

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO, CHILE



VERIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE UN
GALPÓN QUE SOPORTA UN PUENTE GRÚA
BAJO CONDICIONES DE CARGAS
OPERACIONALES, ACELERACIONES Y
CARGAS SÍSMICAS

ABEL ANDRÉS EDUARDO DURÁN FLORES

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR. ING. DANILO ESTAY BARRIENTOS
PROFESOR CORREFERENTE: ING. NELSON ALVAREZ CAMPILAY

ABRIL 2018

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Juan y Claudina, por su apoyo constante e incondicional, por su paciencia y empatía durante el proceso universitario. Sin ustedes no podría ser quien soy ahora.

A mi hermana y mis sobrinos por su apoyo y preocupación durante toda la carrera.

A Carolina, mi princesa, mi vida, mi todo. Sin ti nada de esto sería posible. Gracias por todo el amor, apoyo y ánimo que me brindas siempre. Y a Lola, su hermana, y sus padres Jorge y Mónica, por su constante apoyo y preocupación durante el desarrollo de esta memoria.

A Gerardo (Chadud) y Aldo, mis grandes amigos y compañeros de estudios durante toda la carrera. Gracias por su amistad y paciencia

A Danilo, mi profesor guía y colega, por su apoyo y ayuda constante. Gracias por otorgarme un espacio donde poder trabajar y un “grato ambiente laboral”.

A Nelson, mi profesor correferente, por permitirme trabajar en esta memoria y por el apoyo que me brindó cuando lo requerí.

A Jaime, por la ayuda que siempre me brindas y por el “poema inspirador” que me alentó a terminar esta memoria “¿y las PPTs?”. Y a Jorge y Álvaro, colegas de oficina, por los buenos momentos.

A Germain (Janito), por tu amistad y apoyo incondicional.

Finalmente agradecer a la Dani y a Ignacio, Juanito, Juanfra, Gianpa, León, Feña, Guti y Panchito por su amistad y por los buenos momentos vividos.

DEDICATORIA

*“A Carolina, el amor de mi vida,
mi compañera y mi apoyo fundamental.
Gracias por todo el amor que me entregas día a día.”*

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo verificar estructuralmente un galpón industrial para el funcionamiento de dos puentes grúa de 5 y 10 toneladas de capacidad bajo las condiciones establecidas por la normativa atingente. Para esto, primero se determinaron las condiciones de operación y servicio para seleccionar entre los tipos de puentes grúa que existen en el mercado el más adecuado a los requerimientos de la empresa. Luego se identificaron las normativas que se aplican en el diseño del galpón para determinar las fuerzas y combinaciones de cargas que se deben tener en cuenta para la verificación estructural.

Del análisis al modelo del galpón industrial realizado mediante el software Robot Structural Analysis Professional se obtuvo que hay componentes del galpón que no resisten las combinaciones de cargas, por lo cual se realizó un rediseño de estos hasta cumplir con los requerimientos y permitir la instalación de los puentes grúas.

Adicionalmente se investigó el método de recertificación de puentes grúa para evaluar si es aplicable a todo tipo de instalaciones industriales y para establecer recomendaciones a la empresa cuando se requiera aplicar este método a los puentes grúa.

ABSTRACT

The objective of this work is to verify the structure of an industrial shed with the established loads by the local regulation to install two overhead bridge cranes with a nominal capacity of 5 and 10 tons each. For this purpose, the first step was to identify and classify the cranes (on the current market) to select a suitable one according to the requirements of the Company. Then, the second step was to identify the regulations that applies on the shed design to establish the loads and its combinations to consider in the structural verification. Finally, the industrial shed design was perform using the Robot Structural Analysis Professional software where the loads and combinations of loads are evaluated in order to complete the structural verification of the shed.

The analysis of the simulation allows to identify the shed components which are not able to resist the loads combinations. Therefore, a new design is proposed to achieve the requirements of the Company and to allow the cranes installation.

In addition, the certification method for cranes was investigated to evaluate if it can be applied on any kind of industrials facilities and to establish recommendations for the Company when the use of this method is required.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Desarrollo del problema.....	1
1.2	Objetivo general	3
1.3	Objetivos específicos	3
2	PUENTE GRÚA: CONCEPTOS PRELIMINARES	4
2.1	Antecedentes históricos del puente grúa	4
2.2	Descripción de un puente grúa	6
2.2.1	Partes y componentes de un puente grúa	7
2.3	Clasificación puente grúa	9
2.3.1	Número de vigas principales	9
2.3.2	Tipo de estructura.....	10
2.3.3	Tipo de energización	15
2.3.4	Tipo de servicio	15
2.3.5	Tipo de mando.....	20
3	CERTIFICACIÓN DE PUENTE GRÚA	21
3.1	Norma ASME B30.2	22
3.2	Inspección de un puente grúa según norma ASME B30.2.....	22
3.2.1	Inspección inicial	22
3.2.2	Inspección en servicio regular	23
3.2.3	Inspección de puentes grúa en servicio irregular	25
3.2.4	Inspección de cables de puentes grúa.....	25
3.3	Mantenimiento preventivo de un puente grúa según norma ASME B30.2	27
3.3.1	Mantenimiento y reemplazo de cables	28
3.4	Inspección inicial de puente grúa según fabricante ABUS Grúas	30
3.5	Inspección periódica de puente grúa según fabricante ABUS Grúas	31
3.5.1	Verificación del gancho de carga del polipasto de cable	33
3.5.2	Verificación del cable del polipasto	35
3.6	Mantenimiento puente grúa según fabricante ABUS Grúas	37

3.6.1	Medidas de seguridad.....	37
3.6.2	Plan de verificaciones y mantenimiento de ABUS Grúas	37
3.6.3	Lubricación	39
3.7	Pruebas de un puente grúa según norma ASME B30.2	40
3.7.1	Pruebas operativas.....	40
3.7.2	Pruebas de carga.....	40
3.8	Procesos de inspección: Evaluación No Destructiva (END)	42
3.8.1	Inspección visual	44
3.8.2	Tintas penetrantes.....	45
3.8.3	Ultrasonido.....	48
3.8.4	Partículas magnéticas	51
3.8.5	Radiología	54
4	MÉTODOS DE DISEÑO	56
4.1	Allowable Stress Design (ASD)	56
4.1.1	Ventajas y desventajas ASD	57
4.2	Load and Resistance Factor Design (LRFD)	58
4.2.1	Ventajas y desventajas LRFD	59
4.3	AISC 360-2010: Specification for structural steel buildings	60
4.3.1	Diseño de miembros en tracción	60
4.3.2	Diseño de miembros en compresión	61
4.3.3	Diseño de miembros en flexión.....	62
4.3.4	Diseño de miembros en corte.....	65
4.3.5	Diseño de miembros en torsión.....	66
4.3.6	Diseño de miembros para requerimientos combinadas.....	67
4.3.7	Criterio de verificación	68
5	NORMAS APLICABLES AL DISEÑO DE UN GALPÓN INDUSTRIAL.....	69
5.1	Norma Chilena 3171 - 2010.....	69
5.1.1	Combinaciones de cargas.....	70

5.1.2	Carga permanente <i>D</i>	71
5.1.3	Carga sísmica <i>E</i>	71
5.1.4	Carga de uso o cargas vivas <i>L</i>	71
5.1.5	Carga de uso de techo <i>Lr</i>	72
5.1.6	Carga de lluvia <i>R</i>	72
5.1.7	Carga de nieve <i>S</i>	72
5.1.8	Carga de viento <i>W</i>	72
5.2	Norma Chilena 431 - 2010.....	73
5.3	Norma Chilena 432 - 2010.....	74
5.4	Norma Chilena 1537-2009.....	75
5.4.1	Carga máxima de rueda.....	75
5.4.2	Fuerza de impacto vertical.....	75
5.4.3	Fuerza lateral.....	75
5.4.4	Fuerza longitudinal.....	75
5.5	Norma Chilena 2369-2003.....	76
5.5.1	Sobrecargas de uso (SC).....	78
5.5.2	Sobrecargas especiales de operación (SO).....	78
5.5.3	Sobrecargas accidentales de operación (SA).....	79
6	BASES GENERALES DE CÁLCULO.....	80
6.1	Consideraciones generales.....	81
6.1.1	Cargas permanentes.....	82
6.1.2	Cargas de operación e impacto.....	84
6.1.3	Cargas de nieve.....	87
6.1.4	Cargas de viento.....	93
6.1.5	Cargas sísmicas.....	96
6.1.6	Carga de uso.....	100
6.1.7	Carga de uso de techo.....	100
6.2	Combinaciones de cargas.....	101
7	RESULTADOS.....	103

7.1	Recomendaciones iniciales	103
7.2	Columna principal	106
7.3	Cercha frontal.....	110
7.4	Arriostramiento inferior	114
7.5	Costanera lateral.....	118
7.6	Otros elementos.....	122
7.7	Deformaciones	123
7.7.1	Sísmicas	123
7.7.2	Viento.....	125
7.8	Recomendaciones.....	126
8	CONCLUSIONES.....	127
9	BIBLIOGRAFÍA.....	130
	ANEXOS	131
	A NUMERACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL MODELO.....	132
	B COTIZACIÓN INAMAR.....	149
	C COMBINACIONES DE CARGA	152
	D MAPA DE RESULTADOS	154

Índice de Figuras

Figura 2.1. Reconstrucción de una grúa de rueda denominada Polyspaston, Alemania.	4
Figura 2.2. Puente grúa motorizado a vapor de 1875, producido por Stuckenholtz AG, Alemania.	5
Figura 2.3. Puente grúa rotatorio de una fundición, 1880.	5
Figura 2.4. Partes y componentes principales de una grúa monorraíl. Fuente: ABUS Grúas.	7
Figura 2.5. Partes y componentes de un Polipasto de cable tipo E. Fuente: ABUS Grúas.	7
Figura 2.6. Partes y componentes de un puente grúa. Fuente: ABUS Grúas.	8
Figura 2.7. Puente grúa monorraíl. Fuente: ABUS Grúas	9
Figura 2.8. Puente grúa birraíl. Fuente: ABUS Grúas	10
Figura 2.9. Puente grúa suspendido. Fuente: ABUS Grúas	11
Figura 2.10. Puente Grúa Pórtico.	12
Figura 2.11. Grúa pórtico voladizo.	13
Figura 2.12. Grúa de Pared. Fuente: ABUS Grúas.	14
Figura 3.1. Dimensiones por medir en un gancho de carga del polipasto de cable. Fuente: ABUS Grúas	33
Figura 3.2. Inspección de cables. La estructura del cable se ha abierto. Fuente: ABUS Grúas.	35
Figura 3.3. Inspección de cables. Se han formados bucles en el cable. Fuente: ABUS Grúas.	35
Figura 3.4. Inspección de cables. El cable se ha doblado como consecuencia de una fuerza externa violenta. Fuente: ABUS Grúas.	35
Figura 3.5. Inspección de cables. El cable se ha aplanado. Fuente: ABUS Grúas.	35
Figura 3.6. Inspección de cables. En el cable se ha formado una cesta como consecuencia de una torsión o giro violento. Fuente: ABUS Grúas.	36
Figura 3.7. Inspección de cables. El cable se ha deformado. Fuente: ABUS Grúas.	36

Figura 3.8. Inspección de cables. Varios alambres rotos debido al desgaste normal de cable. Esto se produce cuando el cable se flexiona en las poleas bajo carga. Fuente: ABUS Grúas.	36
Figura 3.9. Inspección de cables. Alambre roto saliente. Fuente: ABUS Grúas.	36
Figura 3.10. Esquema del método de tintas penetrantes: a) aplicación del líquido penetrante en la superficie limpia b) tiempo de espera requerido para que el líquido penetre en la grieta c) eliminación del exceso de líquido penetrante d) aplicación del líquido revelador en la superficie e) observación e interpretación del resultado. Fuente: Iddings, Frank A. y Shull, Peter J. Liquid Penetrant.	46
Figura 3.11. Método Pulse-Echo. La onda ultrasónica se emite y recibe por el mismo transductor. Fuente: Shull, Peter J. y Tittmann, Bernard R. Ultrasound.....	49
Figura 3.12. Método Pitch-Catch. La onda ultrasónica se emite y recibe en transductores diferentes. Fuente: Shull, Peter J. y Tittmann, Bernard R. Ultrasound.	49
Figura 3.13. Izquierda: Grieta superficial detectada con partículas magnéticas. Derecha: Defecto subsuperficial detectado con partículas magnéticas. Fuente: Lindgren, Arthur y Shull, Peter J. Magnetic Particle.	52
Figura 4.1. Factor de longitud efectiva. Fuente: American Institute of Steel Construction. AISC 360-2010.....	62
Figura 4.2. Curva de momento resistente nominal. Fuente: Gerdau Corsa. Miembros en Flexión-Trabes y Vigas.	63
Figura 6.1. Modelación estructural en vista 3D. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk	80
Figura 6.2. Modelación estructural en vista frontal. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk	80
Figura 6.3. Caso más desfavorable para cálculo de fuerzas de impacto. Fuente: Elaboración Propia	84
Figura 6.4.Carga de rueda sobre la viga testera. R_1 representa el lado más cargado. Fuente: Elaboración propia.	85
Figura 6.5. Determinación del Factor de Pendiente C_s para techos con $C_t \leq 1.0$. Fuente: Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena 431-2010.	88

Figura 6.6. Carga de nieve balanceada. Fuente: Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena 431-2010.	89
Figura 6.7. Carga de nieve desbalanceada. Fuente: Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena 431-2010.	90
Figura 6.8. Valores de las cargas de nieve desbalanceadas para cerchas del centro. Valores en [kN/m]. Fuente: Elaboración propia.	91
Figura 6.9. Valores de las cargas de nieve desbalanceadas para las cerchas de los extremos. Valores en [kN/m]. Fuente: Elaboración propia.	91
Figura 6.10. Cargas de nieve balanceadas en la estructura modelada en Robot Structural Analysis Professional. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.	91
Figura 6.11. Cargas de nieve desbalanceadas en la estructura modelada en Robot Structural Analysis Professional. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.	92
Figura 6.12. Simulación de viento con incidencia frontal vista a barlovento. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.	94
Figura 6.13. Simulación de viento con incidencia frontal vista a sotavento. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.	94
Figura 6.14. Simulación de viento con incidencia lateral vista a barlovento. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.	95
Figura 6.15. Simulación de viento con incidencia lateral vista a sotavento. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.	95
Figura 6.16. Carga sísmica estática sin nieve distribuida en la estructura. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.	99
Figura 6.17. Carga sísmica estática con nieve distribuida en la estructura. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.	99
Figura 7.1. Elementos más solicitados de la estructura. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.	103
Figura 7.2. Vista 3D de la columna 10 (en verde). Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.	106

Figura 7.3. Vista 3D de la viga 38 (en verde). Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.	110
Figura 7.4. Vista 3D de la viga 427 (en verde). Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.	114
Figura 7.5. Vista 3D de la viga 503 (en verde). Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.	118
Figura 7.6. Deformación máxima de la estructura en casos de carga sísmicos Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	124
Figura A.1. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 1 y 8. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	133
Figura A.2. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 8 y 15. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	134
Figura A.3. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 2 y 9. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	135
Figura A.4. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 9 y 16. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	136
Figura A.5. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 3 y 10. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	137
Figura A.6. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 10 y 17. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	138
Figura A.7. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 4 y 11. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	139
Figura A.8. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 11 y 18. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	140
Figura A.9. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 5 y 12. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	141
Figura A.10. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 12 y 19. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	142
Figura A.11. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 6 y 13. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	143

Figura A.12. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 13 y 20. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	144
Figura A.13. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 7 y 14. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	145
Figura A.14. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 14 y 21. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	146
Figura A.15. Vista lateral del galpón industrial. Columnas 1 a 7. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	147
Figura A.16. Vista central del galpón industrial. Columnas 8 a 14. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	147
Figura A.17. Vista lateral del galpón industrial. Columnas 15 a 21. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	148
Figura B.1. Cotización de INAMAR Ltda. para puente grúa de 5 toneladas.	150
Figura B.2. Cotización de INAMAR Ltda. para puente grúa de 10 toneladas.	151
Figura D.1. Mapa de resultados de los elementos del galpón industrial. Ratio máximo obtenido 1.20 (en rojo). Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk	155
Figura D.2. Mapa de resultados de los elementos del galpón industrial. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	156
Figura D.3. Mapa de resultados de los elementos del galpón industrial luego de aplicar las recomendaciones. Ratio máximo obtenido 0.98 (en rojo). Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.....	157
Figura D.4. Mapa de resultados de los elementos del galpón industrial luego de aplicar las recomendaciones. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk	158

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Resumen de la clasificación de servicio de la CMAA-70 en función de los ciclos de carga y el % de carga a levantar. Fuente: Crane Manufacturers Association of America. Specification N°70	17
Tabla 2.2. Resumen de la clasificación de servicio de la CMAA-74 en función de los ciclos de carga y el % de carga a levantar. Fuente: Crane Manufacturers Association of America. Specification N°74	19
Tabla 3.1. Tabla de comparación de dimensiones ‘e’, ‘f’ e ‘y’ del gancho de carga de un polipasto de cable. Fuente: ABUS Grúas.....	34
Tabla 3.2 Comprobación de componentes de puente grúa y polipasto de cable y su periodicidad de comprobación. Fuente: ABUS Grúas.....	38
Tabla 3.3 Comprobación de funcionamiento de puente grúa y polipasto de cable y su periodicidad de comprobación. Fuente: ABUS Grúas.....	39
Tabla 3.4. Ventajas y desventajas del método de tintas penetrantes. Fuente: Iddings, Frank A. y Shull, Peter J. Liquid Penetrant.....	47
Tabla 3.5. Ventajas y desventajas del método de ultrasonido. Fuente: Shull, Peter J. y Tittmann, Bernard R. Ultrasound.....	50
Tabla 3.6. Ventajas y desventajas del método de partículas magnéticas. Fuente: Lindgren, Arthur y Shull, Peter J. Magnetic Particle.....	53
Tabla 3.7. Ventajas y desventajas del método de radiología. Fuente: Martz, Harry E., Logan, Clinton M. y Shull, Peter J. Radiology.	55
Tabla 4.1. Ventajas y desventajas del método ASD. Fuente: Elaboración propia.....	57
Tabla 4.2. Ventajas y desventajas método LRFD. Fuente: Elaboración propia.	59
Tabla 4.3. Extracto de la Tabla F1.1 de la norma AISC 360-2010. Fuente: American Institute of Steel Construction. AISC 360-2010.	64
Tabla 5.1. Combinaciones de carga para la metodología ASD y LRFD. Fuente: Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena 3171-2010.....	70
Tabla 6.1. Cubicación de la estructura de acero luego del rediseño. Fuente: Elaboración propia.	83

Tabla 6.2. Cubicación de los revestimientos laterales y de techo. Fuente: Elaboración propia.....	83
Tabla 6.3. Pesos de la grúa, viga testera, tecla y carga máxima de levante para puentes grúa de 5 y 10 toneladas de capacidad de levante. Fuente: Cotización INAMAR.	84
Tabla 6.4. Cargas de rueda para el lado más y menos cargado para ambos puentes grúa. Fuente: Elaboración propia.	84
Tabla 6.5. Fuerza longitudinal, lateral y de impacto vertical por rueda para ambos puentes grúa. Fuente: Elaboración propia.	85
Tabla 6.6. Distribución de las fuerzas longitudinales, laterales y de impacto vertical sobre las columnas de la estructura. Fuente: Elaboración propia.	86
Tabla 7.1. Resultados para los elementos más solicitados de la estructura rediseñada. Fuente: Elaboración propia.	104
Tabla 7.2. Características del material utilizado en la columna 10. Fuente: Elaboración propia.	105
Tabla 7.3. Valores de los coeficientes de reducción de resistencia según el método LRFD. Fuente: Elaboración propia.	105
Tabla 7.4. Características principales de la sección transversal para la columna 10. Fuente: Elaboración propia.	107
Tabla 7.5. Fuerzas y momentos actuantes en la columna 10 para el caso de carga más desfavorable en el punto de verificación. Fuente: Elaboración propia.	107
Tabla 7.6. Resistencias nominales de la columna 10 calculadas de acuerdo con los criterios de la norma AISC 360-2010. Fuente: Elaboración propia.	108
Tabla 7.7. Verificación de la columna 10 para el caso de carga más desfavorable. Fuente: Elaboración propia.	109
Tabla 7.8. Características principales de la sección transversal para la viga 38. Fuente: Elaboración propia.	111
Tabla 7.9. Fuerzas y momentos actuantes en la viga 38 para el caso de carga más desfavorable en el punto de verificación. Fuente: Elaboración propia.	111
Tabla 7.10. Fuerzas y momentos que es capaz de resistir la viga 38. Fuente: Elaboración propia.	112

Tabla 7.11. Verificación de la viga 38 para el caso de carga más desfavorable. Fuente: Elaboración propia.	113
Tabla 7.12. Características principales de la sección transversal de la viga 427. Fuente: Elaboración propia.	115
Tabla 7.13. Fuerzas y momentos actuantes en la viga 427 para el caso de carga más desfavorable en el punto de verificación. Fuente: Elaboración propia.	115
Tabla 7.14. Fuerzas y momentos que es capaz de resistir la viga 427. Fuente: Elaboración propia.	116
Tabla 7.15. Verificación de la viga 427 para el caso de carga más desfavorable. Fuente: Elaboración propia.	117
Tabla 7.16. Características principales de la sección transversal para la viga 503. Fuente: Elaboración propia.	119
Tabla 7.17. Fuerzas y momentos actuantes en la viga 503 para el caso de carga más desfavorable. Fuente: Elaboración propia.	119
Tabla 7.18. Fuerzas, momentos y esfuerzos que es capaz de resistir la viga 503 se sección transversal IPE 140. Fuente: Elaboración propia.	120
Tabla 7.19. Verificación de la viga 503 para el caso de carga más desfavorable. Fuente: Elaboración propia.	121
Tabla C.1. Combinaciones de carga ingresadas para evaluar la estructura. Fuente: Elaboración Propia.	153

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Desarrollo del problema

La industria actual requiere de un sistema que permita mover equipos o cargas pesadas, ya sea para realizar trabajos en diferentes sectores de una empresa o para el mantenimiento de grandes equipos. El sistema que se usa comúnmente es un puente grúa, el cual permite levantar los equipos y/o moverlos según sea necesario. Este sistema se diseña de acuerdo con los requerimientos de la industria, como la capacidad máxima de levante o la cantidad de veces que se requiere levantar la carga, y generalmente, se encuentra unido a la estructura de la nave industrial.

