100	2,9	3,1	2,8	3,7

5.3.3 Observaciones a la evaluación.

En la ponderación por factibilidad técnica las cuatro estructuras son posibles de realizar en Chile, cumplen con los requerimientos estructurales y la factibilidad constructiva, es por esto que todas obtienen la máxima calificación a excepción de la estructura tipo Turner, esto debido a la necesidad de adquirir insumos para esta estructura en el extranjero, así como por la poca experiencia que se tiene respecto del método constructivo en el país. Si bien se puede conseguir mano de obra capacitada o bien capacitar al personal nacional esto puede presentar contratiempos o problemas en el desarrollo del proyecto.

Los costos asociados son los presentados anteriormente en este mismo capítulo, cada estructura obtiene una calificación respecto a su presupuesto relativo entre las cuatro comparadas.

La puntuación del tiempo de ejecución se determina siguiendo la lógica anterior, cada estructura se pondera según su tiempo de ejecución relativo a los otros métodos evaluados, en este ítem el método Turner demuestra ser el más conveniente.

En la adaptación al escenario actual ninguna de las estructuras resulta bien evaluada. En las que consideran almacenamiento de pilas longitudinales el puntaje es relativamente mayor por cuanto podría mantenerse la configuración actual de la central evaluada, pero no se alcanzarían los volúmenes de material almacenados esperados. En las estructuras que consideran una configuración de anillo de las pilas de material el equipo que actualmente maneja la central es inutilizable, motivo por el cual obtienen la mínima calificación.

La capacidad de almacenamiento por área es un ítem que beneficia a las estructuras con la configuración de pila de cono o anillo, que en este caso son ambas estructuras tipo domo, en el caso de la estructura metálica la calificación es levemente superior al domo Turner ya que se diseña con un muro perimetral especialmente diseñado para soportar las cargas del material acopiado en el interior, aumentando los volúmenes de almacenamiento. Tanto la estructura de marcos rígidos como la estructura mixta utilizan superficies muy superiores para lograr los volúmenes de acopio requeridos.

6 Conclusiones.

6.1 Conclusiones de la factibilidad técnica.

Se concluye que es factible la implementación de los métodos evaluados en este trabajo, ya que las estructuras se diseñan especialmente para las condiciones ambientales y de trabajo a las que se someterá la estructura.

Existe en Chile un déficit de mano de obra capacitada para algunos métodos evaluados en este trabajo, como por ejemplo el método de hormigón proyectado tipo Turner, pero es posible capacitar al personal o bien contratar especialistas extranjeros que realicen una adecuada supervisión del desarrollo del proyecto.

Desde el punto de vista de los materiales, en este momento es complicado conseguir algunas de las membranas necesarias para realizar los métodos por hormigón proyectado por la escasa demanda que estos presentan en el país, pero es posible importar estos insumos sin mayores sobrecargos.

En lo que se refiere a trabajo en estructuras de acero y hormigón existen en Chile empresas con gran experiencia con estos materiales al igual que en montaje industrial de estructuras de grandes dimensiones, por lo que es posible encontrar mano de obra capacitada en el territorio nacional. Igual se da con los insumos necesarios para la construcción de estas estructuras.

Existen numerosas empresas nacionales e internacionales que se dedican especialmente al cálculo, desarrollo de proyectos e implementación de soluciones de almacenamiento, del tipo que se evalúan en este trabajo. Algunas de ellas han implementado soluciones muy similares a las presentadas en este trabajo, de modo que la factibilidad de éstas está comprobada.

6.2 Factibilidad económica.

Respecto de la factibilidad económica del desarrollo de estos proyectos en el país y dados los presupuestos que se presentan en capítulos anteriores, se concluye que la realización es completamente factible, ya sea se trabajen los proyectos en forma particular o a través de una empresa especializada en el rubro.

Si bien los costos de construcción y mantención de este tipo de estructuras es superior al que presentan las actuales medidas de contención de polvos dispersantes las crecientes

exigencias ambientales en el país hacen necesario considerar estas estructuras en futuros proyectos.