Debido a la inversión que se debe realizar para implementar un puente grúa, este debe ser diseñado considerando las cargas de operación actuales, y debe tener en cuenta, además, las cargas operacionales futuras.

Las principales causas de falla que se producen en un puente grúa son: [1]

- Defectos de diseño o construcción: Falta de resistencia en las vigas soportantes de rieles.
- Aumento de cargas: Considerando que el puente grúa es diseñado para resistir cargas mayores a las nominales, es posible que en la industria se decida usar cargas mayores, lo que genera un aumento de los esfuerzos de trabajo sobre toda la estructura y acelera el desgaste de los componentes y/o la estructura.
- Desgaste mecánico: Se espera que con el tiempo se produzcan desgastes en los componentes mecánicos del puente grúa, lo cual puede producir un aumento en los esfuerzos de trabajo y desencadenar una falla.
- Fallas en el mantenimiento: Cuando no se realiza un mantenimiento adecuado según lo establecido por el fabricante, se produce un desgaste más rápido de los componentes mecánicos y de la estructura, lo cual disminuye la vida útil del

equipo. Además, se puede producir un aumento de las cargas debido a fuerzas de impacto o frenados bruscos.

El puente grúa se encuentra elevado por sobre los trabajadores y la maquinaria, por lo que una falla estructural en el galpón implica un riesgo para la seguridad y la vida de los trabajadores. Debido a esto es que existen empresas a nivel nacional cuyo rubro es la recertificación de equipos de izaje, con lo cual pretenden verificar si estos siguen siendo aptos para realizar las tareas para las que fueron diseñados. Sin embargo, el proceso mediante el cual se realiza la recertificación no es de conocimiento público y no se puede determinar si realmente permite acreditar que la estructura pueda seguir en funcionamiento. Estas empresas justifican la recertificación de los equipos de izaje en el Código del Trabajo, específicamente en el *Libro II: De la Protección a los Trabajadores*, en el artículo N°184, donde se establece: [2]

“El empleador estará obligado a tomar todas las medidas necesarias para proteger eficazmente la vida y salud de los trabajadores, informando de los posibles riesgos y manteniendo las condiciones adecuadas de higiene y seguridad en las faenas, como también los implementos necesarios para prevenir accidentes y enfermedades profesionales”

Con esto, ante la posibilidad de accidentes, la responsabilidad civil y penal recae sobre el empleador.

En una empresa de la comuna de Colina, se pretende realizar la implementación de dos puentes grúa de 5 y 10 toneladas de capacidad máxima cada uno, ubicados en naves industriales en paralelo.

Debido a la falta de información por parte de la empresa se desconoce si la estructura es capaz de soportar la instalación de ambos puentes grúa, por lo cual se solicitó realizar

la verificación estructural del galpón industrial, identificar puntos críticos y establecer recomendaciones para estos. Por tanto, se proponen los siguientes objetivos de trabajo:

1.2 Objetivo general

Verificar estructuralmente un galpón que soporta un puente grúa bajo condiciones de cargas operacionales, aceleraciones y cargas sísmicas.

1.3 Objetivos específicos

- Identificar y clasificar los tipos de puente grúa que existen en el mercado.
- Investigar los métodos de certificación de puentes grúa y comprobar su aplicabilidad.
- Analizar las normativas que rigen el diseño de la estructura soportante, a nivel nacional e internacional, y verificar su aplicabilidad.
- Analizar el modelo de la estructura soportante del puente grúa, identificando las zonas críticas y estableciendo recomendaciones para estas.

2 PUENTE GRÚA: CONCEPTOS PRELIMINARES

2.1 Antecedentes históricos del puente grúa

A través de la historia, el ser humano se ha visto en la necesidad de crear elementos que le permitan trabajar y vivir de forma más cómoda. Esto lo ha llevado a desarrollar una gran cantidad de herramientas, equipos y maquinarias que se adecuen a sus requerimientos.

Desde la antigüedad se han utilizado diferentes tipos de grúas. Una de las primeras aparece en la antigua Grecia, alrededor del siglo VI. Esta era accionada por hombres o animales y utilizada principalmente para labores de construcción.

Posteriormente los romanos adaptaron y mejoraron la grúa griega con una grúa de rueda que permitía elevar 3 toneladas.

En la Figura 2.1, se muestra una reconstrucción de la grúa de rueda Polyspaston del Imperio Romano:



Figura 2.1. Reconstrucción de una grúa de rueda denominada Polyspaston, Alemania.

En la revolución industrial se comenzaron a usar máquinas de vapor para realizar el trabajo de elevación de cargas, montadas sobre estructuras de acero. En la Figura 2.2 y Figura 2.3 se muestran ejemplos de los mecanismos de elevación utilizados durante el siglo XIX:



Figura 2.2. Puente grúa motorizado a vapor de 1875, producido por Stuckenholtz AG, Alemania.

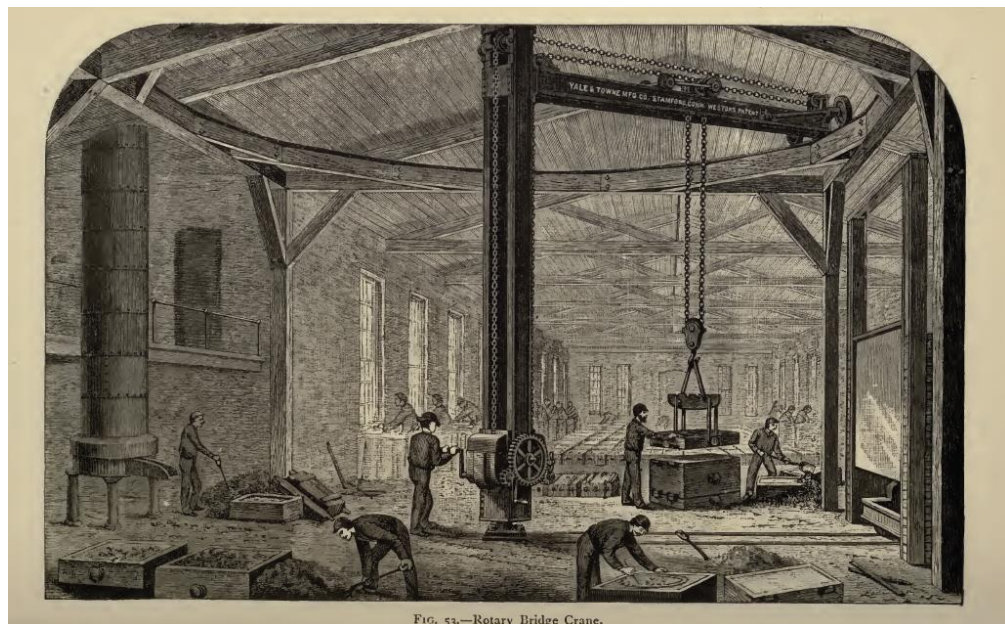


Figura 2.3. Puente grúa rotatorio de una fundición, 1880.

La optimización del diseño de un puente grúa ha dado origen a un mecanismo electromecánico capaz de levantar y trasladar grandes cargas mediante un gancho suspendido de la viga principal.

El uso de un puente grúa es valorado en la industria ya que permite realizar labores de mantenimiento de equipos pesados y de levantar y desplazar cargas pesadas.

2.2 Descripción de un puente grúa

De manera previa a la descripción de un puente grúa, se define una grúa como una máquina de funcionamiento discontinuo destinada a elevar y distribuir las cargas suspendidas de un gancho [3]. Mientras que en la norma ASME B30.2 se define una grúa como una máquina para elevar y descender una carga y moverla horizontalmente, con el mecanismo de elevación como parte integral de la máquina, que está compuesto por una o más vigas, un carro de traslación, vigas testeras y mecanismos de manejo. [4]

En la NTP 736 se define un puente grúa como una máquina que consta de un elemento portador formado por una o dos vigas móviles, apoyadas o suspendidas, sobre las que se desplaza el carro con los mecanismos elevadores. [3]

El transporte de materiales en el proceso de fabricación es el principal campo de aplicaciones del puente grúa en la industria. El puente grúa se encuentra instalado sobre vías elevadas, dejando libre la superficie a nivel de suelo. Debido a la movilidad del puente de la grúa y del carro, el campo abarcado es un rectángulo, cuya superficie, en un caso ideal, coincide con la planta del galpón industrial. [5]

2.2.1 Partes y componentes de un puente grúa

En la Figura 2.4 se muestran partes y componentes principales de un puente grúa monorraíl:

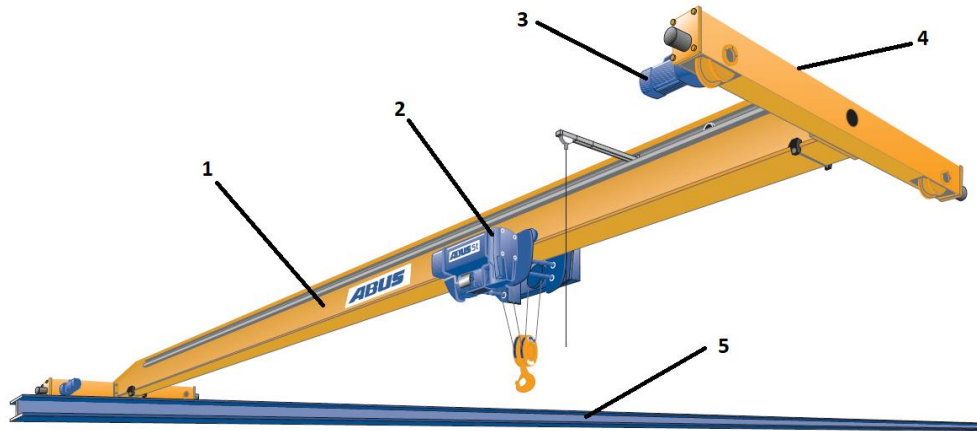


Figura 2.4. Partes y componentes principales de una grúa monorraíl. Fuente: ABUS Grúas.

1. Viga principal
2. Carro con polipasto de cable o de cadena
3. Accionamiento de traslación de la grúa
4. Viga testera
5. Vía de la grúa o viga carrilera

En la Figura 2.5 se muestra un polipasto de cable tipo E de ABUS Grúas, con sus partes y componentes:



Figura 2.5. Partes y componentes de un Polipasto de cable tipo E. Fuente: ABUS Grúas.

1. Engranaje de elevación
2. Bastidor del carro
3. Mecanismo de traslación del carro
4. Motor del carro
5. Trócola y gancho
6. Motor de elevación

En la Figura 2.6 se muestran las partes y componentes de un puente grúa birraíl:

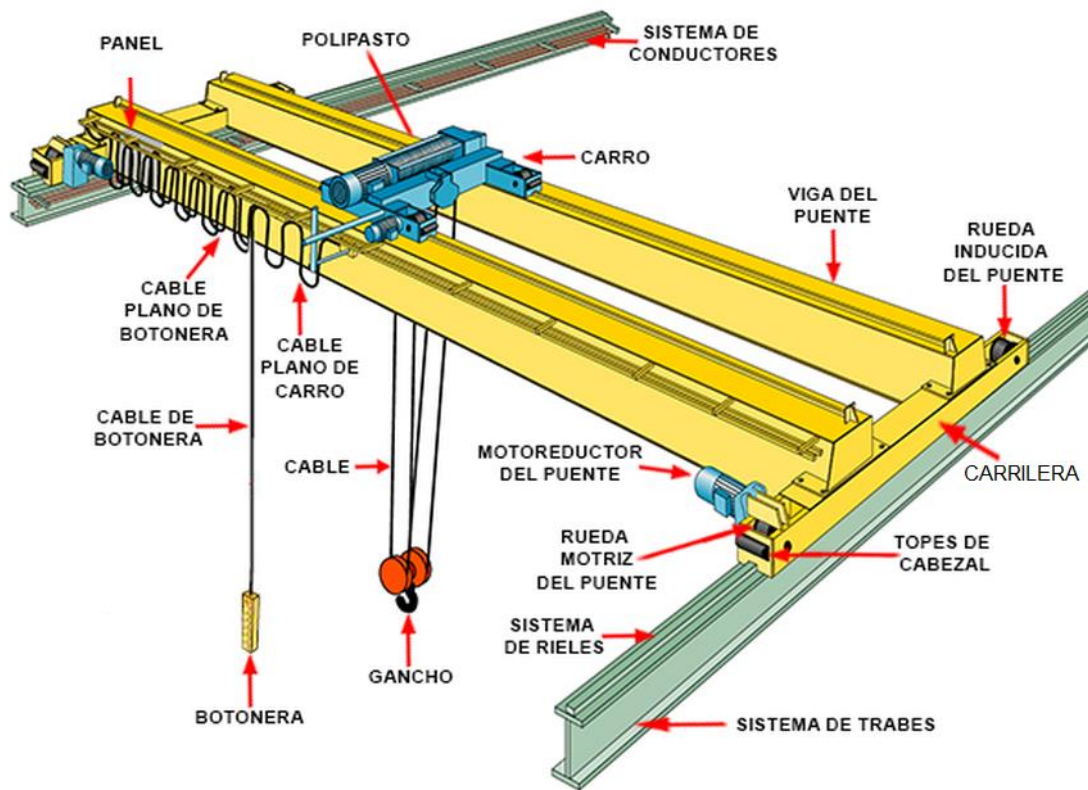


Figura 2.6. Partes y componentes de un puente grúa. Fuente: ABUS Grúas.

Además, se debe tener en cuenta el término de carga nominal, que se define como:

“la carga máxima designada por el fabricante para la cual una grúa o polipasto individual es diseñada y construida” [4]

2.3 Clasificación puente grúa

Los puentes grúa que se encuentran en el mercado pueden ser clasificados según la cantidad de vigas principales, el tipo de servicio para el que se requieren, el tipo de estructura que lo soporta, el tipo de energización y el tipo de mando. A continuación, se muestra de manera detallada las clasificaciones de estos:

2.3.1 Número de vigas principales

2.3.1.1 Puente grúa monorraíl

La característica principal de este puente grúa es que está construido por solo una viga principal, como se muestra en la Figura 2.7.

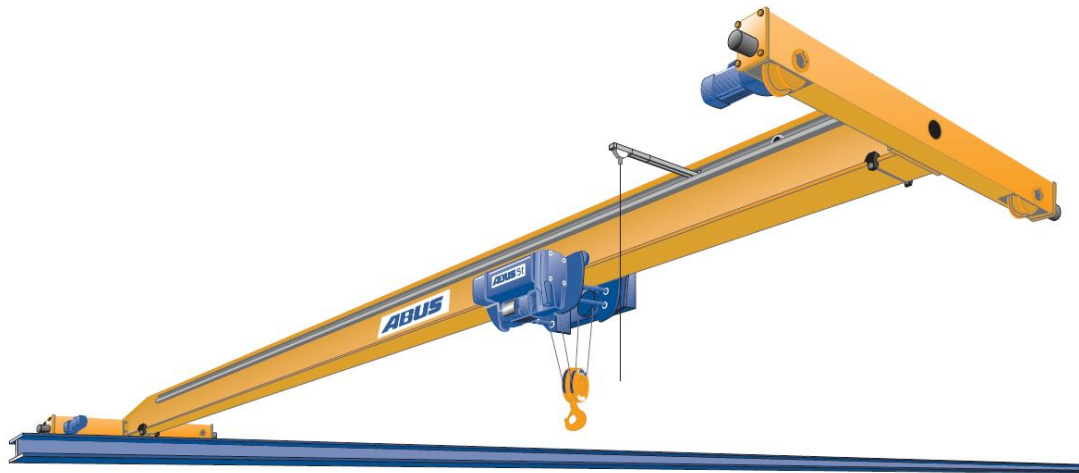


Figura 2.7. Puente grúa monorraíl. Fuente: ABUS Grúas

Los fabricantes de puentes grúa, como ABUS Grúas o TAEP Grúas establecen que:

“Este puente grúa se ha convertido en la mejor opción para empresas que precisan de un mecanismo que permita elevar cargas pequeñas y luz pequeña a media, debido a su excelente relación carga/precio”. [6]

“Este puente grúa es ideal para solucionar el transporte de materiales con una capacidad de carga de hasta 16 toneladas y luces de hasta 39 metros, incluso en naves de techo bajo”. [7]

2.3.1.2 Puente grúa birraíl

La característica principal de este puente grúa es que está construido por doble viga, como se muestra en la Figura 2.8.

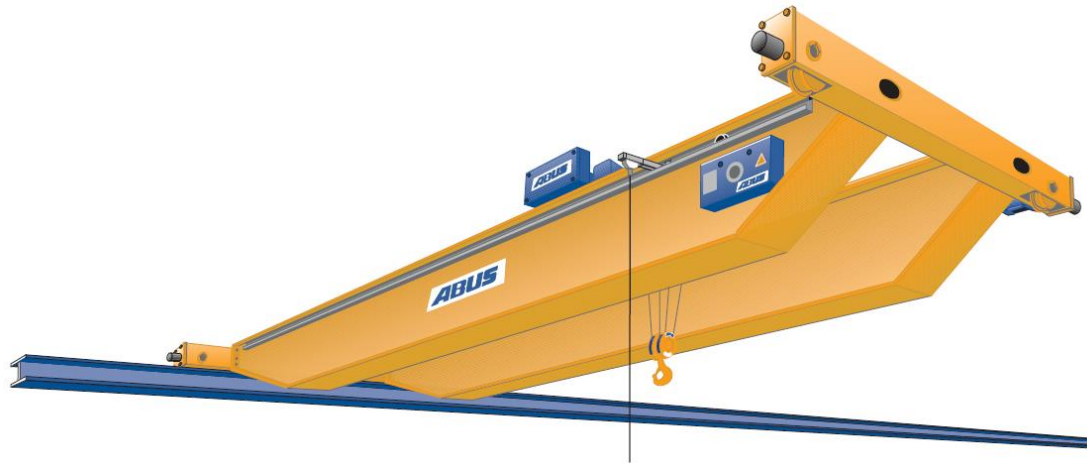


Figura 2.8. Puente grúa birraíl. Fuente: ABUS Grúas

Para este tipo de grúa, los fabricantes ABUS Grúas o TAEP Grúas establecen que:

“Con este tipo de puente grúa es posible alcanzar una mayor capacidad de carga y de luz”. [6]

“Este tipo de puente grúa es ideal para el transporte de cargas de hasta 120 toneladas y luces de hasta 40 metros. Se recomienda utilizar este tipo de puente grúa cuando se deben transportar materiales largos, ya que se logra un posicionamiento estable”. [7]

2.3.2 Tipo de estructura

La clasificación respecto al tipo de estructura se basa en el tipo de soportes que sostienen a la viga o las vigas principales del puente grúa, como se muestra a continuación:

2.3.2.1 Grúa suspendida

En este tipo de grúa, la viga principal se sostiene de manera suspendida de las vigas carrileras, como se muestra en la Figura 2.9.



Figura 2.9. Puente grúa suspendido. Fuente: ABUS Grúas

Los fabricantes de puentes grúa, como ABUS Grúas o TAEP Grúas destacan que:

“Este tipo de grúa es una buena solución cuando se requiere elevar pequeñas cargas en lugares donde se puede suspender las vigas carrileras directamente del techo, por lo que se ahorra al no necesitar de una estructura adicional”. [6]

“Este puente grúa es ideal cuando se tiene una nave industrial con estructura complicada, donde el montaje de la viga carril se realiza bajo el techo. Se recomienda el uso de este tipo de grúa para una carga máxima de levante de 8 toneladas y luz de hasta 25 metros”. [7]

2.3.2.2 Grúa elevada

En este tipo de grúa, la viga principal o las vigas principales están apoyadas por sobre las vigas carrileras, como se muestra en la Figura 2.7 y la Figura 2.8.

De acuerdo con la norma ASME B30.2, es una grúa con puente móvil de una o múltiples vigas, con un mecanismo de elevación fijo o móvil. El recorrido lo realiza mediante las vigas carrileras que se encuentran elevadas [4].

2.3.2.3 Grúa pórtico

Este tipo de grúa se caracteriza por encontrarse elevada y separada de la estructura. Posee su propia estructura móvil unida al puente grúa y se puede desplazar en la instalación mediante vigas carrileras apoyadas sobre rieles fijos en el piso, como se muestra en la Figura 2.10.



Figura 2.10. Puente Grúa Pórtico.

De acuerdo con la norma ASME B30.2, esta es una grúa similar a una grúa elevada, excepto que el puente que transporta el carro se sostiene rígidamente en dos o más columnas que pasan por rieles fijos u otra carrilera. [4]

2.3.2.4 Grúa semi-pórtico

Este tipo de grúa se caracteriza por encontrarse elevada y apoyada sólo en uno de los extremos a la estructura de la nave industrial, mientras que el otro extremo se encuentra unida a una estructura móvil, similar a una grúa pórtico.

De acuerdo con la norma ASME B30.2, es una grúa con un extremo del puente sostenido rígidamente en una o más columnas que corren por una carrilera o riel fijo y el otro extremo del puente es sostenido por un carro de traslación que viaja en una carrilera o riel elevado. [4]

2.3.2.5 Grúa pórtico voladizo

Este tipo de grúa es similar a una grúa pórtico, pero se caracteriza por la continuación en voladizo de la viga o las vigas principales, como se muestra en la Figura 2.11:



Figura 2.11. Grúa pórtico voladizo.

Según la Norma ASME B30.2, es una grúa pórtico o semi pórtico en la cual las vigas o armaduras del puente se extienden transversalmente por encima de la viga carrilera en uno o ambos lados. [4]

2.3.2.6 Grúa de pared

La característica de esta grúa es que la viga principal se encuentra en voladizo, apoyada en un extremo a la pared. El movimiento de traslación se produce mediante un sistema de rieles unidos a la pared, como se muestra en la Figura 2.12:



Figura 2.12. Grúa de Pared. Fuente: ABUS Grúas.

Según la norma ASME B30.2, es una grúa que tiene un armazón en voladizo, con o sin carro, y que se encuentra sostenida de una pared lateral o una línea de columnas de un edificio. [4]

El fabricante de puente grúa ABUS Grúas, especifica que:

“Esta grúa se recomienda para atender varios puestos de trabajo al mismo tiempo”. [7]

2.3.3 Tipo de energización

La clasificación de puentes grúa debido al tipo de energización considera dos casos:

2.3.3.1 Grúa manual

Este tipo de accionamiento requiere de la activación o intervención por parte del operario, tanto para elevar o descender la carga como para su transporte.

De acuerdo con la norma ASME B30.2, es una grúa cuyo mecanismo de elevación es manejado arrastrando una cadena interminable, y cuyo mecanismo de recorrido es manejado de la misma manera o moviendo manualmente la carga o gancho. [4]

2.3.3.2 Grúa energizada

Según la Norma ASME B30.2, es una grúa cuyos mecanismos de elevación y recorrido son manejados por medios eléctricos, neumáticos o hidráulicos. [4]

2.3.4 Tipo de servicio

La clasificación según el tipo de servicio se realiza según la cantidad de ciclos de levantamiento de la carga que se requieren por hora y del porcentaje de carga máxima nominal que se requiere levantar.

Para este tipo de clasificación se ha tomado en cuenta lo establecido por la Asociación de Fabricantes de Grúas de América (*CMAA por sus siglas en inglés*) y Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (*ASME por sus siglas en inglés*).

2.3.4.1 Crane Manufacturer's Association of America–70

A continuación, se muestra la clasificación para puentes grúa de doble viga principal realizada por la CMAA-70: [8]

2.3.4.1.1 Clase A (en espera o servicio infrecuente)

La clase A incluye grúas donde se requiere un manejo preciso del equipo a bajas velocidades, con largos periodos de reposo entre levantamientos de la carga.

Esta clase se recomienda para centrales eléctricas o salas de máquinas, servicios públicos, salas de turbinas, salas de motores y estaciones de transformadores. En general, se recomienda para instalaciones donde se requiere usar el puente grúa para mantenimiento poco frecuente o la instalación inicial de un equipo.

2.3.4.1.2 Clase B (servicio ligero)

La clase B incluye grúas donde se requiere levantar la carga máxima de manera ocasional, o levantamientos con menor carga de 2 a 5 veces por hora.

Esta clase se recomienda para talleres de reparación, edificios de servicios, pequeños almacenes o en operaciones de ensamblado ligero, donde los requisitos de servicio son ligeros y de baja velocidad.

2.3.4.1.3 Clase C (servicio moderado)

La clase C incluye grúas donde los requisitos de levantamiento de carga son en promedio un 50% de la carga máxima, con 5 a 10 levantamientos por hora.

Esta clase se recomienda para salas de máquinas o fábricas de celulosa.

2.3.4.1.4 Clase D (servicio pesado)

La clase D incluye grúas donde las cargas de levantamiento son cercanas al 50% de la carga máxima que serán levantadas constantemente con 10 a 20 levantamientos por hora y generalmente las velocidades de transporte de carga son elevadas.

Esta clase se recomienda para salas de maquinaria pesada, plantas de fabricación, fundiciones y almacenes de acero, depósitos de contenedores o madera, y en operaciones donde se requiere producción pesada.

2.3.4.1.5 Clase E (servicio intenso)

La clase E incluye grúas que levantan cargas cercanas a la carga máxima durante toda su vida útil, con más de 20 levantamientos por hora.

Esta clase se recomienda para depósitos de chatarra, fábricas de cemento, almacenes de madera, plantas de fertilizantes, manejo de contenedores.

2.3.4.1.6 Clase F (servicio intenso continuo)

La clase F incluye grúas capaces de manejar cargas cercanas a la carga máxima de manera continua bajo condiciones de servicio intenso durante toda su vida útil.

Esta clase se recomienda para grúas especialmente diseñadas para el cliente, lo que es indispensable para llevar a cabo tareas de trabajo críticas que pueden afectar la producción total de la instalación. Estas deben proveer la mayor confiabilidad, con especial atención en las características de mantenimiento.

En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de la clasificación de servicio de la CMAA-70:

Tabla 2.1. Resumen de la clasificación de servicio de la CMAA-70 en función de los ciclos de carga y el % de carga a levantar. Fuente: Crane Manufacturers Association of America. Specification N°70

Tipo de Carga (Porcentaje de Carga Nominal)	Cantidad de Ciclos de Carga			
	N1 (20.000-100.000)	N2 (100.000-500.000)	N3 (500.000-2.000.000)	N4 (>2.000.000)
L1 (35-53%)	A	B	C	D
L2 (53.1-67%)	B	C	D	E
L3 (67.1-85%)	C	D	E	F
L4 (85.1-100%)	D	E	F	F

2.3.4.2 Crane Manufacturer's Association of America – 74

La CMAA-74 realiza una clasificación para puentes grúa de una viga principal, que se detalla a continuación: [9]

2.3.4.2.1 Clase A (en espera o servicio infrecuente)

La clase A incluye grúas donde se requiere un manejo preciso del equipo a bajas velocidades, con largos periodos de reposo entre levantamientos de la carga.

Esta clase se recomienda para centrales eléctricas o salas de máquinas, servicios públicos, salas de turbinas, salas de motores y estaciones de transformadores. En general, se recomienda para instalaciones donde se requiere usar el puente grúa para mantenimiento poco frecuente o la instalación inicial de un equipo.

2.3.4.2.2 Clase B (servicio ligero)

La clase B incluye grúas donde se requiere levantar la carga máxima de manera ocasional, o levantamientos con menor carga 2 a 5 veces por hora.

Esta clase se recomienda para talleres de reparación, edificios de servicios, pequeños almacenes o en operaciones de ensamblado ligero, donde los requisitos de servicio son ligeros y de baja velocidad.

2.3.4.2.3 Clase C (servicio moderado)

La clase C incluye grúas donde los requisitos de levantamiento de carga son en promedio un 50% de la carga máxima, con 5 a 10 levantamientos por hora.

Esta clase se recomienda para salas de máquinas o fábricas de celulosa.

2.3.4.2.4 Clase D (servicio pesado)

La clase D incluye grúas donde las cargas de levantamiento son cercanas al 50% de la carga máxima que serán levantadas constantemente con 10 a 20 levantamientos por hora y generalmente las velocidades de transporte de carga son elevadas.

Esta clase se recomienda para salas de maquinaria pesada, plantas de fabricación, fundiciones y almacenes de acero, depósitos de contenedores o madera, y en operaciones donde se requiere producción pesada.

En la Tabla 2.2 se presenta un resumen de la clasificación de servicio de la CMAA-74:

Tabla 2.2. Resumen de la clasificación de servicio de la CMAA-74 en función de los ciclos de carga y el % de carga a levantar. Fuente: Crane Manufacturers Association of America. Specification N°74

Tipo de Carga (Porcentaje de Carga Nominal)	Cantidad de Ciclos de Carga			
	N1 (20.000-100.000)	N2 (100.000-500.000)	N3 (500.000-2.000.000)	N4 (>2.000.000)
L1 (35-53%)	A	B	C	D
L2 (53.1-67%)	B	C	D	-
L3 (67.1-85%)	C	D	-	-
L4 (85.1-100%)	D	-	-	-

2.3.4.3 The American Society of Mechanical Engineers B30.2

En la ASME B30.2 se realiza una clasificación para puentes grúa según el tipo de servicio: [4]

2.3.4.3.1 Servicio normal de grúa

En esta clasificación se consideran grúas que requieren levantar cerca de un 85% de la carga máxima de levante, con 10 levantamientos por hora.

2.3.4.3.2 Servicio pesado de grúa

En esta clasificación se consideran grúas que requieren levantar entre un 85% y 100% de la carga máxima de levante o aquellas que superan los 10 levantamientos por hora.

2.3.4.3.3 Servicio severo de grúa

En esta clasificación se consideran grúas bajo condiciones anormales de operación, donde se requiere levantar cerca del 100% de la carga máxima de levante más de 10 veces por hora o en funcionamiento continuo.

2.3.5 Tipo de mando

De acuerdo con la norma ASME B30.2, la clasificación por tipo de mando considera cuatro casos: [4]

2.3.5.1 Grúa operada desde el piso

Es una grúa cuyos movimientos son controlados por un operador a través del uso de un dispositivo de control suspendido desde la grúa.

2.3.5.2 Grúa operada a control a remoto

Es una grúa cuyos movimientos son controlados por un operador a través del uso de un dispositivo de control de operación portátil.

2.3.5.3 Grúa operada desde una cabina

Es una grúa cuyos movimientos son controlados por un operador a través del uso de un dispositivo de control ubicado en una cabina que está sujeta a la grúa.

2.3.5.4 Grúa operada desde una plataforma

Es una grúa cuyos movimientos son controlados por un operador a través del uso de un dispositivo de control ubicado en un cuarto de control, una plataforma o una cabina fija que es independiente de la grúa.

3 CERTIFICACIÓN DE PUENTE GRÚA

El proceso de certificación de un puente grúa lo realiza el fabricante al momento del diseño y construcción, previo a la instalación de este en la industria, basándose en el cumplimiento de las normas de diseño pertinentes. La normativa que se utilice depende del fabricante y el país en el cual se debe instalar el puente grúa. Sin embargo, también se tienen en consideración los requerimientos y exigencias del cliente.

En la actualidad existen algunas empresas cuyo rubro es lo que se denomina “*Inspección y Certificación de Grúas*” que intervienen luego de que estas han funcionado durante un periodo de tiempo.

El proceso de inspección y certificación de puentes grúa realizado por estas empresas se basa en comprobar que se realizaron las inspecciones y mantenimientos correspondientes al puente grúa. Además, se puede realizar una prueba de carga con un porcentaje mayor a la carga máxima de levante, con lo cual finalmente certifican que el puente grúa está en condiciones de seguir operando. Sin embargo, este procedimiento no considera la estructura que soporta al puente grúa, la cual puede sufrir deformaciones permanentes debido a la mayor carga que se levanta durante la prueba de carga.

Las inspecciones y mantenimientos que se deben realizar al puente grúa se detallan en las especificaciones del fabricante, como ABUS Grúas [10] y en la norma ASME B30.2. [4]

A continuación, se describen los procesos de inspección, pruebas y mantenimiento de puentes grúa:

3.1 Norma ASME B30.2

La norma ASME B30 fue creada por “The American Society of Mechanical Engineers” y contiene las disposiciones que se aplican a la construcción, instalación, operación, inspección, pruebas, mantenimiento y utilización de grúas y manipulación de materiales. Esta tiene como objetivos:

- a) Prevenir o minimizar las lesiones a los trabajadores y proteger la vida, la integridad física y la propiedad mediante la prescripción de requisitos de seguridad.
- b) Proporcionar orientación a los fabricantes, propietarios, empresarios, usuarios y demás interesados o responsables de su aplicación.
- c) Orientar a los gobiernos y otros organismos reguladores en la elaboración, promulgación y aplicación de las directivas de seguridad adecuadas.

3.2 Inspección de un puente grúa según norma ASME B30.2

El proceso de inspección descrito en la norma ASME B30.2 se divide en inspección inicial e inspección para grúas en servicio regular:

3.2.1 Inspección inicial

El proceso de inspección inicial se debe realizar a los puentes grúa nuevos, reinstalados, alterados, reparados y/o modificados.

Esta debe ser realizada antes del primer levantamiento para verificar la conformidad con las disposiciones aplicables de esta norma. En el caso de los puentes grúa alterados, reparados y/o modificados, las inspecciones se pueden limitar a las disposiciones adoptadas por la alteración, reparación o modificación.

3.2.2 Inspección en servicio regular

El proceso de inspección regular para puentes grúa se realiza de manera frecuente y periódico, según el intervalo de tiempo en el cual se realiza la inspección. Este intervalo de tiempo depende de la naturaleza de los componentes críticos de la grúa y el grado de su exposición al uso, deterioro o mal funcionamiento de acuerdo con la clasificación de servicio del puente grúa.

3.2.2.1 Inspección frecuente en servicio regular

Las inspecciones frecuentes son inspecciones visuales en las que se requiere incluir observaciones para determinar si las condiciones encontradas durante la inspección constituyen un riesgo y por tanto, se requiere otra inspección más detallada.

De acuerdo con la Norma ASME B30.2, se debe inspeccionar lo siguiente: [4]

- a) Los mecanismos para una operación adecuada, ajustes apropiados y ruidos inusuales.
- b) Dispositivos de límite de elevación superior.
- c) Los tanques, válvulas, bombas, líneas y otras partes de los sistemas hidráulicos o de aire para fugas.
- d) Los ganchos y sus seguros.
- e) Los cables de elevación y las conexiones de los extremos.
- f) Cable enrollado adecuadamente en los tambores y poleas.

Este tipo de inspección se debe realizar, dependiendo de la clasificación de servicio, de forma:

- Servicio normal: Mensual
- Servicio pesado: Semanal a mensual
- Servicio severo: Diario a semanal

3.2.2.2 Inspección periódica en servicio regular

Las inspecciones periódicas son inspecciones visuales en las cuales se deben preparar reportes de inspección fechados y registros comparables sobre los puntos críticos para proporcionar la base de una evaluación continua. Se debe determinar si las condiciones encontradas constituyen un peligro y si es necesario realizar una inspección adicional.

La inspección periódica debe incluir los ítems de la inspección frecuente descrita anteriormente y de manera adicional los siguientes, cuando sea aplicable:

- a) Partes deformadas, agrietadas, o corroídas.
- b) Pernos, tuercas, clavijas o remaches flojos.
- c) Poleas y tambores agrietados o desgastados.
- d) Partes desgastadas, agrietadas o deformadas tales como clavijas, rodamientos, ruedas, ejes, engranajes, rodillos, dispositivos de bloqueo y fijación, amortiguadores y dispositivos de parada.
- e) Desgaste excesivo de partes del sistema de frenado.
- f) Desgaste excesivo de los piñones y estiramiento excesivo de la cadena de transmisión.
- g) Deterioro de los dispositivos de control y límite, contactos y mando de control.
- h) Dispositivos limitadores de movimiento que interrumpan la energía o produzcan una alerta al ser activados.
- i) Cable enhebrado en conformidad con el diseño del fabricante de la grúa.
- j) Todas las etiquetas o placas que indican las funciones, instrucciones, precauciones y advertencias.

Según el tipo de servicio, estas inspecciones se deben realizar de forma:

- Servicio normal: Anual
- Servicio pesado: Anual
- Servicio severo: Trimestral

3.2.3 Inspección de puentes grúa en servicio irregular

Para grúas que no son usadas con frecuencia (sin uso entre un mes y un año) se debe realizar una inspección del tipo frecuente en servicio regular antes de ser puesta en servicio.

Para grúas que no son usadas con frecuencia (sin uso por más de un año) se debe realizar una inspección del tipo periódica en servicio regular antes de ser puesta en servicio.

3.2.4 Inspección de cables de puentes grúa

El proceso de inspección de los cables descrito en la norma ASME B30.2 se divide en inspección frecuente y periódica de acuerdo con la clasificación de servicio.

3.2.4.1 Inspección frecuente de cables de puentes grúa

En la inspección frecuente de cables, todos los cables deben ser inspeccionados visualmente antes de iniciar cada trabajo, y debe estar enfocado en descubrir daños graves como:

- a) Deformaciones del cable
- b) Corrosión
- c) Cables rotos o cortados

Si se aprecia alguno de estos daños, el cable debe ser retirado del servicio o se debe inspeccionar según una inspección periódica de cables.

3.2.4.2 Inspección periódica de cables de puentes grúa

En la inspección periódica de cables, todos los cables deben ser inspeccionados, abarcando su longitud total. Se debe preparar un reporte de inspección fechado para proporcionar la base de una evaluación continua. Esta se debe enfocar en descubrir daños graves como:

- a) Reducción del diámetro del cable por debajo del diámetro nominal, provocado por la corrosión interna o externa y el desgaste de los alambres externos.
- b) Alambres severamente corroídos o rotos en las conexiones de los extremos.
- c) Conexiones de los extremos severamente corroídas, agrietadas, dobladas, desgastadas.

Si se encuentra alguno de estos daños, el cable debe ser retirado del servicio.

3.3 Mantenimiento preventivo de un puente grúa según norma ASME B30.2

En la norma ASME B30.2 se establece que el mantenimiento de un puente grúa debe basarse en el mantenimiento recomendado por el fabricante. Se deben generar registros de las mantenciones para su posterior almacenamiento.

Antes de realizar el mantenimiento, se deben tener las siguientes precauciones:

- La grúa se debe ubicar en un lugar donde cause menos interferencias con otras grúas y operaciones en el área.
- Si una carga está sujeta a la grúa, debe ser descargada.
- Todos los dispositivos de control deben ser colocados en la posición apagada.
- Se debe establecer un procedimiento de bloqueo.
- Se deben colocar señales y vallas de seguridad en el piso, debajo de la grúa.

En esta norma no se detalla un procedimiento de mantenimiento preventivo, sin embargo, se realizan las siguientes recomendaciones:

- 1) Toda condición que sea revelada en el procedimiento de inspección que indique la existencia de un riesgo, debe ser corregida mediante un ajuste, reparación o reemplazo antes de continuar trabajando con el puente grúa.
- 2) Se deben hacer reparaciones o reemplazos cuando sea necesario a:
 - Ganchos dañados o desgastados.
 - Todos los componentes críticos que están agrietados, rotos, torcidos o excesivamente desgastados.
 - Los contactos eléctricos quemados o picados deben ser reemplazados en conjunto.
 - Las etiquetas o placas que indican las funciones, instrucciones, precauciones y advertencias, para que sean legibles.

- 3) Se deben lubricar todas las partes móviles de la grúa que requieren de lubricación. Se deben cumplir las recomendaciones del fabricante del puente grúa respecto a los puntos y a la frecuencia de lubricación, mantenimiento de niveles de lubricantes y tipos de lubricantes que se usarán.

3.3.1 Mantenimiento y reemplazo de cables

A continuación, se detallan algunas recomendaciones de mantenimiento para cables según la norma ASME B30.2:

- 1) Los cables deben ser almacenados para evitar daños o deterioros.
- 2) El cable debe ser desenrollado de tal manera que evite que se doble o tuerza.
- 3) Antes de cortar el cable, se deben contar con los medios necesarios para evitar el destrenzado.
- 4) Durante la instalación, se debe tener cuidado para evitar que el cable se arrastre en la suciedad o alrededor de objetos que lo puedan dañar, raspar, rayar o aplastar.
- 5) El cable debe mantenerse bien lubricado. El lubricante aplicado no debe dificultar la inspección visual.

Los criterios para el reemplazo de los cables de acero que operan en poleas y tambores de acero son:

- Para cables móviles, si el cable tiene 12 alambres rotos distribuidos aleatoriamente en un cable trenzado.
- Un alambre externo roto en el punto de contacto con el alma del cable que ha salido de la estructura del cable y sobresale o rodea su estructura.
- El desgaste de un tercio del diámetro original de los alambres externos.
- Cables doblados, aplastados, destrenzados o cualquier otro daño que dé como resultado la deformación de la estructura del cable.
- Reducción del diámetro nominal mayor a los mostrados a continuación:

Diámetro del cable [mm]	Reducción máxima permitida del diámetro nominal [mm]
$D < 8$	0.4
$8 < D < 13$	0.8
$13 < D < 19$	1.2
$19 < D < 29$	1.6
$29 < D < 38$	2.4

El cable de reemplazo y sus conexiones deben tener una resistencia igual a la del cable y las conexiones originales especificadas por el fabricante.

3.4 Inspección inicial de puente grúa según fabricante ABUS Grúas

Antes de la puesta en marcha inicial de la grúa se debe realizar una comprobación de la recepción, la cual es responsabilidad del cliente.

Según ABUS Grúas, se debe verificar: [10]

- 1) Comprobación del estado en general. Los componentes de la instalación de grúa no deben estar dañados u oxidados.
- 2) Comprobar el estado de la estructura portante. No debe estar dañada.
- 3) Comprobar el correcto montaje y conexión de la grúa.
- 4) Comprobar los motores de elevación, los de traslación del carro y los accionamientos de traslación de la grúa.
- 5) Comprobar los frenos de los motores de elevación, accionamientos de traslación del carro y de la grúa.
- 6) Comprobar el interruptor fin de carrera de elevación.
- 7) Comprobar el interruptor de fin de desplazamiento.
- 8) Comprobar interruptor de fin de recorrido.
- 9) Comprobar que todos los tornillos estén apretados y asegurados. De lo contrario, apretar los tornillos con el par correspondiente y asegurarlos.
- 10) Comprobar dispositivos de advertencia. Deben funcionar tal y como está previsto.
- 11) Comprobar el seguro de sobrecarga.
- 12) Comprobar todos los demás dispositivos de seguridad de la grúa.
- 13) Comprobar que todos los rótulos necesarios en la grúa estén presentes y sean legibles. De lo contrario, se deben renovar los rótulos.
- 14) Realizar una comprobación estática de la capacidad máxima de carga. Esta se debe realizar con una carga de ensayo equivalente a 1,25 veces la capacidad máxima de carga de la grúa.