6.3 Conclusiones de la evaluación de las estructuras.

Al realizar la evaluación de las estructuras por medio de indicadores, la que resulta mejor evaluada en la ponderación general es la estructura tipo domo construida en acero. Esta evaluación se realiza considerando los supuestos de importancia detallados en el capítulo correspondiente, de modo que podría cambiar dependiendo de la importancia que se le asigne a cada ponderador según las exigencias de cada cliente.

Así bajo los parámetros establecidos se determina que la solución que mejor se adapta al escenario propuesto es la de estructura de acero tipo domo.

Esta solución si bien destaca por sobre las otras presentadas, bien podría no ser la escogida por un mandante en particular, por ejemplo por favorecer la mantención de la maquinaria de apilamiento actual, en este caso un sistema de almacenamiento para pila longitudinal sería lo indicado de modo que la evaluación es distinta para cada caso.

Adicionalmente a la solución de parque circular presentada la configuración de la estructura se puede presentar de muchas formas e incluso en materiales distintos al acero. La empresa extranjera GEOMETRICA por ejemplo presenta una solución en perfiles de aluminio que aligeran las cargas sobre la estructura y tienen las mismas prestaciones que las estructuras tradicionales de acero.

6.4 Otros alcances

Además de las soluciones de almacenamiento aquí presentadas se pueden desarrollar otras en los mismos u otros materiales tal como se detalla en el capítulo de marco teórico.

El desarrollo de las estructuras, en términos de diseño, presentadas en este trabajo es limitado, de modo de que si se desea tener presupuestos reales es necesario profundizar en el análisis y dimensionamiento de las estructuras, diseño de conexiones y un análisis estructural más detallado, así como plazos de ejecución, costos por mano de obra, maquinaria de ensamblaje, permisos de construcción, etc. son algunos de los ítems que podrían ayudar a afinar una decisión real respecto de que estructura resuelve de mejor manera los requerimientos de determinado proyecto.

Por otro lado se encuentra la implementación de maquinaria necesaria para el funcionamiento de estos sitios de almacenamiento, tema que no se aborda en este

trabajo que podría, según sus costos o factibilidad técnica, marcar la diferencia en la elección de una configuración u otra.

7 Bibliografía y referencias

- [1] Normas de calidad primaria (D.S. Nº 59/98, y Nº 45/01) Material Particulado Respirable MP10
- [2] Pagina Web Domos Geometrica, <http://www.geometrica.com>, Julio 2011.
- [3] Esteban Andrés Solar, "Análisis de Factibilidad Técnico Económico Sobre la Construcción de Domos de Hormigón Armado de Grandes Luces Mediante Compresión de Aire, en Chile". (Trabajo de Titulación, Ingeniería Civil) Santiago, Chile, Universidad De Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2007.
- Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318 – 05) y Comentario (ACI 318 SR – 05)
- Norma Chilena Oficial NCh 2369. Of 2003: Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales.
- Norma Chilena Oficial NCh 432 Of. 1971: Calculo del viento sobre las construcciones
- Norma Chilena Oficial NCh 1537 Of. 2009: Diseño Estructural de Edificios- Cargas Permanentes y sobrecargas de Uso.
- Pagina Web Domos, <http://www.domos.es/>, julio 2011.
- Pagina Web air Jump, <http://www.air-jump.com/>, Julio 2011.
- Pagina Web Central Pacifico, <http://www.centralpacifico.cl>, Julio 2011.
- Pagina Web Evaluación Ambiental Gobierno de Chile, <http://www.sea.gob.cl>, Julio 2011
- Rudolf Paul Schmidt Cronosija, Estudio de métodos de análisis en una estructura tipo domo de cuarenta y cinco mil toneladas para almacenamiento de mineral chancado, (Trabajo de Titulación, Ingeniería Civil) Santiago, Chile, Universidad De Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,

ANEXOS.

ANEXO A: CARGAS DE DISEÑO.

a) Estructura Marcos Rígidos

I Cargas de diseño

Cargas a considerar:

- Peso propio
- Sobrecargas techo
- Viento
- Nieve
- Carga de montaje/mantenimiento
- Otra

1. Peso Propio.

2. Cargas de Techo.

Cargas de techo determinadas a partir de NCh 1537 of. 2009 como sigue.

$$\text{Cargabásica} := 100 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$q_k := \text{Cargabásica} = 100 \frac{1}{\text{m}^2} \cdot \text{kgf}$$

Reducción de Carga.