- 15) Realizar una comprobación dinámica de la capacidad máxima de carga. Esta se debe realizar con una carga de ensayo equivalente a 1,1 veces la capacidad máxima de carga de la grúa.
- 6) Si por normativa local aplicable deben realizarse otras comprobaciones, deberán llevarse también a cabo.

La decisión sobre el perfecto estado de la grúa es responsabilidad exclusiva del verificador. Si se detectaran fallos, deben ser resueltos. El verificador decide si la grúa debe o no comprobarse nuevamente.

3.5 Inspección periódica de puente grúa según fabricante ABUS Grúas

Para ABUS Grúas, el cliente es el responsable de comprobar periódicamente el puente grúa para garantizar su correcto funcionamiento. Estas inspecciones se deben realizar al menos una vez al año, excepto si se tienen las siguientes condiciones:

- Trabajo frecuente con la carga nominal
- Trabajo en varios turnos
- Uso muy frecuente
- Entorno polvoriento o agresivo

Según ABUS Grúas, se debe inspeccionar lo descrito en la inspección inicial de puente grúa desde el numeral 1) hasta 13) y adicionalmente lo siguiente: [10]

- 1) Comprobar las soldaduras. No deben presentar grietas ni roturas.
- 2) Comprobar el estado de la pintura. No debe haber desconchados ni rozaduras. Caso contrario eliminar la pintura suelta y repasar la pintura.
- 3) Comprobar el gancho de carga. (Como se muestra en 3.5.1)
- 4) Comprobar los motores de elevación, los de traslación del carro y los accionamientos de traslación de la grúa para estanqueidad.

- 5) Comprobar el entrehierro y el espesor del forro de los frenos en motores de elevación, motores de carro y accionamientos de traslación de la grúa. Caso contrario, ajustar el entrehierro y sustituir los forros de frenos.
- 6) Comprobar la capacidad de carga con una carga de ensayo cercana a la capacidad máxima de carga de la grúa.
- 7) Comprobar el engrase de todas las piezas móviles.

Adicionalmente se deben realizar inspecciones periódicas al polipasto, para lo cual se debe revisar:

- 8) El cable.
- 9) Comprobar la fijación del cable y la guía del cable. Los componentes no deben estar dañados, muy desgastados, rotos o sueltos.
- 10) Comprobar el desgaste de la pestaña de rueda de las roldanas en el polipasto de cable.
- 11) Comprobar el recorrido de frenada de los motores de carro.
- 12) Comprobar el diámetro de los rodillos guía en el polipasto de cable.
- 13) Comprobar el diámetro de la roldana en el polipasto de cable.
- 14) Comprobar el estado de los topes de seguridad en el polipasto de cable.
- 15) Comprobar el estado de la trócola.
- 16) Comprobar el saliente de cuña de cable.

3.5.1 Verificación del gancho de carga del polipasto de cable

Para verificar un gancho de carga, se deben medir las dimensiones mostradas en la Figura 3.1: [10]

- Medir la apertura 'e' del gancho o la distancia 'y' de las dos marcas estampadas.
- Medir la altura 'f' de la base del gancho.

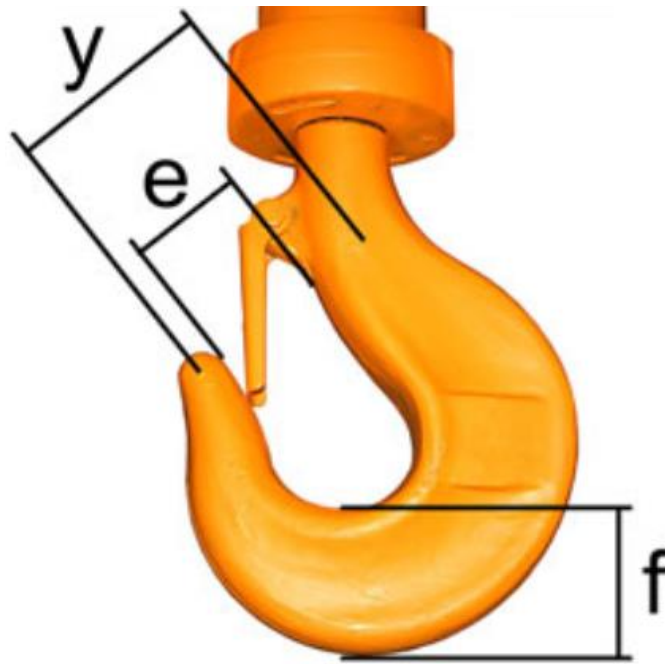


Figura 3.1. Dimensiones por medir en un gancho de carga del polipasto de cable.

Fuente: ABUS Grúas

Se deben comparar los valores medidos con los que se muestran en la Tabla 3.1 teniendo en consideración que:

- La apertura 'e' medida no debe ser superior al valor indicado.
- La altura de la base 'f' no debe ser inferior al valor indicado.
- La distancia 'y' menos un 10% no debe ser superior al valor indicado.

Tabla 3.1. Tabla de comparación de dimensiones ‘e’, ‘f’ e ‘y’ del gancho de carga de un polipasto de cable.

Fuente: ABUS Grúas.

Tamaño del gancho	Diseño del gancho	Apertura máxima e [mm]	Distancia teórica y [mm]	Altura de la base f [mm]
1	Individual	44	-	38
1.6	Individual	49.5	-	45.6
2.5	Doble	44	-	47.5
2.5	Individual	55	-	55.1
4	Doble	49.5	-	57
4	Individual	61.6	-	63.7
6	Doble	61.6	93	71.3
6	Individual	78.1	130	80.8
8	Doble	69.3	104.5	80.8
8	Individual	88	145	90.3
10	Doble	78.1	117.5	90.3
10	Individual	99	160	100.7
12	Doble	88	132.5	100.7
12	Individual	110	180	112.1
16	Doble	99	148.5	112.1
16	Individual	123	200	125.4
20	Doble	110	165.5	125.4
20	Individual	138	225	142.5
25	Doble	123	185	142.5
25	Individual	154	255	161.5
32	Doble	138	207	161.5
32	Individual	176	290	180.5
40	Doble	154	233	142.5
40	Individual	198	320	201.4

Si el gancho está más abierto de lo permitido o si la altura de la base es inferior a la permitida, se debe sustituir el gancho por uno nuevo. Si el gancho está deformado, aunque se cumplan los criterios de comparación, se debe realizar una verificación en búsqueda de grietas superficiales.

3.5.2 Verificación del cable del polipasto

Para verificar el estado del cable se debe inspeccionar el cable en su totalidad para evitar algún tipo de daño como los que se muestran en las Figura 3.2, Figura 3.3, Figura 3.4, Figura 3.5, Figura 3.6, Figura 3.7: [10]



Figura 3.2. Inspección de cables. La estructura del cable se ha abierto. Fuente: ABUS Grúas.



Figura 3.3. Inspección de cables. Se han formados bucles en el cable. Fuente: ABUS Grúas.



Figura 3.4. Inspección de cables. El cable se ha doblado como consecuencia de una fuerza externa violenta. Fuente: ABUS Grúas.



Figura 3.5. Inspección de cables. El cable se ha aplanado. Fuente: ABUS Grúas.



Figura 3.6. Inspección de cables. En el cable se ha formado una cesta como consecuencia de una torsión o giro violento. Fuente: ABUS Grúas.



Figura 3.7. Inspección de cables. El cable se ha deformado. Fuente: ABUS Grúas.

Si en el cable aparecen estos daños o alguno similar, es necesario reemplazarlo.

Además, se deben buscar posibles roturas de alambres a lo largo de todo el cable, como se muestra en la Figura 3.8 y Figura 3.9: [10]



Figura 3.8. Inspección de cables. Varios alambres rotos debido al desgaste normal de cable. Esto se produce cuando el cable se flexiona en las poleas bajo carga. Fuente: ABUS Grúas.



Figura 3.9. Inspección de cables. Alambre roto saliente. Fuente: ABUS Grúas.

3.6 Mantenimiento puente grúa según fabricante ABUS Grúas

3.6.1 Medidas de seguridad

Antes de realizar cualquier tipo de trabajo en la grúa y sus componentes, ABUS Grúas recomienda desconectar la grúa para evitar que los componentes queden conectados al sistema eléctrico y ocurra una descarga eléctrica o que una persona haga uso de la grúa durante el mantenimiento. Si la grúa debe quedar conectada, como en el caso del cambio del cable del polipasto, se deben tomar medidas para impedir el peligro de descarga eléctrica o que otras personas usen la grúa durante el mantenimiento.

La seguridad del operario es importante durante el mantenimiento, por lo cual se debe hacer uso de una plataforma elevadora y un arnés de seguridad. Así también, se debe tener en cuenta la seguridad de los demás trabajadores, por lo cual es necesario informar a todo el personal sobre los riesgos existentes en la zona de trabajo y asegurar el perímetro para evitar cualquier tipo de accidente. Finalmente, se deben recoger todas las herramientas y piezas sueltas que puedan caer al poner nuevamente en servicio la grúa.

3.6.2 Plan de verificaciones y mantenimiento de ABUS Grúas

ABUS Grúas propone un plan de verificaciones para sus puentes grúa y los polipastos que se debe realizar a diario o de manera periódica. Aquellos trabajos diarios deben ser realizados por el operador de la grúa antes de comenzar la jornada, mientras que los periódicos deben ser realizados por el personal de mantenimiento o una empresa especializada en servicio técnico. En la Tabla 3.2 y la Tabla 3.3 se muestra el plan de verificaciones de ABUS Grúas:

Tabla 3.2 Comprobación de componentes de puente grúa y polipasto de cable y su periodicidad de comprobación. Fuente: ABUS Grúas

Puente Grúa	Polipasto de Cable	Comprobación de Componentes	A diario	Verificación Periódica
x	x	¿Hay algún daño detectable? (óxido, piezas sueltas, fugas de aceite, tornillos ausentes)	x	x
x	x	¿Se detecta algún daño en la estructura portante?		x
x	x	¿Está la grúa correctamente instalada y conectada?		x
x	x	¿Están todos los tornillos bien apretados y asegurados?		x
	x	¿Se puede girar el gancho y está en buen estado?	x	
	x	¿Se detecta algún daño en la cadena?	x	x
	x	¿Se detecta alguna rotura de alambres en el cable?	x	x
	x	¿Se detecta algún daño en la fijación del cable? (tambor) ¿o en la guía del cable?		x
	x	¿Es corriente el saliente de cuña de cable?		x
x	x	¿Están presentes y legibles todos los rótulos necesarios en la grúa?		x
x	x	¿Se detecta algún daño en las soldaduras?		x
x	x	¿Se detecta algún daño en la pintura?		x
	x	¿Está el gancho desgastado, deformado o dañado?		x
x	x	¿Son estancas las reductoras de los mecanismos de traslación y de elevación?		x
x	x	¿Están correctos el entrehierro y el espesor de los forros de freno en los mecanismos de traslación y de elevación?		x
x	x	¿Alcanza la grúa la capacidad máxima de carga?		x
x	x	¿Están lubricadas todas las piezas móviles?		x
x	x	¿Están desgastadas las pestañas de las roldanas?		x
x	x	¿Es correcto el recorrido de frenada de los mecanismos de traslación?		x
x	x	¿Es correcto el diámetro de los rodillos guía?		x
x	x	¿Es correcto el diámetro de las roldanas?		x
	x	¿Está la trócola en buen estado?		x
	x	¿Está en buen estado la cantonera de la trócola?		x
x	x	¿Están en buen estado los topes de seguridad?		x
	x	¿Se ha alcanzado la vida útil teórica?		x
x	x	¿Hay que realizar alguna otra comprobación específica nacional?		x

Tabla 3.3 Comprobación de funcionamiento de puente grúa y polipasto de cable y su periodicidad de comprobación. Fuente: ABUS Grúas

Puente Grúa	Polipasto de Cable	Comprobación de Funcionamiento	A diario	Verificación Periódica
x	x	¿Funcionan el motor de elevación y los mecanismos de traslación?	x	x
x	x	¿Funcionan los frenos del motor de elevación y de los mecanismos de traslación?	x	x
x	x	¿Funciona el pulsador de paro de emergencia?	x	
	x	¿Funciona el seguro de sobrecarga?		x
	x	¿Funciona el interruptor de seguridad de fin de carrera?		x
x		¿Funcionan el interruptor fin de carrera del carro y los interruptores fin de carrera de la grúa?	x	x
x	x	¿Funcionan los dispositivos de emergencia?	x	x
x	x	¿Funcionan todos los demás dispositivos de seguridad?	x	x

3.6.3 Lubricación

Para realizar el cambio de lubricante se debe:

- Desmontar los componentes del mecanismo.
- Eliminar el lubricante gastado en estado caliente.
- Eliminar los restos de lubricante con un detergente adecuado.
- Aplicar el nuevo lubricante.
- Volver a montar los componentes del mecanismo y comprobar la estanqueidad.

3.7 Pruebas de un puente grúa según norma ASME B30.2

Dentro de las pruebas que se deben realizar a las grúas cuando son nuevas, se están reinstalando, se han alterado, reparado o modificado, se tienen las pruebas operativas y las pruebas de carga. [4]

3.7.1 Pruebas operativas

El procedimiento de prueba operativa debe ser realizado antes de su uso inicial y se deben incluir, si es aplicable, las siguientes pruebas:

- 1) Elevación y descenso.
- 2) Recorrido del carro.
- 3) Recorrido del puente.
- 4) Dispositivos limitadores de elevación:
 - Los recorridos de los dispositivos limitadores de elevación se determinan por pruebas usando un gancho vacío.
 - El mecanismo de activación del dispositivo de límite superior debe estar regulado de manera que se active en el tiempo preciso para evitar el contacto de la carga con cualquier parte del puente grúa.
- 5) Dispositivos de límite de recorrido.
- 6) Dispositivos de bloqueo e indicación.

3.7.2 Pruebas de carga

El procedimiento de prueba de carga debe ser realizado antes del uso inicial del puente grúa. De acuerdo con la Norma ASME B30.2, la carga de prueba debe ser entre un 100%-125% de la carga nominal. La persona que realiza la prueba de carga debe preparar un informe escrito sobre la carga sostenida y las operaciones realizadas durante la prueba que debe ser archivado.

El procedimiento para realizar una prueba de carga se detalla a continuación:

- 1) Elevar la carga de prueba a una altura tal que asegure que ésta sea sostenida por la grúa y contenida por los frenos del polipasto.
- 2) Transportar la carga de prueba por medio del carro a lo largo del puente.
- 3) Transportar la carga de prueba por medio de un puente a lo largo de la carrilera, cuando sea factible, en una dirección en que el carro esté cerca al extremo derecho de la grúa y en otra dirección en que el carro esté cerca al extremo izquierdo de la grúa.
- 4) Descender la carga de prueba, detener y contener la carga con el freno.

3.8 Procesos de inspección: Evaluación No Destructiva (END)

De manera adicional a los procesos de inspección, mantenimiento y pruebas que se pueden realizar al puente grúa para su certificación, se deben considerar las inspecciones que se pueden realizar a la estructura del galpón industrial que soporta el puente grúa. Este tipo de inspección no debe dañar la estructura ya que afectaría su utilidad a futuro y podría poner en riesgo a las personas y la maquinaria en su interior.

La evaluación no destructiva (END) ha sido definida como una recopilación de aquellos métodos de testeo utilizados para examinar o inspeccionar una parte de un material o un sistema sin interferir con su utilidad futura. [11]

La END no solo se encuentra en la industria, sino también en la vida cotidiana. Al elegir un producto, el consumidor efectúa una inspección visual en búsqueda de defectos. Si los encuentra, entonces decide si comprar el producto o buscar uno nuevo. De acuerdo con Peter Shull [12], el principio básico de una END es simple: para determinar la calidad o la integridad de un elemento de forma no destructiva, basta con encontrar un fenómeno físico, denominado el parámetro de interrogación, que interactuará con su espécimen de prueba, el parámetro interrogado, sin que esto altere su función. A partir de los resultados de inspección de una END se debe inferir indirectamente el estado del objeto ensayado.

El término evaluación no destructiva no es el único utilizado para describir el método. Las personas han variado la terminología basada en su aplicación específica y la información derivada de la prueba. Los términos son similares, pero con sutiles diferencias:

- Ensayos No Destructivos (Nondestructive Testing NDT): Se refieren generalmente solo a la prueba real.

- Evaluación No destructiva (Nondestructive Evaluation NDE): No solo implica la prueba, sino también su rol en el proceso. Esta es la definición más general entre todos los términos.
- Inspección No Destructiva (Nondestructive Inspection NDI): Se utiliza normalmente en áreas distintas del control del proceso.
- Caracterización No Destructiva (Nondestructive Characterization NDC): Se refiere a la caracterización específica de las propiedades del material. Es la que tiene el uso más restringido.
- Detección No Destructiva (Nondestructive Sensing NDS): Se refiere genéricamente al uso de sensores para obtener la información de manera no destructiva.

El proceso de evaluación no destructiva depende de cada caso en específico. Sus aplicaciones pueden imponer requisitos diferentes sobre los métodos y los procedimientos, como que sea portable o la velocidad de adquisición y entrega de datos.

Una vez que se ha decidido emplear el método de evaluación no destructiva para mejorar la calidad del producto o garantizar la integridad de los componentes, se debe tener una idea de que métodos maximizarán la probabilidad de detectar el defecto. Para elegir un método END se debe:

- 1) Comprender la naturaleza física de lo que se va a inspeccionar.
- 2) Comprender los procesos físicos subyacentes que gobiernan los métodos END.
- 3) Comprender la naturaleza física de la interacción del campo o material de sondeo con el material de prueba.
- 4) Comprender el potencial y las limitaciones de la tecnología disponible. Se debe entender que el equipo puede no tener la sensibilidad requerida, y que las lecturas o resultados pueden diferir de lo esperado en inspecciones industriales.
- 5) Considerar factores económicos, ambientales, regulatorios y si esta se debe aplicar en la industria o en un laboratorio de prueba.

Para emplear un método de evaluación no destructiva es necesario tener un conocimiento razonable sobre lo que se está buscando, así como también entender cómo funcionan los diferentes métodos. La interacción entre estos es fundamental para:

- Determinar si el método empleado funcionará.
- Seleccionar un método en caso de múltiples opciones.
- Determinar la compatibilidad del método y el objeto a inspeccionar.

Los métodos de la evaluación no destructiva están orientados a determinar las condiciones que hacen fallar una pieza y de dónde y cómo ocurre el fallo. Una vez que se obtiene esta información se puede determinar qué se debe inspeccionar y cuánto inspeccionar.

A continuación, se detallan algunos de los END que se podrían realizar a la estructura del galpón industrial:

3.8.1 Inspección visual

La inspección visual debe ser el primer END que se debe tener en cuenta antes de aplicar métodos más sofisticados y costosos. En este método se realiza una inspección visual directa u ópticamente asistida mediante lentes, lupas o el uso de cámaras de video para una inspección virtual remota a la superficie del objeto para detectar fallas y anomalías. Se puede inspeccionar con luz visible o luz ultravioleta. [13]

La inspección visual se puede aplicar a todo tipo de materiales para la detección de grietas superficiales, poros, inclusiones y para evaluación de rugosidad. Sin embargo, está limitada por el acceso visual y la sensibilidad del método depende del inspector o del grado de aumento del lente, lupa o de la cámara de video. Para la discriminación precisa, la detección y medición de la falla o defecto, la información obtenida mediante este método puede necesitar ser complementada por otros métodos de ensayos no destructivos.

3.8.2 Tintas penetrantes

Se define tintas penetrantes como un ensayo no destructivo rápido, sencillo, económico y sensible. Se debe analizar una gran variedad de materiales, componentes y sistemas que tengan grietas superficiales. Estas grietas superficiales pueden ser inherentes a los materiales, resultantes de algún proceso de fabricación o desarrollarse a partir del uso y/o la exposición con el medio ambiente. [12]

Para un uso eficaz de este ensayo se requiere:

- Grietas superficiales en la pieza o componente (no se detectan grietas internas)
- Limpieza especial de la pieza o componente
- Buena vista

Los pasos para aplicar el método de tintas penetrantes son:

- 1) Realizar un examen visual detallado de la muestra a ensayar
- 2) Preparar la superficie de la muestra (limpieza exhaustiva)
- 3) Verificar la temperatura de la muestra y de las tintas penetrantes
- 4) Aplicar la tinta penetrante a la superficie de la muestra (inmersión, cepillado o pulverizado)
- 5) Esperar el tiempo requerido para que la tinta penetre en las grietas
- 6) Eliminar el exceso de tinta penetrante de la superficie de la muestra
- 7) Aplicar el revelador con el fin de atraer la tinta penetrante desde las grietas superficiales y aumentar su visibilidad
- 8) Localizar e interpretar los resultados

En la Figura 3.10 se muestra un esquema del método de tintas penetrantes:

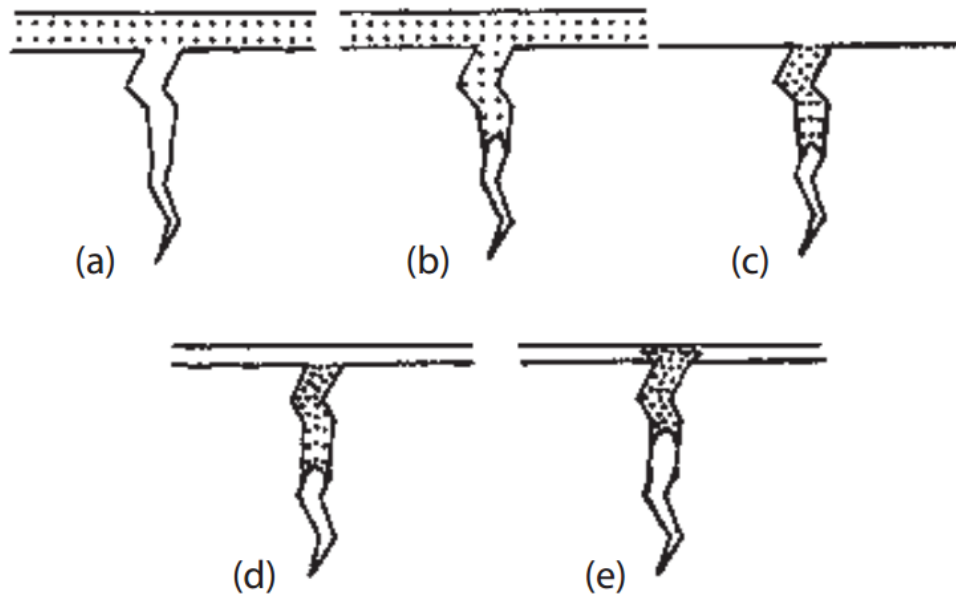


Figura 3.10. Esquema del método de tintas penetrantes: a) aplicación del líquido penetrante en la superficie limpia b) tiempo de espera requerido para que el líquido penetre en la grieta c) eliminación del exceso de líquido penetrante d) aplicación del líquido revelador en la superficie e) observación e interpretación del resultado. Fuente: Iddings, Frank A. y Shull, Peter J. Liquid Penetrant.

Además, es posible identificar 2 tipos de líquidos penetrantes: a) Penetrante de colores y b) Penetrante fluorescente.

- a) Generalmente se usa el penetrante de colores debido a su capacidad de permanecer en solución en altas concentraciones de aceites penetrantes, así como su contraste relativamente alto con el fondo blanco del revelador.
- b) El penetrante fluorescente requiere una fuente de luz ultravioleta especial. Puede requerir de iluminación tenue o incluso una sala oscura.

3.8.2.1 Ventajas/desventajas tintas penetrantes

Las ventajas y desventajas del método de tintas penetrantes se muestran en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4. Ventajas y desventajas del método de tintas penetrantes. Fuente: Iddings, Frank A. y Shull, Peter J. Liquid Penetrant.

Ventajas	Desventajas
• Barato. • Fácil de aplicar. • Se puede usar en la mayoría de los materiales. • Método de detección rápido. • Portátil. • Adaptable a una variedad de tamaños y formas. • No requiere estar conectado a una fuente de alimentación. • Identifica la ubicación, orientación, forma y tamaño aproximado de la grieta. • Es posible sumergir un lote de piezas en el líquido penetrante. • Es posible inspeccionar el 100% de la superficie.	• Solo es posible identificar grietas y defectos superficiales. • Aplicación restringida en superficies calientes, sucias o rugosas. • Aplicación restringida en materiales porosos. • Sucio. • Su aplicación funciona en un rango de temperaturas establecidas. • Se deben quitar los recubrimientos como pinturas o recubrimientos protectores. • Depende del operador. • La inspección final es visual.

3.8.3 Ultrasonido

El ensayo no destructivo de ultrasonido se basa en la propagación de ondas ultrasónicas (mayores a 50 kHz) a través del objeto de ensayo. El principio de funcionamiento del ultrasonido comienza con la generación de una onda por un transductor mediante un impulso de voltaje. Al poner el transductor en la muestra y generar la onda ultrasónica, esta onda viaja a través del material y la señal es recibida por otro transductor. Si existe un defecto en el material ensayado, se produce una dispersión de las ondas ultrasónicas o esta es reflejada nuevamente al transductor emisor. De esta forma, la señal se transforma nuevamente en un impulso eléctrico que se puede observar en un osciloscopio. [14]

Mediante la inspección por ultrasonido se pueden medir directamente 4 variables (tiempo de vuelo, amplitud, fase y frecuencia), con las cuales se puede determinar:

- La velocidad de la onda ultrasónica en el espesor de la muestra.
- La presencia de un defecto (tamaño, forma, posición y composición).
- Propiedades del material como la densidad y constantes elásticas como el módulo de Young o el coeficiente de Poisson.
- Geometría de la pieza.

Para realizar una inspección por ultrasonido se debe seleccionar:

- Lo que se desea medir (Tiempo de vuelo, amplitud, fase o frecuencia)
- El transductor apropiado para generar el tipo de onda requerido
- La configuración del transductor (pitch-catch o pulse-echo)
- El tipo de pulso de excitación
- El tipo de procesamiento de señal y el método de visualización. (Osciloscopio – Transformaciones de intensidad - Imágenes)

La configuración pulse echo es recomendable cuando solo se tiene acceso a un lado del objeto. En esta se tiene un único transductor que genera la onda ultrasónica y que

luego recibe el eco de un defecto o de la pared posterior. Esta configuración se muestra en la Figura 3.11:

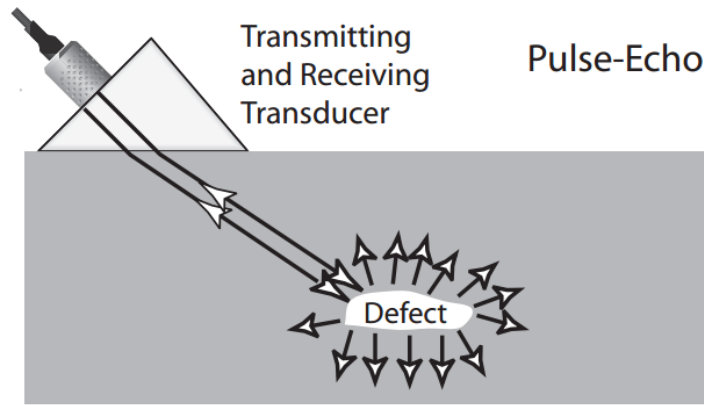


Figura 3.11. Método Pulse-Echo. La onda ultrasónica se emite y recibe por el mismo transductor. Fuente: Shull, Peter J. y Tittmann, Bernard R. Ultrasound.

Esta configuración no se recomienda para defectos cercanos a la superficie, ya que es posible que no se detecten debido a que la onda ultrasónica puede ser emitida y recibida instantáneamente.

La configuración pitch catch se recomienda para materiales delgados y para detección de defectos cercanos a la superficie. En esta se tiene un transductor de generación y uno de recepción de la onda ultrasónica, los cuales pueden estar al mismo lado o en lados opuestos. Esta configuración se muestra en la Figura 3.12:

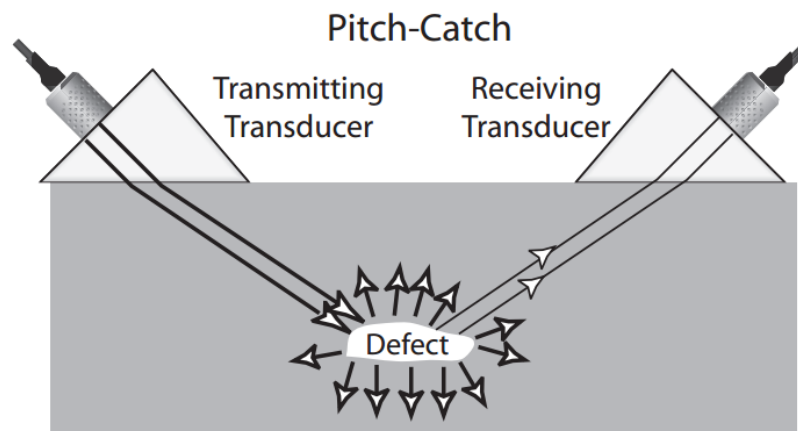


Figura 3.12. Método Pitch-Catch. La onda ultrasónica se emite y recibe en transductores diferentes. Fuente: Shull, Peter J. y Tittmann, Bernard R. Ultrasound.

Una vez que la señal ultrasónica se ha detectado y se ha convertido en una señal eléctrica por el transductor, el dispositivo receptor amplifica, filtra y realizar un acondicionamiento de la señal. Para visualizar la señal recibida se puede usar un osciloscopio, en el que se muestra la amplitud de la señal (voltaje) en función del tiempo o se puede hacer una transformación de intensidad y mostrar la señal como una imagen 2 o 3D.

3.8.3.1 Ventajas/desventajas ultrasonido

Las ventajas y desventajas del método de ultrasonido se muestran en la Tabla 3.5:

Tabla 3.5. Ventajas y desventajas del método de ultrasonido. Fuente: Shull, Peter J. y Tittmann, Bernard R. Ultrasound.

Ventajas	Desventajas
• Mayor profundidad de penetración. • Alta sensibilidad. Detecta mínimas discontinuidades. • Alta precisión. Dimensionamiento cuantitativo de fallas y posicionamiento. • Puede medir propiedades de los materiales. • Se puede usar en geometrías complejas. • Se puede usar en todos los materiales. • Método rápido. • Portátil. • Seguro.	• El operador debe tener mucha experiencia. • Generalmente requiere contacto con un agente de acoplamiento (gel o agua). • No se detectan fallas planas perpendiculares al frente de onda. • Medición punto por punto. Puede presentar discontinuidades o existir defectos en lugares donde no se realiza una medición. Depende del intervalo de medición. • Puede ser costoso. • Algunas geometrías no pueden ser examinadas.

3.8.4 Partículas magnéticas

El ensayo no destructivo de partículas magnéticas se puede utilizar solo en materiales ferromagnéticos que tengan defectos en la superficie o cerca de esta.

El principio básico de funcionamiento de este ensayo se basa en magnetizar el objeto y hacer fluir partículas ferromagnéticas finas sobre la superficie. Si existen defectos, estos afectarán en el campo magnético del objeto y por lo tanto atraerá a las partículas ferromagnéticas. [15]

El equipo y la técnica para este ensayo dependen de las características del objeto (forma, propiedades del material y el estado de la superficie), la ubicación y el tipo de fallas que se espera detectar (superficiales, sub superficiales o uniones) y el entorno de inspección.

Una vez se ha decidido usar el ensayo no destructivo de partículas magnéticas se debe seleccionar:

- Dirección de la magnetización (circular, longitudinal o una mezcla de ambas).
- Tipo de corriente de magnetización: Corriente alterna (esta proporciona frecuencias de 50-60 [Hz], lo cual provoca cambios alternados en la dirección del campo magnético y genera una alta movilidad de las partículas magnéticas, aunque la profundidad de penetración es limitada) o corriente continua (proporciona baja movilidad de las partículas, pero una alta penetración).
- Método de generación de campo magnético: a) Mediante una corriente que fluye por el objeto b) Mediante una fuente externa, como una bobina, dentro de la cual se coloca el objeto o c) Mediante inducción magnética debido a corriente indirecta.
- Tipo de partículas magnéticas (húmedas o secas).

Las grietas o defectos se pueden detectar con este ensayo solo si son grietas superficiales o cercanas a la superficie, como se muestra en la Figura 3.13.

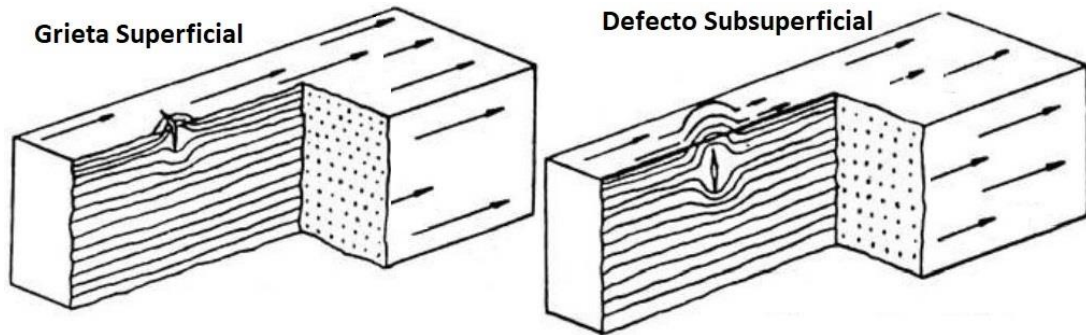


Figura 3.13. Izquierda: Grieta superficial detectada con partículas magnéticas. Derecha: Defecto subsuperficial detectado con partículas magnéticas. Fuente: Lindgren, Arthur y Shull, Peter J. Magnetic Particle.

Las partículas utilizadas en este ensayo son de óxido de hierro tratadas químicamente, de tamaño pequeño y de diferentes formas. Estas deben tener una alta permeabilidad magnética y una baja retención para evitar que se magneticen permanentemente. Pueden aplicarse a la superficie de la pieza como un polvo seco o en una solución húmeda.

Las partículas secas son de mayor tamaño y utilizadas en sistemas portátiles, mientras que las húmedas son más pequeñas y más móviles, por lo tanto, más sensibles a detectar defectos superficiales o sub superficiales.

Para generar el campo magnético requerido para el ensayo se puede hacer fluir la corriente en el objeto o en una bobina, punzón, yugo, conductor central o anillo de inducción.

3.8.4.1 Ventajas/desventajas partículas magnéticas

Las ventajas y desventajas del método de partículas magnéticas se muestran en la Tabla 3.6:

Tabla 3.6. Ventajas y desventajas del método de partículas magnéticas. Fuente: Lindgren, Arthur y Shull, Peter J. Magnetic Particle.

Ventajas	Desventajas
• Fácil de operar • Las indicaciones se producen directamente en la superficie de la pieza • Exacto y confiable • Poco entrenamiento necesario para el operador • No hay limitaciones en el tamaño o forma de la pieza a inspeccionar • Funciona bien a través de recubrimientos delgados de pintura u otros recubrimientos no magnéticos • Detecta grietas llenas de material extraño • Proporciona información de la profundidad de la grieta • Bajo costo • Sensibilidad sub superficial • Se puede automatizar	• Requiere que el objeto de inspección sea ferromagnético • Solo detecta grietas superficiales y cerca de la superficie • Para obtener mayor sensibilidad, la superficie se debe limpiar y secar minuciosamente • Generalmente se debe desmagnetizar el objeto • Cuando las piezas de fundición y forjadas son muy grandes, se requieren corrientes excesivamente grandes • Puede calentar y quemar la pieza en el punto de contacto eléctrico • Puede ser necesario magnetizar piezas de manera individual • Normalmente se requiere un contacto con la pieza a inspeccionar • Algunas partes requieren múltiples inspecciones

3.8.5 Radiología

La radiología es una de las pocas evaluaciones no destructivas que pueden examinar el interior del objeto y el único método que funciona en todos los materiales. [16]

Los rayos X son ondas electromagnéticas, al igual que la luz, pero con una energía entre 100 a 100.000 veces superior a esta, lo cual le permite pasar a través de los materiales y ser dispersados o absorbidos. La cantidad de rayos X que pasan a través de un material depende de la energía y cantidad de rayos, de la composición, densidad y el espesor del material.

Estos se pueden utilizar para obtener datos en una dimensión (1-D), la cual se denomina medida de calibre, en dos dimensiones (2-D) denominada radiografía o radiografía de proyección y en tres dimensiones (3-D) que se conoce como tomografía computarizada.

Este método requiere de una fuente de energía y de un detector análogo o digital. El tipo de fuente de energía puede ser una máquina de rayos X, materiales isotópicos o un sincrotrón.

Las máquinas de rayos X hacen uso de un tubo de rayos X que crea radiación por la colisión de electrones acelerados con un material, con lo cual se desprenden fotones con gran cantidad de energía, mientras que los sincrotrones generan la radiación mediante la aceleración angular de partículas cargadas.

3.8.5.1 Ventajas/desventajas radiología

Las ventajas y desventajas del ensayo no destructivo de radiología se muestran en la Tabla 3.7:

Tabla 3.7. Ventajas y desventajas del método de radiología. Fuente: Martz, Harry E., Logan, Clinton M. y Shull, Peter J. Radiology.

Ventajas	Desventajas
• Visual. • Detección interna. • Puede determinar el material, densidad y/o el espesor. • Se pueden examinar todos los tipos de materiales. • Inspección rápida.	• Peligro de radiación. • Costoso. • Requiere un operador altamente calificado. • No puede detectar grietas cerradas. • Los artefactos de imagen pueden dificultar el análisis.

4 MÉTODOS DE DISEÑO

El Instituto Americano de la Construcción en Acero (AISC) es el encargado de elaborar y divulgar los códigos de diseño estructural en acero. Los códigos de diseño estructural se han desarrollado con el propósito de proveer una forma simple, segura y económica para diseñar estructuras sometidas a cargas en condiciones operacionales y ambientales normales, y además permiten estandarizar el diseño de estructuras.

En la actualidad se tienen 2 métodos de diseño para la selección de los elementos de una estructura de acero, los cuales se describen a continuación:

4.1 Allowable Stress Design (ASD)

Conocido también como diseño por esfuerzos admisibles, es un procedimiento determinista que considera fijos los distintos valores numéricos que sirven para calcular la resistencia de los materiales.

Con este método se pueden determinar las solicitaciones correspondientes a las cargas máximas de servicio, calcular los esfuerzos de trabajo y compararlos con una fracción del esfuerzo admisible que se encuentra en el rango elástico del material. El diseño satisface los requisitos cuando la resistencia admisible de cada componente estructural es mayor o igual a la resistencia requerida determinada de acuerdo con las combinaciones de carga ASD. De esta forma, se puede expresar el requerimiento de seguridad como se muestra en la ecuación (4.1):

$$R_a \leq \frac{R_n}{\Omega} \quad (4.1)$$

Donde cada término representa:

R_a : Resistencia requerida; R_n : Resistencia nominal; Ω : Factor de seguridad

Con este método el factor de seguridad se escoge de acuerdo con la experiencia y el criterio, por lo que el riesgo no puede ser cuantificado de manera precisa. Si el factor de seguridad es alto, el número de fallas es bajo. Cuando este factor de seguridad se incrementa, no se conoce realmente en que cantidad se incrementa la probabilidad de que la estructura no falle.

4.1.1 Ventajas y desventajas ASD

Las ventajas y desventajas del método ASD se muestran en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1. Ventajas y desventajas del método ASD. Fuente: Elaboración propia.

Ventajas	Desventajas
• Emplea un factor de seguridad que compensa las incertidumbres del diseño, fabricación y montaje de los elementos estructurales. • Es un método simple con más de 100 años de aplicación.	• No se puede determinar cuantitativamente el margen de seguridad, por lo tanto, no se tiene una medida real del riesgo de falla de la estructura. • La resistencia de los materiales se basa en un comportamiento lineal elástico, sin considerar el rango inelástico. • Es un método que actualmente se considera obsoleto.

4.2 Load and Resistance Factor Design (LRFD)

Conocido como diseño del factor de carga y resistencia, este método plantea la existencia de un estado límite que representa aquella condición de la estructura en la cual deja de cumplir su función. Este estado límite es un evento predefinido y tiene una probabilidad de acontecimiento determinada, no obstante, este estado no debe ser alcanzado.

El objetivo de este método es conseguir que la estructura no sobrepase el estado límite y proveer a todos los elementos de las estructuras de acero una confiabilidad uniforme bajo distintas condiciones de carga, es decir, todos los elementos de la estructura tienen la misma probabilidad de falla.

Este método incorpora el concepto de confiabilidad que introduce el uso de coeficientes de amplificación de demandas y reducción de capacidades, además de la probabilidad de falla. El diseño para estados límites consiste en disminuir la probabilidad de falla del sistema o limitar el acontecimiento de dicho evento a niveles considerados aceptables.

El diseño satisface los requisitos cuando la resistencia de diseño de cada componente estructural es mayor o igual a la resistencia requerida determinada de acuerdo con las combinaciones de carga LRFD. De esta manera, se puede expresar el requerimiento de seguridad estructural como se muestra en la ecuación (4.2):

$$R_u \leq F_i \cdot R_n \quad (4.2)$$

Donde cada término representa:

R_u : Resistencia requerida; F_i : Factor de resistencia; R_n : Resistencia nominal

Los factores de resistencia se determinan de acuerdo con la norma AISC 360-2010.

4.2.1 Ventajas y desventajas LRFD

Las ventajas y desventajas del método LRFD se muestran en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2. Ventajas y desventajas método LRFD. Fuente: Elaboración propia.

Ventajas	Desventajas
• Toma en consideración la variabilidad de las cargas y resistencias • Es un método de diseño más racional que el método ASD. • Se obtienen niveles de seguridad uniformes para diferentes estados límites. • Se pueden ajustar los valores de los coeficientes de amplificación de carga o de reducción de resistencia, cuando se requiere. • Se obtiene una solución económica.	• En algunos casos se requieren datos estadísticos para ajustar los factores de resistencia.

4.3 AISC 360-2010: Specification for structural steel buildings

La especificación para edificios de acero AISC 360-2010 [17] se aplica al diseño de sistemas estructurales en acero. En esta se establecen los criterios para el diseño, fabricación y montaje de edificios de acero estructural y otros tipos de estructuras y se definen los coeficientes de reducción de resistencia (F_i) para diferentes condiciones de carga según el método LRFD:

- F_{it} : Coeficiente de reducción de resistencia en tracción.
- F_{ic} : Coeficiente de reducción de resistencia en compresión.
- F_{ib} : Coeficiente de reducción de resistencia en flexión.
- F_{iv} : Coeficiente de reducción de resistencia en corte.
- F_{it} : Coeficiente de reducción de resistencia en torsión.