Area tributaria

$$l_{\text{cost}} := 7\text{m}$$

$$S_{\text{cost}} := 2\text{r}$$

$$N_{\text{cost}} := 1\text{€}$$

$$A := 1_{\text{cost}} \cdot S_{\text{cost}} \cdot (N_{\text{cost}})$$

$$A = 224 \text{m}^2$$

$$C_A := \begin{cases} 1 & \text{if } A \leq 20 \text{m}^2 \\ \left(1 - 0.008 \frac{A}{\text{m}^2}\right) & \text{if } 20 \text{m}^2 \leq A \leq 50 \text{m}^2 \\ 0.6 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$C_A = 0.6$$

$$\text{alto}_{\text{techo}} := 7 \text{m}$$

$$\text{ancho}_{\text{techo}} := 30 \text{m}$$

$$\alpha_{\text{techo}} := \cot\left(\frac{\text{alto}_{\text{techo}}}{\text{ancho}_{\text{techo}}}\right)$$

$$\alpha_{\text{techo}} = 4.208$$

$$\tan(\alpha_{\text{techo}}) = 1.81$$

$$C_{\alpha} := \begin{cases} (1 - 2.33 \tan(\alpha_{\text{techo}})) & \text{if } \tan(\alpha_{\text{techo}}) \leq 0.3 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Coefficiente de reducción por pendiente

de techo.

$$C_{\alpha} = 1$$

$$C_A := \begin{cases} 1 & \text{if } A \leq 20 \text{m}^2 \\ 1 - 0.008 \frac{A}{\text{m}^2} & \text{if } 20 \text{m}^2 < A < 50 \text{m}^2 \\ 0.6 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$C = 1 C$$

$$q_{k,\text{red}} := C_{\alpha} \cdot C_A \cdot q_k$$

$$q_{k,\text{red}} = 60 \frac{1}{\text{m}^2} \cdot \text{kgf}$$

$$q_{\text{techo}} := q_{k,\text{red}}$$

$$q_{\text{techo}} = 60 \frac{1}{\text{m}^2} \cdot \text{kgf}$$

$$d_{\text{marco}} := 7\text{m}$$

pasar las cargas a las cerchas

$$q_{\text{techocercha}} := d_{\text{marco}} \cdot q_{\text{techo}} = 420 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

3. Cargas de nieve.

Utilizando la tabla N°2: sobrecargas básicas mínimas de nieve, de NCh 431 of. 1986

se define la sobrecarga por nieve.

$$q_{\text{nieve}} := 0\text{kg}$$

4. Cargas de viento.

Las cargas de viento se determinan a partir de NCh 432 of. 1971 como sigue.

Presión básica del viento.

h

$$p_x := p_h \left(\frac{x}{h} \right)^{2\alpha}$$

Presión a la altura x.

u

velocidad máxima instantánea del viento.

$$q := \frac{u^2}{16}$$

presión básica.

$$\text{presionbasica (h)} := \begin{cases} \left[\frac{(126 - 118)}{20 - 15} (h - 15) + 118 \right] \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} & \text{if } 15 \leq h < 20 \\ \left[\frac{(137 - 126)}{(30 - 20)} (h - 20) + 126 \right] \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} & \text{if } 20 \leq h < 30 \\ \left[\frac{118 - 106}{15 - 10} (h - 10) + 106 \right] \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} & \text{if } 10 \leq h < 15 \\ 70 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} & \text{if } h < 4 \\ \left[\frac{95 - 70}{7 - 4} (h - 4) + 70 \right] \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} & \text{if } 4 \leq h < 7 \\ \left[\frac{106 - 95}{10 - 7} (h - 7) + 95 \right] \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} & \text{if } 7 \leq h < 10 \end{cases}$$

$$d_{\text{marcos}} := 7\text{m}$$

$$\text{carga}_{\text{viento}}(h) := d_{\text{marcos}} \cdot \text{presionbasica (h)}$$