4.3.1 Diseño de miembros en tracción

La fuerza máxima nominal de tracción se determina como se muestra en la ecuación (4.3):

$$P_n = \sigma_y \cdot A \text{ [N]} \quad (4.3)$$

Para el diseño de miembros solo en tracción, el coeficiente de reducción de resistencia se considera como $F_{it} = 0.9$. De esta forma, la fuerza de tracción que resiste el elemento se calcula como se muestra en la ecuación (4.4):

$$P_c = P_n \cdot F_{it} \text{ [N]} \quad (4.4)$$

4.3.2 Diseño de miembros en compresión

La fuerza nominal máxima de compresión de elementos que no fallan por pandeo se debe calcular como se muestra en la ecuación (4.5):

$$P_n = F_{cr} \cdot A [N] \quad (4.5)$$

Para determinar la tensión crítica (F_{cr}) en compresión, se debe considerar el pandeo elástico e inelástico, los cuales quedan definidos por $\lambda_c = \sqrt{\frac{\sigma_y}{F_e}}$, donde F_e representa la carga crítica de Euler que se debe calcular como se muestra en la ecuación (4.6):

$$F_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{(K \cdot L/r)^2} [Pa] \quad (4.6)$$

De acuerdo con la norma AISC 360-2010 [17], para los elementos en compresión que se encuentran en el rango inelástico, donde se cumple que $\frac{KL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}$, la tensión crítica se determina como se muestra en la ecuación (4.7):

$$F_{cr} = \sigma_y \cdot 0.658^{(\sigma_y/F_e)} [Pa] \quad (4.7)$$

Mientras que para los elementos en compresión en los que se cumple que $KL/r > 4.71 \sqrt{E/\sigma_y}$, la tensión crítica se calcula como se muestra en la ecuación (4.8):

$$F_{cr} = 0.877 \cdot F_e [Pa] \quad (4.8)$$

Se recomienda que la relación de esbeltez (KL/r) para miembros diseñados solo en compresión no debe ser mayor a 200. Para calcular esta relación, se debe determinar el factor de longitud efectiva de acuerdo con el tipo de apoyo que tienen los elementos, como se muestra en la Figura 4.1:

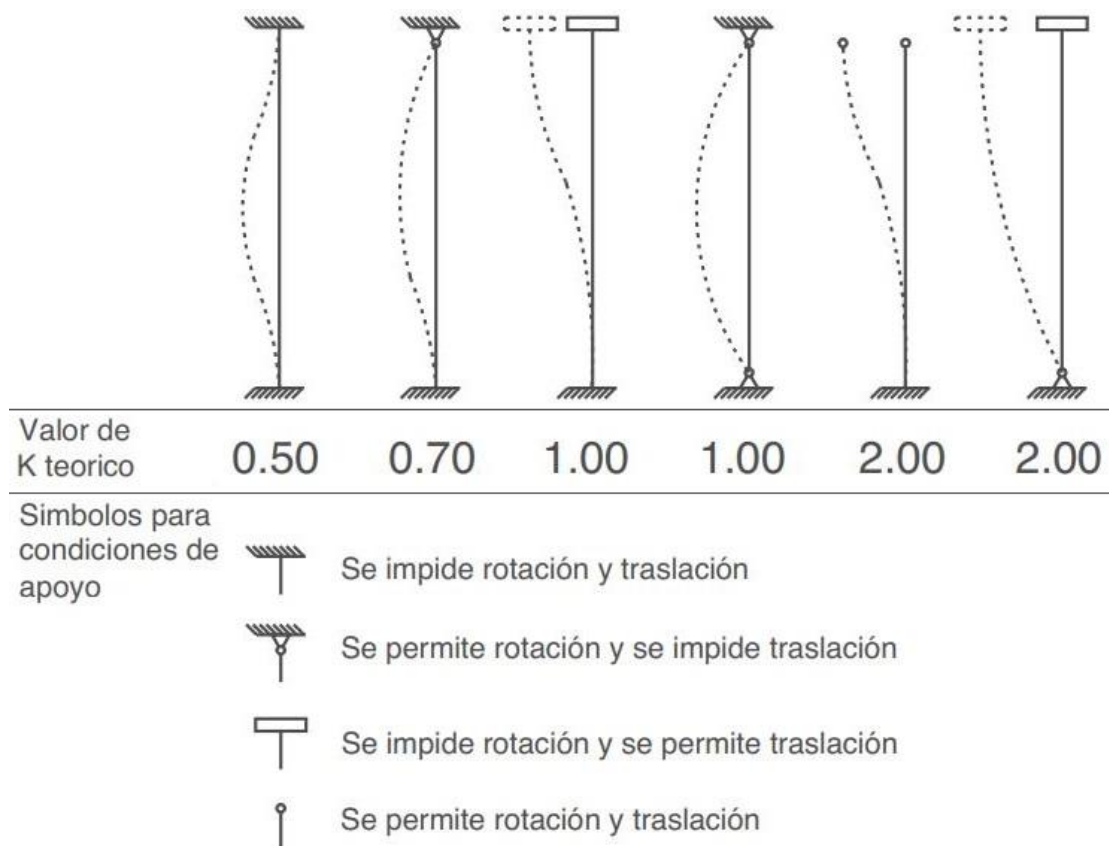


Figura 4.1. Factor de longitud efectiva. Fuente: American Institute of Steel Construction. AISC 360-2010.

Para el diseño de miembros en compresión, el coeficiente de reducción de resistencia se considera como $F_{ic} = 0.9$. De esta forma, la fuerza de compresión que resiste el elemento se calcula como se muestra en la ecuación (4.9):

$$P_c = P_n \cdot F_{ic} [N] \quad (4.9)$$

4.3.3 Diseño de miembros en flexión

El momento de flexión máximo nominal (M_n) se debe determinar de acuerdo con lo establecido en la Tabla F1.1 de la norma AISC 360-2010 [17]. En esta se especifica, según la sección del perfil, el apartado con el que se debe determinar el momento de flexión máximo.

Según lo que se establece en esta norma se debe considerar que, dependiendo de la esbeltez de cada tipo de perfil, se pueden presentar estados de pandeo lateral o pandeo lateral por flexo-torsión, considerado como un problema similar al de una columna sometida a compresión axial. Estos estados reducen la resistencia máxima del elemento, como se muestra en la Figura 4.2:

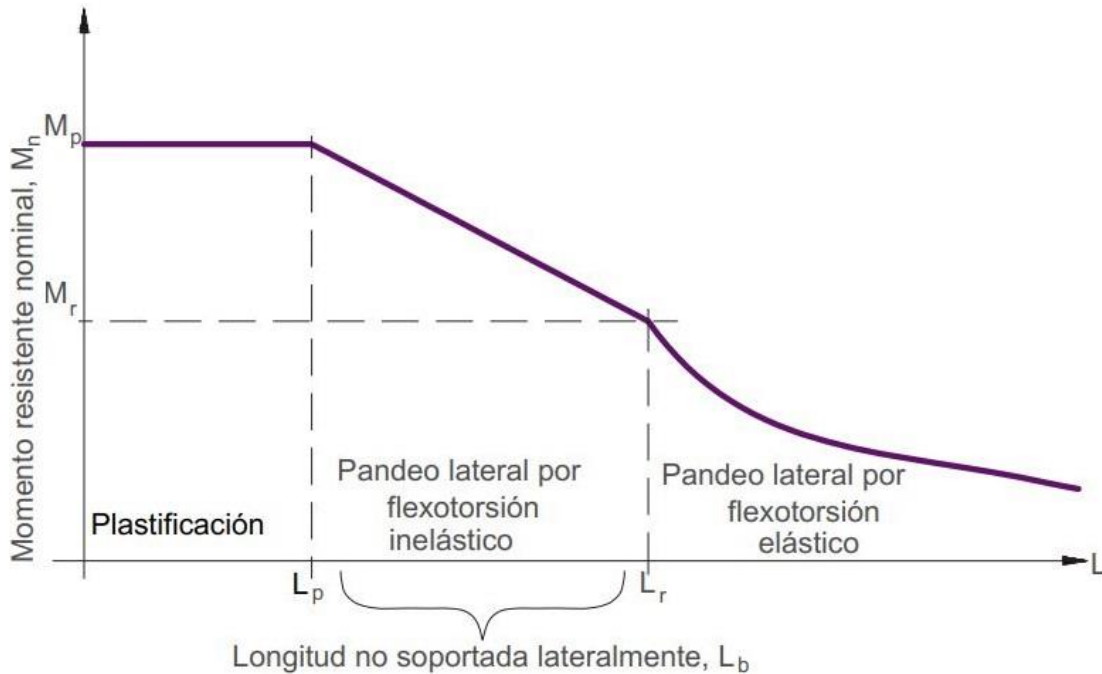
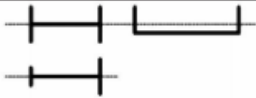


Figura 4.2. Curva de momento resistente nominal. Fuente: Gerdau Corsa. Miembros en Flexión-Trabes y Vigas.

En la Tabla 4.3 se muestra un extracto de la tabla F1.1 de la norma AISC 360-2010 donde, dependiendo del tipo de perfil que se está analizando, se muestra la sección con que se debe calcular el momento de flexión máximo nominal (M_n).

Tabla 4.3. Extracto de la Tabla F1.1 de la norma AISC 360-2010. Fuente: American Institute of Steel Construction. AISC 360-2010.

TABLA Notas F1.1 Tabla de Selección para la Aplicación de las Secciones del Capítulo F				
Sección en Capítulo F	Sección	Esbeltez Ala	Esbeltez Alma	Estados Límites
F2		C	C	Y, LTB
F3		NC, S	C	LTB, FLB
F4		C, NC, S	C, NC	Y, LTB, LLB, TFY
F5		C, NC, S	S	Y, LTB, LLB, TFY
F6		C, NC, S	N/A	Y, LTB
F7		C, NC, S	C, NC	Y, LTB, LLB
F8		N/A	N/A	Y, LTB
F9		C, NC, S	N/A	Y, LTB, LLB
F10		N/A	N/A	Y, LTB, LLB
F11		N/A	N/A	Y, LTB
F12	Perfiles asimétricos diferentes de ángulos simples	N/A	N/A	Todos
Y = fluencia, LTB = pandeo lateral-torsional, FLB = pandeo local ala, WLB = pandeo local alma, TFY = fluencia ala tracción, LLB = pandeo local ala, LB = pandeo local, C = compacto, NC = no-compacto, S = esbelto				

Para el diseño de miembros en flexión, el coeficiente de reducción de resistencia se considera como $F_{ib} = 0.9$. De esta forma, el momento flector que resiste el elemento se calcula como se muestra en la ecuación (4.10):

$$M_c = M_n \cdot F_{ib} [N \cdot m] \quad (4.10)$$

4.3.4 Diseño de miembros en corte

De acuerdo con la norma AISC 360-2010 [17], la resistencia nominal de corte se determina como se muestra en la ecuación (4.11):

$$V_n = 0.6 \cdot \sigma_y \cdot A_w \cdot C_v [N] \quad (4.11)$$

Donde A_w representa el área del alma y C_v es el coeficiente de corte del alma.

Para el diseño del alma de elementos de sección I solo en corte y que cumplen con $h/t_w \leq 2.24 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}$, el coeficiente de corte del alma se toma como $C_v = 1.0$, mientras que el coeficiente de reducción de resistencia se considera como $F_{iv} = 1.0$.

Para el diseño del alma de otros tipos de perfiles, el coeficiente de reducción de resistencia se considera como $F_{iv} = 0.9$ y el coeficiente de corte del alma se calcula según las condiciones de las ecuaciones (4.12), (4.13) y (4.14):

Si se cumple que $\frac{h}{t_w} \leq 1.1 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{\sigma_y}}$:

$$C_v = 1.0 \quad (4.12)$$

O si se cumple que $1.1 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{\sigma_y}} \leq \frac{h}{t_w} \leq 1.37 \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{\sigma_y}}$:

$$C_v = 1.1 \cdot t_w \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{\sigma_y}} \quad (4.13)$$

De otro modo:

$$C_v = \frac{1.51 \cdot E \cdot k_v \cdot t_w^2}{\sigma_y h^2} \quad (4.14)$$

Donde $k_v = 5$, h es la distancia libre entre alas, t_w es el espesor del alma.

De esta manera, la fuerza para miembros en corte se calcula como se muestra en la ecuación (4.15):

$$V_c = V_n \cdot F_{iv} [N] \quad (4.15)$$

4.3.5 Diseño de miembros en torsión

De acuerdo con la norma AISC 360-2010 [17], el momento torsional resistente (T_n) para miembros de sección tubular se debe calcular como se muestra en la ecuación (4.16):

$$T_n = F_{cr} \cdot C [N \cdot m] \quad (4.16)$$

Para casos torsionales, la tensión crítica (F_{cr}) se calcula según las condiciones de las ecuaciones (4.17), (4.18) y (4.19):

Si se cumple que $\frac{h}{t} \leq 2.45 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}$:

$$F_{cr} = 0.6 \cdot \sigma_y [Pa] \quad (4.17)$$

O si se cumple que $2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \leq \frac{h}{t} \leq 3.07 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$:

$$F_{cr} = \frac{0.6 \cdot \sigma_y \cdot t}{h} \left(2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right) [Pa] \quad (4.18)$$

O si $3.07 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \leq \frac{h}{t} \leq 260$:

$$F_{cr} = \frac{0.458 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot t^2}{h^2} [Pa] \quad (4.19)$$

Donde t representa el espesor y h es el ancho plano, como se describe en el apartado B4.1b(d) de la norma AISC 360-2010. [17]

La constante de corte torsional (C) se calcula como se muestra en la ecuación (4.20):

$$C = 2(B - t) \cdot (H - t) \cdot t - 4.5(4 - \pi) \cdot t^3 [m^3] \quad (4.20)$$

Donde B es el ancho y H el alto total del perfil.

De esta forma, el momento torsional resistente se calcula como se muestra en la ecuación (4.21):

$$T_c = T_n \cdot F_{iT} [N \cdot m] \quad (4.21)$$

4.3.6 Diseño de miembros para requerimientos combinados

De acuerdo con la norma AISC 360-2010 [17], la interacción de compresión/tracción y flexión se debe calcular de acuerdo con las condiciones de las ecuaciones (4.22) y (4.23):

Cuando $\frac{P_r}{P_c} \geq 0.2$:

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (4.22)$$

Cuando $\frac{P_r}{P_c} < 0.2$:

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0 \quad (4.23)$$

Donde:

P_r : Fuerza de compresión/tracción aplicada [N]

P_c : Fuerza de compresión/tracción resistente [N]

M_{ri} : Momento de flexión aplicado en cada eje [N·m]

M_{ci} : Momento de flexión de resistente en cada eje [N·m]

De acuerdo con la norma AISC 360-2010 [17], la interacción de compresión/tracción, flexión, cortante y torsión se debe calcular solo si se cumple que el momento torsor aplicado (T_r) es mayor al 20% de T_c . En caso de no cumplir con esta condición, la interacción se debe despreciar. Para verificar esta interacción se debe cumplir con la condición de la ecuación (4.24):

$$\left(\frac{P_r}{P_c} + \frac{M_{rx}}{M_{cx}}\right) + \left(\frac{V_r}{V_c} + \frac{T_r}{T_c}\right)^2 \leq 1.0 \quad (4.24)$$

4.3.7 Criterio de verificación

Para todas las verificaciones que se realizan con la norma AISC 360-2010 [17], se debe cumplir que el valor del ratio, también denominado factor de utilización o factor de carga debe ser siempre menor a 1 ($RAT < 1.0$). De esta forma se considera que el elemento analizado es el correcto y cumple con todas las verificaciones que se realizan.

5 NORMAS APLICABLES AL DISEÑO DE UN GALPÓN INDUSTRIAL

Respecto a las normativas aplicables al diseño de un galpón industrial se prioriza la normativa chilena por sobre la extranjera debido a que el galpón que se debe analizar se encuentra ubicado en la comuna de Colina, en Chile.

Para esto se consideran las disposiciones establecidas en las Normas Chilenas del Instituto Nacional de Normalización.

5.1 Norma Chilena 3171 - 2010

La Norma Chilena 3171-2010: “Disposiciones generales y combinaciones de carga” establece las disposiciones generales y las combinaciones de carga para el diseño de edificios y otras estructuras.

Las cargas y sus combinaciones se establecen tanto para el diseño por resistencia admisible (ASD) como para el diseño por factores de carga y resistencia (LRFD).

Los efectos de las cargas en cada uno de los elementos estructurales deben tomar en cuenta el equilibrio, la estabilidad general, la compatibilidad geométrica y las propiedades de los materiales en el corto y largo plazo.

Las estructuras deben ser diseñadas de manera que, en el caso que se produzcan daños locales, mantengan su integridad estructural y permanezcan estables frente al daño local original. Esto se debe lograr mediante una distribución de los elementos estructurales que provean de estabilidad al sistema estructural completo, de modo que transfieran las cargas en cualquier zona dañada a otras zonas que sean capaces de resistir esas cargas sin colapsar.

5.1.1 Combinaciones de cargas

Las combinaciones de cargas básicas que establece esta norma para cada método de diseño son: [19]

Tabla 5.1. Combinaciones de carga para la metodología ASD y LRFD. Fuente: Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena 3171-2010.

ASD	LRFD
D	$1.4D$
$D + L$	$1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R)$
$D + (L_r \text{ ó } S \text{ ó } R)$	$1.2D + 1.6(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R) + L$
$D + 0.75L + 0.75(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R)$	$1.2D + 1.6(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R) + 0.8W$
$D + W$	$1.2D + 1.6W + L + 0.5(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R)$
$D + E$	$1.2D + 1.4E + L + 0.2S$
$D + 0.75W + 0.75L + 0.75(L_r \text{ ó } S \text{ ó } R)$	$0.9D + 1.6W$
$D + 0.75E + 0.75L + 0.75S$	$0.9D + 1.4E$
$0.6D + W$	
$0.6D + E$	

Se debe utilizar la combinación de cargas que produzca el efecto más desfavorable sobre la estructura, lo cual puede ocurrir cuando una o más cargas no están presentes. Estas combinaciones de carga no son exhaustivas y se debe considerar que para el diseño sísmico prevalecen las disposiciones de la norma específicas de diseño sísmico Norma Chilena 2369-2003.

A continuación, se define lo que representa cada término:

5.1.2 Carga permanente (*D*)

De acuerdo con la Norma Chilena 2369-2003 [20], una carga permanente se entiende como una acción cuya variación en el tiempo es despreciable en relación con sus valores medios o aquella para la cual la variación tiende a un límite. De acuerdo con esta definición se deben incluir bajo este concepto a:

- Peso propio de los elementos estructurales y terminaciones.
- Peso propio de equipos fijos e instalaciones.
- Contenido normal de recipientes, tolvas, correas y equipos.
- Peso de ductos sin sus acumulaciones ni incrustaciones. Aislaciones.
- Empujes permanentes.

Según la Norma Chilena 1537-2009 [21], representa el peso de todos los materiales de construcción incorporados dentro de la edificación, lo que incluye entre otros: muros, losas, cielos, techos, escaleras, tabiques, terminaciones, revestimientos y similares incorporados en la estructura, incluyendo el peso de los equipos de izaje.

5.1.3 Carga sísmica (*E*)

Las cargas sísmicas se definen como las fuerzas horizontales y/o verticales equivalentes inducidas por el movimiento sísmico. Estas se determinan según la Norma Chilena 2369-2003.

5.1.4 Carga de uso o cargas vivas (*L*)

De acuerdo con la Norma Chilena 1537-2009 [21], las cargas de uso se consideran como las cargas de ocupación de la edificación. Dentro de estas no se incluyen cargas de construcción o ambientales, como cargas de viento, nieve, lluvia, sismo o cargas permanentes.

También se pueden definir como las cargas variables causadas por el uso y ocupación de edificios o estructuras. Se pueden considerar cargas debido al tránsito de

personas, depósitos de carga, vehículos y pesos de gases, líquidos y materiales que pueden variar en el tiempo.

5.1.5 Carga de uso de techo (L_r)

De acuerdo con la Norma Chilena 1537-2009 [21], una carga de uso de techo se considera como la carga generada sobre el techo debido a labores de mantención por trabajadores, equipos y materiales, así como también aquellos objetos móviles como plantas o accesorios decorativos de pequeño tamaño.

5.1.6 Carga de lluvia (R)

La carga de lluvia se define como la fuerza que actúa sobre la estructura debido a la acción de la lluvia.

5.1.7 Carga de nieve (S)

La carga de nieve se define como la fuerza que actúa sobre la estructura debido a la acumulación de nieve. Esta se calcula según la Norma Chilena 431-2010. Aquellos casos no cubiertos por esta norma serán considerados según la norma ASCE-07-2005.

5.1.8 Carga de viento (W)

Las cargas de viento se definen como las fuerzas horizontales y/o verticales producidas debido a la presión del viento que actúa sobre la estructura, las cuales deben ser calculadas mediante la Norma Chilena 432-2010.

5.2 Norma Chilena 431 - 2010

La Norma Chilena 431-2010 “Diseño estructural – Sobrecargas de nieve” establece los valores mínimos de las sobrecargas de nieve que se deben emplear en el diseño de construcciones ubicadas en el territorio nacional, excluido el territorio Antártico Chileno. Se aplica para el diseño de estructuras de aquellas construcciones que puedan estar expuestas a cargas de nieve.

La distribución y la magnitud de la carga de nieve sobre una construcción dependen del clima del lugar, del tipo de precipitación, del relieve del entorno, de la forma de la cubierta, de los efectos del viento y de los intercambios térmicos entre las superficies exteriores de la edificación.

De acuerdo con la Norma Chilena 431-2010 [22], las cargas básicas de nieve para techos se determinan según altitud y latitud geográfica. La comuna de Colina se encuentra a 596 m.s.n.m. y en la latitud 33°, con lo cual se obtiene una carga básica de nieve

$$P_g = 0.25 \left[\frac{kN}{m^2} \right].$$

5.3 Norma Chilena 432 - 2010

La Norma Chilena 432-2010 “Diseño estructural – Cargas de viento” establece la forma en que se debe considerar la acción del viento en el cálculo de construcciones.

En esta norma se describen 3 métodos para determinar las cargas de viento:

- Método 1: Procedimiento simplificado
- Método 2: Procedimiento analítico
- Método 3: Túnel de viento

La presión de diseño calculada por alguno de estos 3 métodos no puede ser menor que $0.48 [kPa]$, independientemente de si es un edificio cerrado, parcialmente cerrado u otro tipo de estructura.

El método de diseño que se debe aplicar a la edificación es el método 2 – procedimiento analítico. Para esto, se debe determinar: [23]

- 1) La velocidad básica del viento v y el factor de direccionalidad del viento k_d
- 2) El factor de importancia I
- 3) La categoría de exposición del terreno y los coeficientes de exposición a la velocidad del viento k_z para cada dirección del viento
- 4) El factor topográfico k_{zt}
- 5) El factor del efecto de ráfaga G
- 6) La clasificación del grado de cerramiento de la estructura
- 7) El coeficiente de presión interna GC_{pi}
- 8) Los coeficientes de presión externa GC_{pf}
- 9) La distribución de velocidades q_z
- 10) La carga de diseño de viento p

5.4 Norma Chilena 1537-2009

En la Norma Chilena 1537-2009: “Diseño Estructural – Cargas permanentes y cargas de uso” [21] se establecen las bases que permiten evaluar las cargas permanentes y cargas de uso que se deben considerar en el diseño de edificios y otras estructuras.

Los valores de las sobrecargas de uso dados en esta norma tienen el carácter de valores característicos o valores mínimos según sea el método de diseño que se utilice.

Las cargas de diseño para las vigas carrileras, incluyendo conexiones y abrazaderas de apoyo, deben incluir la máxima carga por rueda de la grúa, las fuerzas de impacto vertical, lateral y longitudinal inducidas por su movimiento.

5.4.1 Carga máxima de rueda

La carga máxima de rueda se produce debido al peso del puente grúa, el peso del carro y la carga máxima de levante, con el carro posicionado en el riel en la ubicación donde el efecto de la carga resultante sea máximo.

5.4.2 Fuerza de impacto vertical

La fuerza de impacto vertical, según esta norma, debe ser considerada como la carga máxima de rueda de la grúa incrementada en un 10%.

5.4.3 Fuerza lateral

La fuerza lateral representa la carga dinámica que se produce durante el frenado del carro de traslación. Esta se calcula como un 20% de la suma del peso del carro y la capacidad de levante.

5.4.4 Fuerza longitudinal

La fuerza longitudinal representa la carga dinámica que se produce durante el frenado del puente grúa. Esta se calcula como el 10% de la carga máxima por rueda de la grúa y se debe suponer actuando horizontalmente en la parte superior de la viga.

5.5 Norma Chilena 2369-2003

En la Norma Chilena 2369-2003 “Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales” se establecen los requisitos mínimos para el diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, livianas o pesadas. Se aplica tanto a estructuras propiamente tales como a los sistemas de ductos y cañerías y a los equipos de proceso, mecánicos y eléctricos y a sus anclajes. También se aplica a las estructuras de bodegas o recintos de vocación industrial y a las construcciones estructuradas con columnas en voladizo. Sin embargo, esta norma no se aplica a otros tipos de estructuras tales como centrales nucleares, centrales de energía eléctrica y líneas de transmisión, presas, tranques de relaves, puentes, túneles, muelles gravitacionales, muros de contención, líneas de ductos enterradas, etc. [20]

Para este trabajo de título, corresponde trabajar con esta norma ya que la instalación es del tipo industrial.

Las disposiciones de diseño de esta norma, aplicadas en conjunto con las normas de diseño específicas de cada material, están orientadas al cumplimiento de los siguientes objetivos:

- a) Protección de vida en la industria
 - Evitar el colapso de estructuras para sismos más severos que el sismo de diseño.
 - Evitar incendios, explosiones o emanaciones de gases y líquidos tóxicos.
 - Proteger el medio ambiente.
 - Asegurar la operatividad de las vías de escape durante la emergencia sísmica.
- b) Continuidad de operación de la industria
 - Mantener los procesos y servicios esenciales.

- Evitar o reducir a un tiempo mínimo la paralización de la operación de la industria.
- Facilitar la inspección y reparación de los elementos dañados.

Para cumplir con el objetivo de evitar el colapso de la estructura ante sismos más severos que el sismo de diseño, las estructuras deben tener amplia reserva de resistencia y/o ser capaces de absorber grandes cantidades de energía, más allá del límite elástico, antes de fallar. Para estos efectos el sistema estructural global debe cumplir con los requisitos siguientes:

- a) Asegurar un comportamiento dúctil de los elementos resistentes y sus conexiones para evitar fallas por inestabilidad o fragilidad o, alternativamente, asegurar el comportamiento elástico.
- b) Proveer más de una línea de resistencia para las sollicitaciones sísmicas. Los sistemas sismorresistentes deben ser redundantes e hiperestáticos.
- c) Disponer de sistemas simples y claramente identificables para la transmisión de los esfuerzos sísmicos a las fundaciones, evitando estructuraciones de alta asimetría y complejidad.

Para cumplir con los objetivos de continuidad de la operación de la industria, evitar incendios, explosiones, o emanaciones de gases y líquidos tóxicos y proteger el medio ambiente, las estructuras, equipos y anclajes se deben diseñar para que durante sismos más severos que el sismo de diseño se cumplan los requisitos siguientes, en adición a los anteriores:

- a) Limitar las incursiones en el rango no elástico, en el caso de que ellas pongan en peligro la continuidad de la operación.
- b) Los daños se deben producir en lugares visibles y accesibles
- c) Los equipos de emergencia y control, cuya operación durante la emergencia debe ser garantizada, deben estar debidamente calificados de acuerdo a normas internacionales, con la aprobación de los ingenieros de proceso y el profesional especialista.

De acuerdo con esta norma, se deben tener en consideración los siguientes tipos de cargas: [20]

5.5.1 Sobrecargas de uso (SC)

Acciones de naturaleza estática, variables en el tiempo que se determinan por la función y uso del edificio y sus instalaciones. Presenta variaciones frecuentes o continuas no despreciables con relación a su valor medio. De acuerdo con esta definición se deben incluir bajo este concepto a:

- Cargas uniformes correspondientes al uso de pisos y plataformas y que consideran el tránsito normal de personas, vehículos, equipos móviles menores y acumulaciones de materiales.
- Incrustaciones y acumulaciones de polvos en ductos, equipos y estructuras.
- Cargas de levante de grúas.
- Presiones de agua o tierra no permanentes.
- Presiones interiores en recipientes.
- Tensiones de correas y similares.

5.5.2 Sobrecargas especiales de operación (SO)

Acciones dinámicas provenientes del uso normal de las instalaciones. De acuerdo con esta definición se deben incluir bajo este concepto a:

- Impactos y cargas de origen dinámico en general, aunque se modelen como acciones estáticas equivalentes.
- Acciones de frenado.
- Acciones debidas a líquidos o gases en movimiento, por ejemplo, el golpe de ariete.

5.5.3 Sobrecargas accidentales de operación (SA)

Acciones provenientes de fenómenos operacionales que ocurren solo ocasionalmente durante el uso normal de las instalaciones: De acuerdo con esta definición se deben incluir bajo este concepto a:

- Impactos extremos y explosiones.
- Cargas de cortocircuito.
- Cargas de sobrellenado de estanques y tolvas.

Las combinaciones de carga que se deben adicionar a las establecidas en la Norma Chilena 3171-2010 son:

- Combinaciones de carga según el método ASD

$$D + a \cdot SC + SO + SA \pm E_{Horizontal} \pm E_{Vertical} \quad (5.1)$$

$$D + SA \pm E_{Horizontal} \pm E_{Vertical} \quad (5.2)$$

- Combinaciones de carga según el método LRFD

$$1.2 \cdot D + a \cdot SC + SO + SA \pm b \cdot E_{Horizontal} \pm b \cdot E_{Vertical} \quad (5.3)$$

$$0.9 \cdot D + SA \pm b \cdot E_{Horizontal} \pm 0.3 \cdot E_{Vertical} \quad (5.4)$$

Los factores para las combinaciones de carga de las ecuaciones (5.1), (5.2), (5.3) y (5.4) son $a = 1.0$ y $b = 1.1$, debido a que es una estructura de acero.

El método de análisis a usar es el método lineal estático o de fuerzas equivalentes. La estructura debe ser analizada para las acciones sísmicas en dos direcciones horizontales perpendiculares.

6 BASES GENERALES DE CÁLCULO

La verificación estructural se realizó usando el software Robot Structural Analysis Professional con elementos tipo viga, como se muestra en la Figura 6.1 y Figura 6.2.

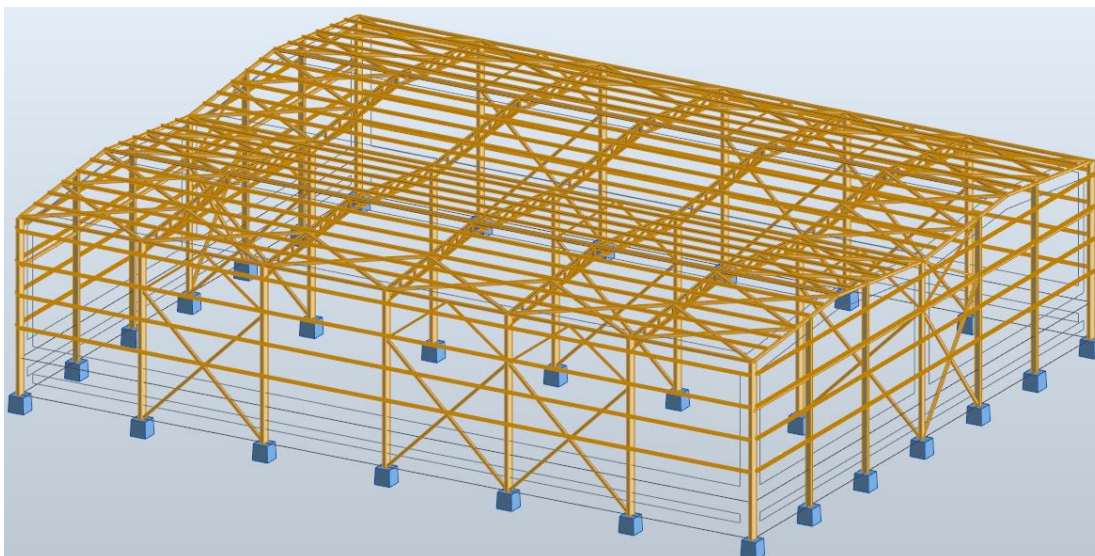


Figura 6.1. Modelación estructural en vista 3D. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk



Figura 6.2. Modelación estructural en vista frontal. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

En el ANEXO A se muestran diferentes vistas de la estructura del galpón industrial donde se enumeran los elementos para una mejor comprensión.

6.1 Consideraciones generales

La verificación estructural del galpón industrial se hace en conformidad con los criterios de diseño estructural definidos por las normativas anteriormente señaladas. El método de diseño elegido para verificar la estructura es el LRFD (Load and Resistance Factor Design), ya que el método ASD es considerado actualmente como obsoleto para este propósito.

Se distinguen 3 tipos de materiales y/o componentes generales de la estructura:

- Perfiles: Acero A42/27 ES, $\sigma_{fl} = 270 [MPa]$; $\sigma_{m\acute{a}x} = 420 [MPa]$.
- Uniones: Soldadura al arco E-7018, $\sigma_{fl} = 390 [MPa]$; $\sigma_{m\acute{a}x} = 480 [MPa]$.
- Paneles: tipo PIT de 0.5 [mm].

Dado que las uniones tienen una resistencia nominal mayor que la del material de los perfiles no se debe evaluar directamente la soldadura en las simulaciones, sino que se calculan los esfuerzos en los puntos de unión para los perfiles.

No se considera la resistencia de los paneles usados para el techo y laterales, ya que esta queda condicionada por la separación entre los puntos de apoyo.

Los puentes grúa seleccionados, de acuerdo con los requerimientos planteados por la empresa, son clase C - CMAA, monorraíl y de estructura elevada. Las cotizaciones de ambos puentes grúa se muestran en el ANEXO B.

Las cargas que actúan sobre la estructura del galpón industrial son:

6.1.1 Cargas permanentes

Como cargas permanentes se tienen las siguientes:

- Peso propio de la estructura: Se considera que el acero tiene una densidad $\rho_{Acero} = 7.85 \left[\frac{ton}{m^3} \right]$. El peso propio de la estructura se muestra en la Tabla 6.1.
- Peso propio de los revestimientos laterales y de techo se considera plancha tipo PIT de 0,5 [mm] cuyo peso propio es $5 \left[\frac{kg}{m^2} \right]$. El peso propio debido a estos revestimientos se muestra en la Tabla 6.2.
- Masa del puente grúa de capacidad 5 toneladas (Incluye carro y tecla): 3930 [kg]. (Cotización en ANEXO B).
- Masa del puente grúa de capacidad 10 toneladas (Incluye carro y tecla): 5900 [kg]. (Cotización en ANEXO B).

Se consideró el peso propio de los puentes grúa en la condición más desfavorable para la estructura, como se muestra en la Figura 6.3.

En la Tabla 6.1 se muestran las cubicaciones de ingeniería para la estructura del galpón industrial, donde se obtiene que la carga producto de la masa de todas las columnas y vigas es de 1011,64 [kN].

Tabla 6.1. Cubicación de la estructura de acero luego del rediseño. Fuente: Elaboración propia.

Perfiles de Acero Estructura	Tipo perfil	Cantidad	Largo [m]	Área [mm ²]	Peso Total [kN]
	Tubest 550x200	15	10.00	8540	98.65
		4	10.70	8540	28.15
	Tubest 350x200	8	11.34	5872	41.02
		2	10.70	5872	9.68
	C Cercha M (UPE 120)	100	0.70	1480	7.98
		10	0.70	1480	0.80
	C Cercha L (UPE 120)	80	1.69	1480	15.41
		40	1.82	1480	8.30
	UPE 200	40	9.65	2828	84.06
	IPE 120	12	8.00	2960	21.88
	IPE 140	168	8.00	3560	368.46
		48	6.40	3560	84.22
	Cuadrado 100x100x5	18	4.97	1900	13.09
	Cuadrado 150x150x5	2	7.05	2900	3.15
		2	7.34	2900	3.28
		18	11.14	2900	44.78
		48	9.34	2900	100.12
		18	8.00	2900	32.16
		8	9.65	2900	17.24
		12	6.40	2900	17.15
	Cuadrado 200x200x5	4	10.05	3900	12.07
	Total				1011.64

En la Tabla 6.2 se muestra la cubicación realizada para calcular el peso de los paneles PIT de 0,5 [mm], con lo que se obtiene que estos agregan 159,25 [kN] al peso propio.

Tabla 6.2. Cubicación de los revestimientos laterales y de techo. Fuente: Elaboración propia.

	Área [m ²]	Cantidad	Peso Total [kN]
Cerramientos PIT	408	2	39.98
	172.42	4	33.79
	436.1	4	85.48
Total			159.25

6.1.2 Cargas de operación e impacto

Para calcular las cargas de operación e impacto se debe considerar el caso más desfavorable para la estructura. Este ocurre cuando ambos carros, con sus respectivas cargas máximas de levante, se encuentran en un extremo del puente grúa coincidiendo en la misma columna, como se muestra en la Figura 6.3.

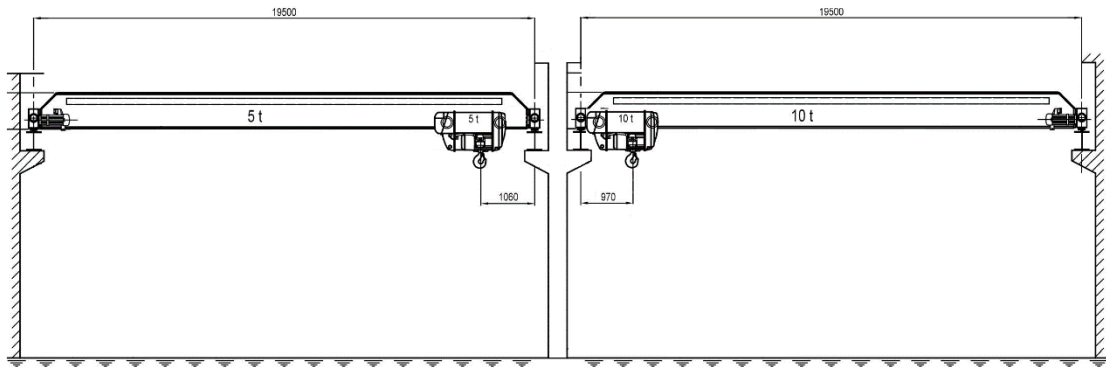


Figura 6.3. Caso más desfavorable para cálculo de fuerzas de impacto. Fuente: Elaboración Propia

Los pesos que se deben considerar para calcular las cargas de operación e impacto se muestran en la Tabla 6.3:

Tabla 6.3. Pesos de la grúa, viga testera, tecla y carga máxima de levante para puentes grúa de 5 y 10 toneladas de capacidad de levante. Fuente: Cotización INAMAR.

Capacidad de la grúa	5 toneladas	10 toneladas
Masa Grúa [kg]	3547	5176
Masa Carro + Tecla [kg]	383	724
Carga Máxima Levante [kg]	5000	10000

De esta forma se calcula la carga de rueda para ambos puentes grúa, como se muestra en la Tabla 6.4:

Tabla 6.4. Cargas de rueda para el lado más y menos cargado para ambos puentes grúa. Fuente: Elaboración propia.

5 toneladas		10 toneladas	
R1 [kN]	R2 [kN]	R1 [kN]	R2 [kN]
33.67	10.13	62.68	15.31

En la Figura 6.4 se muestra la distribución de las cargas de rueda para un puente grúa:

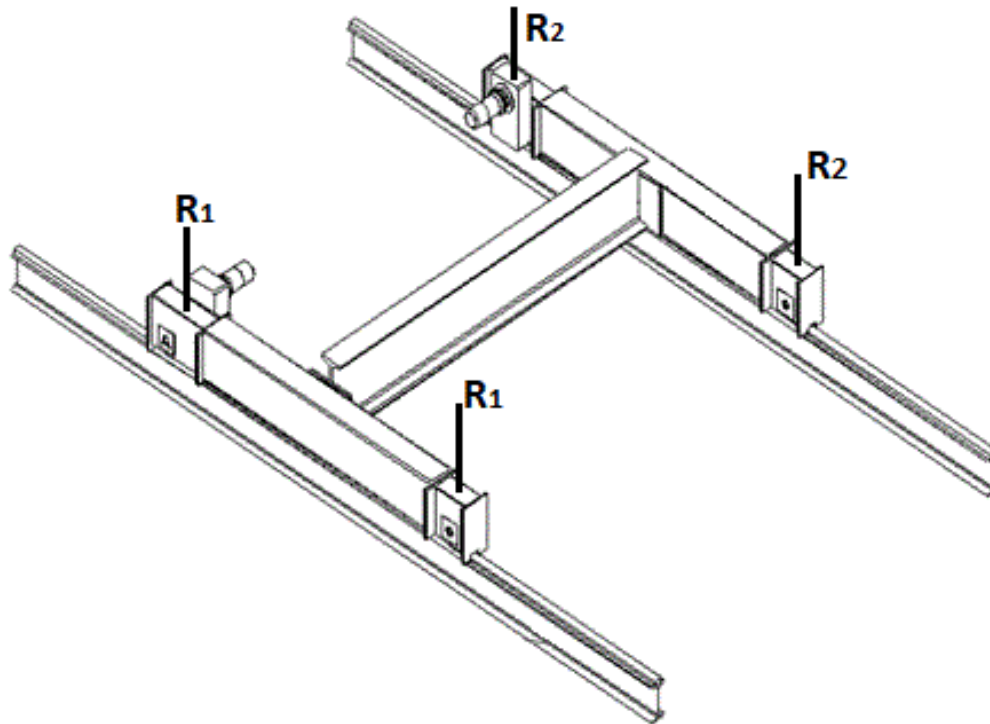


Figura 6.4. Carga de rueda sobre la viga testera. R₁ representa el lado más cargado. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Norma Chilena 1537-2009, se deben considerar las cargas que se describen en la Tabla 6.5:

Tabla 6.5. Fuerza longitudinal, lateral y de impacto vertical por rueda para ambos puentes grúa. Fuente: Elaboración propia.

5 toneladas	Fuerza Impacto Vertical [kN]	110% (Carga máxima rueda)	R1	37.03
			R2	11.15
	Fuerza Longitudinal [kN]	10% (Carga máxima rueda)	R1	6.73
			R2	2.03
	Fuerza Lateral [kN]	20% (Carga + Peso carro)		10.56
10 toneladas	Fuerza Impacto Vertical [kN]	110% Carga máxima rueda	R1	68.95
			R2	16.84
	Fuerza Longitudinal [kN]	10% Carga máxima rueda	R1	12.54
			R2	3.06
	Fuerza Lateral [kN]	20% (Carga + Peso carro)		21.04

Estas cargas se distribuyen sobre la estructura como se muestra en la Tabla 6.6:

Tabla 6.6. Distribución de las fuerzas longitudinales, laterales y de impacto vertical sobre las columnas de la estructura. Fuente: Elaboración propia.

C1	Vertical [kN]	22.3
	Lateral [kN]	0
	Longitudinal [kN]	4.05
C2	Vertical [kN]	211.96
	Lateral [kN]	10.48
	Longitudinal [kN]	38.54
C3	Vertical [kN]	33.68
	Lateral [kN]	0
	Longitudinal [kN]	6.12

Donde C1 representa la columna sobre la cual se encuentra apoyada en uno de sus extremos el puente grúa de 5 toneladas, C2 representa la columna sobre la cual se encuentran apoyados ambos puentes grúa en sus extremos y C3 representa la columna sobre la cual se encuentra apoyada en uno de sus extremos el puente grúa de 10 toneladas.

Estas fuerzas se aplican en el modelo de Robot Structural Analysis de acuerdo con la dirección y sentido de la fuerza inercial producto de la aceleración de la operación.

6.1.3 Cargas de nieve

La carga de nieve para techos inclinados en más de 5° se calcula como se muestra en la ecuación (6.1):

$$P_f = 0.7 \times C_e \times C_t \times I \times P_g \times C_s \text{ [kPa]} \quad (6.1)$$

Donde:

C_e : Factor de exposición

C_t : Factor térmico

I : Factor de importancia según Norma Chilena 3171-2010

C_s : Factor de pendiente

Esta carga de nieve, según la Norma Chilena 431-2010, debe cumplir con la condición de la ecuación (6.2)

$$P_f > I \times P_g \text{ [kPa]} \quad (6.2)$$

De acuerdo con la Tabla 2 de la Norma Chilena 431-2010, $C_t = 1.0$, ya que la condición térmica que aplica es “todas las estructuras”.