$$\alpha := \cot\left(\frac{15}{35}\right) = 2.189$$

distribuida en los cuartos para techo sobre las cerchas

Cara frontal al viento

$$\text{carga}_{\text{viento}}(12) = 775.6 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$q_{1f} := \text{carga}_{\text{viento}}(12) \cdot [1.2 \cdot (\sin(\alpha) - 0.4)] = 386.339 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$q_{2f} := \text{carga}_{\text{viento}}(15) \cdot (1.2 \cdot \sin(\alpha) - 0.4) = 477.524 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$\text{carga}_{\text{viento}}(17) = 848.4 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$q_{3f} := \text{carga}_{\text{viento}}(22) \cdot (1.2 \cdot \sin(\alpha) - 0.4) = 518.802 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$\text{carga}_{\text{viento}}(22) = 897.4 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$q_{4f} := \text{carga}_{\text{viento}}(27) \cdot (1.2 \sin(\alpha) - 0.4) = 541.059 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$\text{carga}_{\text{viento}}(27) = 935.9 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

Cara posterior al viento de techo.

$$q_{1p} := \text{carga}_{\text{viento}}(12) \cdot (-0.4) = -310.24 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$q_{2p} := \text{carga}_{\text{viento}}(15) \cdot (-0.4) = -330.4 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$q_{3p} := \text{carga}_{\text{viento}}(22) \cdot (-0.4) = -358.96 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$q_{4p} := \text{carga}_{\text{viento}}(27) \cdot (-0.4) = -374.36 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

distribuida en los cuartos para lateral sobre la columna

$$\text{carga}_{\text{viento}}(12) = 775.6 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$q_{11} := \text{carga}_{\text{viento}}(12) \cdot 0.8 = 620.48 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$q_{21} := \text{carga}_{\text{viento}}(8) \cdot (0.8) = 552.533 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$\text{carga}_{\text{viento}}(8) = 690.667 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$q_{31} := \text{carga}_{\text{viento}}(4) \cdot 0.8 = 392 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$\text{carga}_{\text{viento}}(4) = 490 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$q_{41} := \text{carga}_{\text{viento}}(0) \cdot (0.8) = 392 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

$$\text{carga}_{\text{viento}}(0) = 490 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kgf}$$

Cara posterior al viento lado.

$$q_{1pl} := \text{carga viento } (12) \cdot 0.8(-0.4) = -248.192 \frac{1}{m} \cdot \text{kgf}$$

$$q_{2pl} := \text{carga viento } (8) \cdot (-0.4) = -276.267 \frac{1}{m} \cdot \text{kgf}$$

$$q_{3pl} := \text{carga viento } (4) \cdot (-0.4) = -196 \frac{1}{m} \cdot \text{kgf}$$

$$q_{4pl} := \text{carga viento } (0) \cdot (-0.4) = -196 \frac{1}{m} \cdot \text{kgf}$$

b) Estructura Mixta

c) Domo Acero

Tanto para la estructura mixta Acero-Hormigón se utilizan las mismas cargas de diseño teniendo en cuenta la geometría de cada una de ellas.

ANEXO B: Análisis de precios unitarios.

a) Hormigón para estructuras.

Actividad	Tipo de maquinaria	'Valor unitario		'Rendimiento unitario		'Costo unitario	
	Vibrador Inmersión	80.000	\$/mes	175,00	m3/mes	457	\$/m3
Subtotal						457	\$/m3

Actividad	'Mano de obra	'Valor unitario		'Rendimiento unitario		'Costo unitario	
Coloc.	Maestro (1)	18.000	\$/día	2,00	m3/día	9.000	\$/m3
	Jornal (4)	10.000	\$/día	0,50	m3/día	20.000	\$/m3
Subtotal						29.000	\$/m3

Actividad	'Materiales	'Valor unitario		'Rendimiento unitario		'Costo unitario	
	Hormigón Moldaje y otros Varios	60.000	\$/m3	1,00	m3/m3	60.000	\$/m3
						10.000	\$/m3
						2.000	\$/m3
Subtotal						72.000	\$/m3

Total costo directo	101.457	\$/m3
50,00% Gastos generales y utilidad	50.729	\$/m3
Neto	152.186	\$/m3