De acuerdo con la Norma Chilena 432-2010, la categoría del terreno es “C” y la exposición de techos corresponde a “totalmente expuesto”, por lo cual el factor de exposición $C_e = 0.9$.

Para determinar el factor de pendiente y de acuerdo con la Figura 6.5, considerando que el techo tiene una pendiente de 5.7° se obtiene que $C_s = 1.0$.

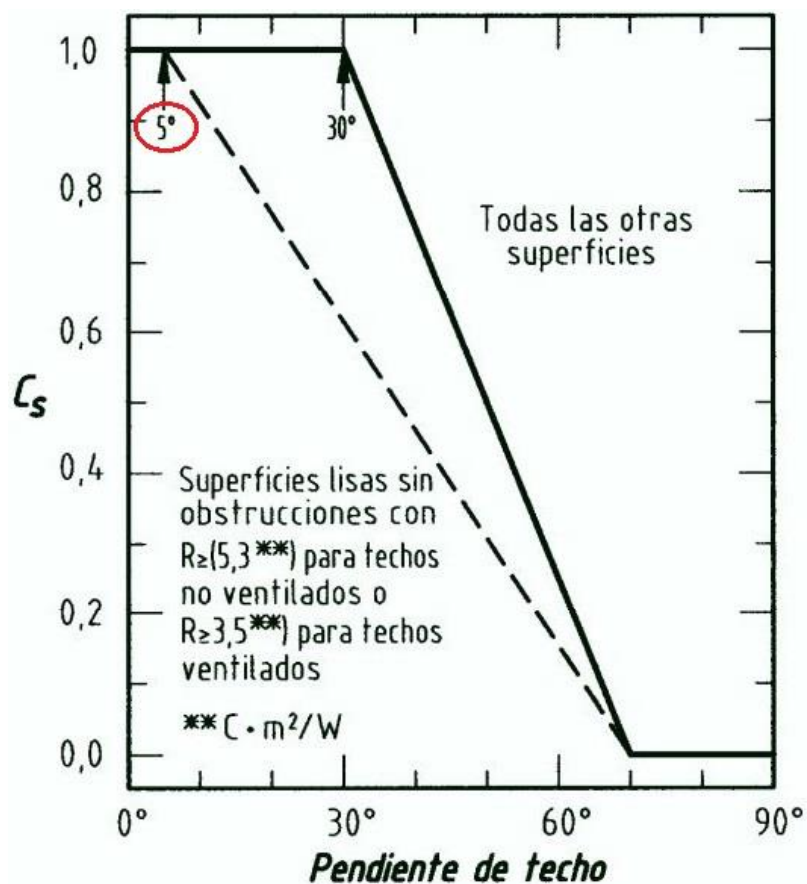


Figura 6.5. Determinación del Factor de Pendiente C_s para techos con $C_t \leq 1.0$. Fuente: Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena 431-2010.

El factor de importancia se determina según la categoría de ocupación de la edificación, de acuerdo con la Norma Chilena 3171-2010. La categoría de ocupación es III, por lo cual el factor de importancia $I = 1.1$. De esta forma, la carga de nieve se calcula como se muestra en la ecuación (6.1):

$$P_f = 0.7 \times 0.9 \times 1.0 \times 1.1 \times 0.25 \times 1.0 = 173.25 \text{ [Pa]}$$

Sin embargo, y de acuerdo con la condición expuesta en la ecuación (6.2), la carga de nieve no puede ser menor que:

$$P_f = 1.1 \times 0.25 \text{ [kPa]} = 0.275 \text{ [kPa]}$$

Por lo cual esta última es considerada como la carga de nieve P_f . Esta carga se aplica sobre las cerchas de la estructura de acuerdo con el área tributaria que le corresponde a cada una.

En la Norma Chilena 431-2010 se establece que se debe tomar en cuenta una carga de nieve balanceada y una carga de nieve desbalanceada. De esta manera se obtienen las siguientes cargas:

6.1.3.1 Balanceada

La carga de nieve balanceada se calcula y distribuye sobre la estructura como se muestra en la Figura 6.6:

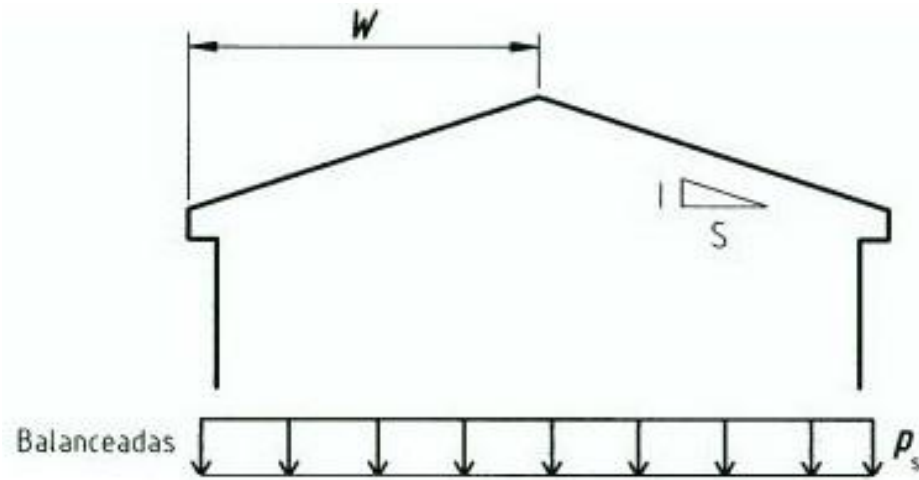


Figura 6.6. Carga de nieve balanceada. Fuente: Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena 431-2010.

Considerando la separación que existe entre las cerchas de techo, la carga de nieve balanceada se distribuye como:

$$P_{S_{Centro}} = 2.2 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

$$P_{S_{Extremos}} = 1.1 \left[\frac{kN}{m} \right]$$

6.1.3.2 Desbalanceada

La carga de nieve desbalanceada se calcula y distribuye sobre la estructura como se muestra en la Figura 6.7:

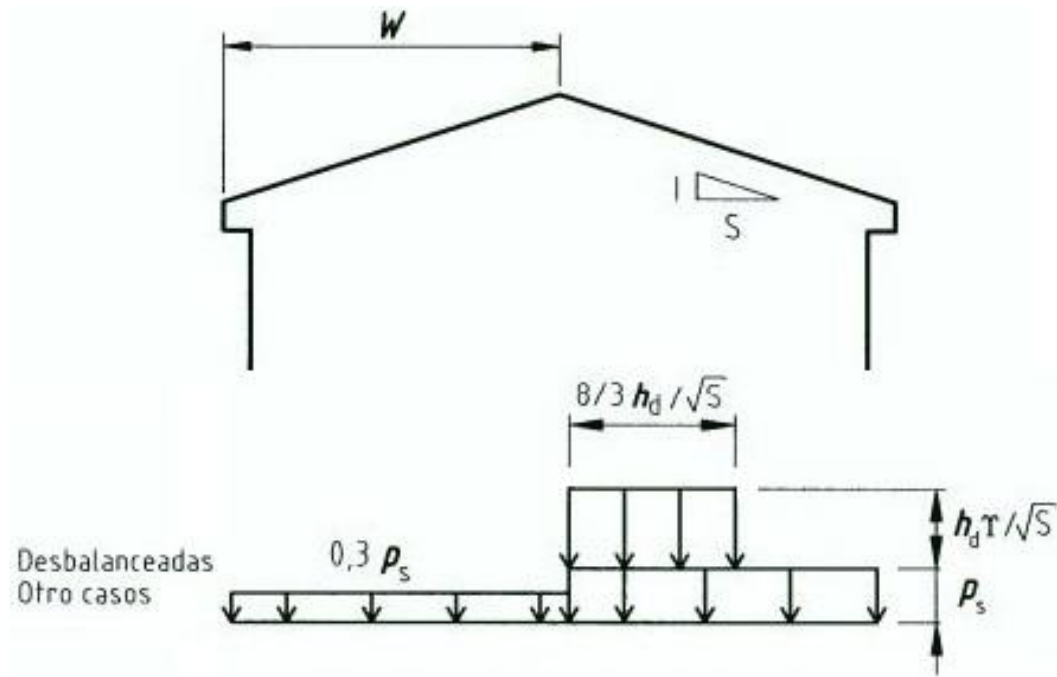


Figura 6.7. Carga de nieve desbalanceada. Fuente: Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena 431-2010.

Teniendo en consideración lo expuesto en la Norma Chilena 431-2010, los coeficientes son los siguientes:

$$I_u = 9.6 [m]; h_d = 0.3 [m]; S = 10 [m]; \gamma = 2.31 \left[\frac{kN}{m^3} \right]; P_g = 0.25 [kPa]$$

De esta forma se obtiene que:

$$0.3 \cdot P_s = 0.0825 [kPa] \quad (6.3)$$

$$\frac{h_d \cdot \gamma}{\sqrt{S}} = 0.219 [kPa] \quad (6.4)$$

$$\frac{8 \cdot h_d}{3 \cdot \sqrt{S}} = 0.253 [m] \quad (6.5)$$

$$P_s = 0.275 [kPa] \quad (6.6)$$

Tomando en cuenta la separación que existe entre las cerchas de techo, la carga de nieve desbalanceada se distribuye como se muestra en la Figura 6.8 y la Figura 6.9:

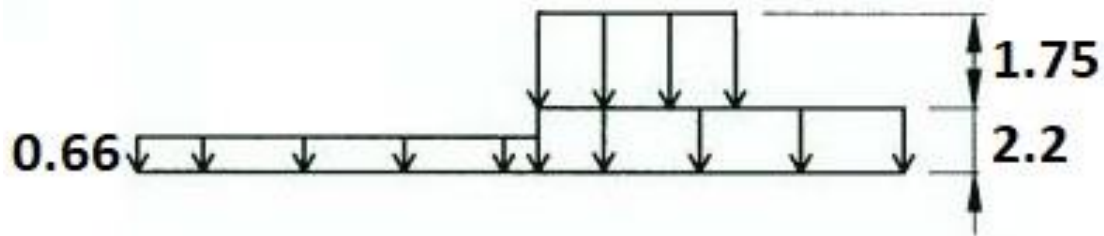


Figura 6.8. Valores de las cargas de nieve desbalanceadas para cerchas del centro. Valores en [kN/m].
Fuente: Elaboración propia.

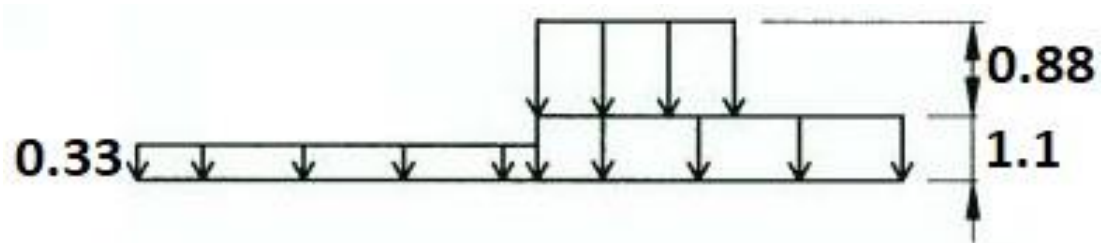


Figura 6.9. Valores de las cargas de nieve desbalanceadas para las cerchas de los extremos. Valores en [kN/m]. Fuente: Elaboración propia.

Al ingresar estas cargas al software se obtienen las cargas mostradas en la Figura 6.10 y la Figura 6.11:

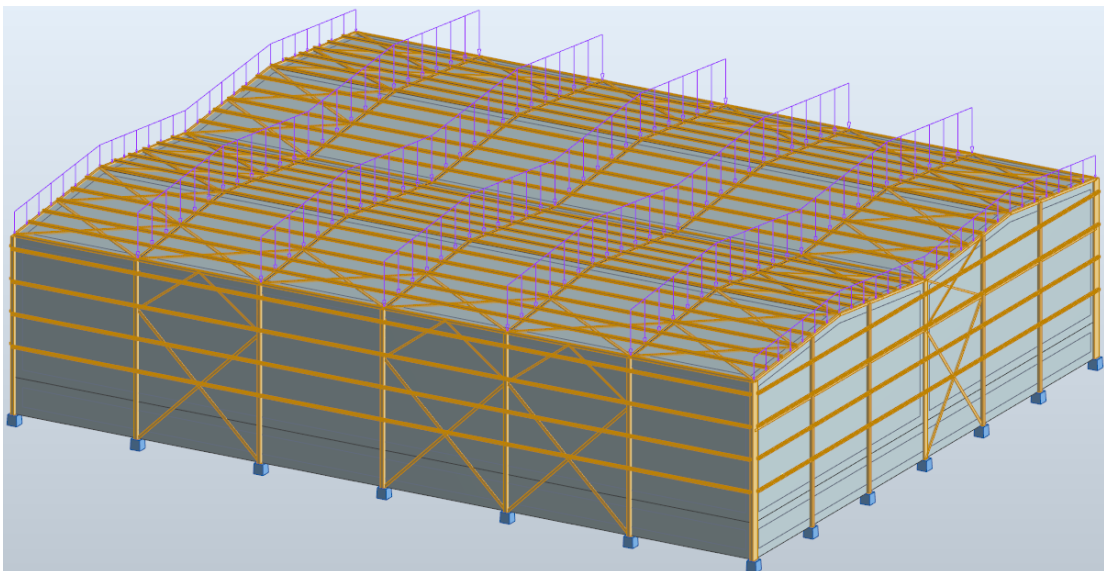


Figura 6.10. Cargas de nieve balanceadas en la estructura modelada en Robot Structural Analysis Professional. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

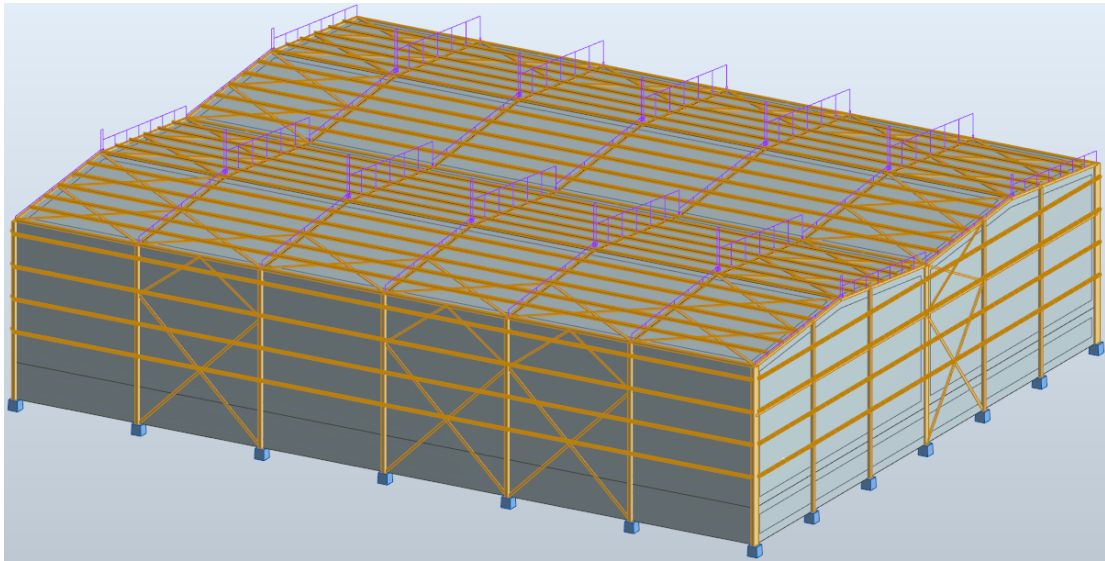


Figura 6.11. Cargas de nieve desbalanceadas en la estructura modelada en Robot Structural Analysis Professional. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

6.1.4 Cargas de viento

De acuerdo con la Norma Chilena 432-2010 “Diseño estructural – Cargas de viento”, para la generación de las cargas de viento sobre la estructura, se debe seguir el procedimiento de diseño propuesto por el método 2 – procedimiento analítico.

El procedimiento para la generación de las cargas de viento sobre la estructura requiere que se determinen los siguientes parámetros:

- La velocidad del viento se calcula según la latitud y tiene un valor de $v = 30 \left[\frac{m}{s} \right]$. De acuerdo con esta norma, se debe asumir que el viento proviene desde cualquier dirección horizontal. Adicionalmente, el factor de direccionalidad del viento $k_d = 0.85$.
- El factor de importancia I se determina basándose en la categoría de ocupación definida anteriormente, el cual corresponde a Categoría III por lo cual se obtiene que $I = 1.15$.
- La categoría de exposición corresponde a “Exposición C” y el coeficiente de exposición a la velocidad del viento $k_z = 1.02$
- El factor topográfico es $K_{zt} = 1.0$, ya las condiciones de sitio y localización de la estructura no corresponde a las especificadas en el apartado 7.7.1 de esta norma. [23]
- El factor del efecto de ráfaga se debe calcular según el apartado 7.8 de esta norma [23], con lo cual se obtiene $G = 1.13$.
- La estructura clasifica como una estructura cerrada.
- De acuerdo con el apartado 7.11 de esta norma, los coeficientes de presión interna para una estructura cerrada son $GC_{pi} = \pm 0.18$.

De esta forma, se puede calcular la distribución de velocidades como se muestra en la ecuación (6.7):

$$q_z = 0.613 \cdot k_z \cdot k_{zt} \cdot k_d \cdot I \cdot v^2 [kPa] \quad (6.7)$$

$$q_z = 0.55 [kPa]$$

La Norma Chilena 432-2010 “Diseño estructural – Cargas de viento” se basa en la Norma ASCE 7-05. [24] Robot Structural Analysis Professional incluye entre sus características la generación de cargas de viento según la Norma ASCE 7-2005, por lo tanto, las cargas de viento se simularon directamente en el software en su versión 2016.

Para la simulación se consideró una presión de $0.55 [kPa]$. Las simulaciones realizadas se muestran en las Figura 6.12, Figura 6.13, Figura 6.14 y Figura 6.15:

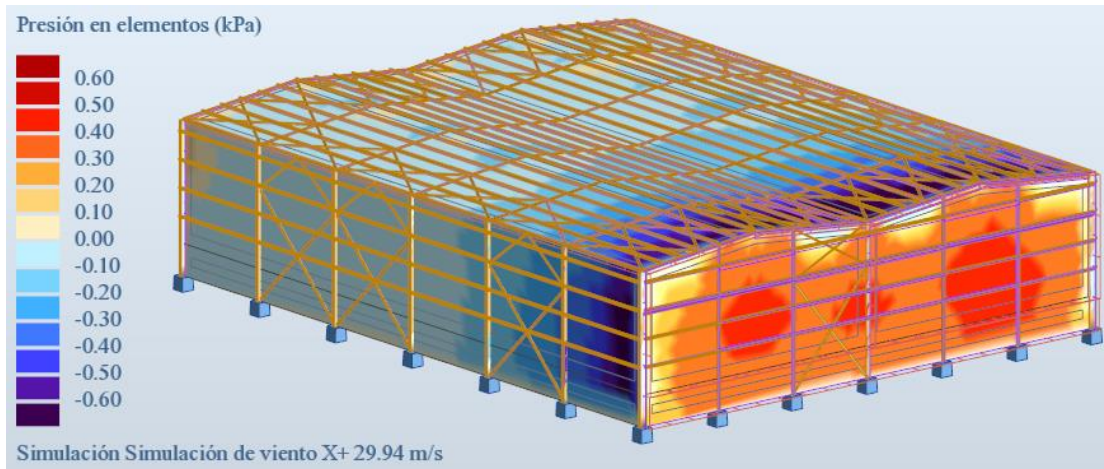


Figura 6.12. Simulación de viento con incidencia frontal vista a barlovento. Fuente: Elaboración propia.
Producido por un producto educativo de Autodesk

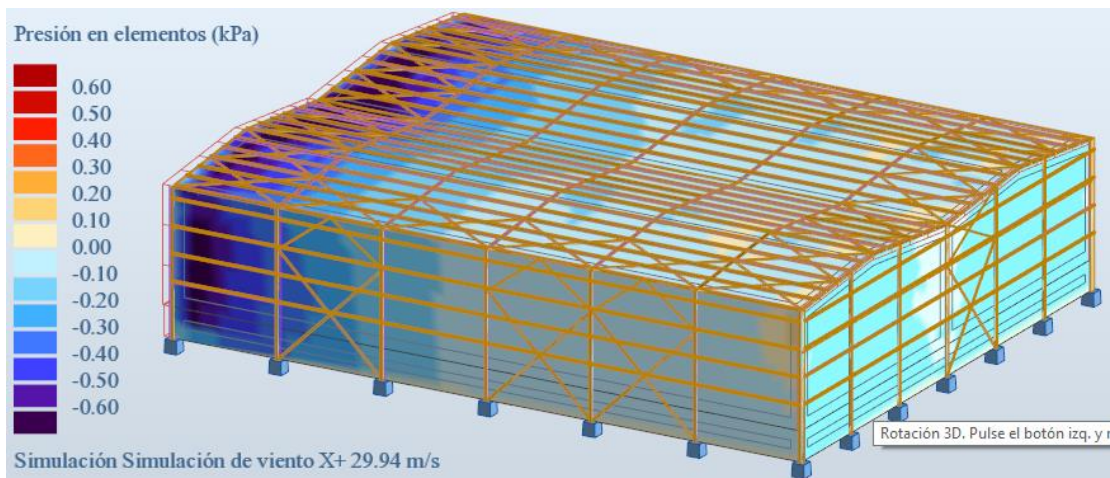


Figura 6.13. Simulación de viento con incidencia frontal vista a sotavento. Fuente: Elaboración propia.
Producido por un producto educativo de Autodesk

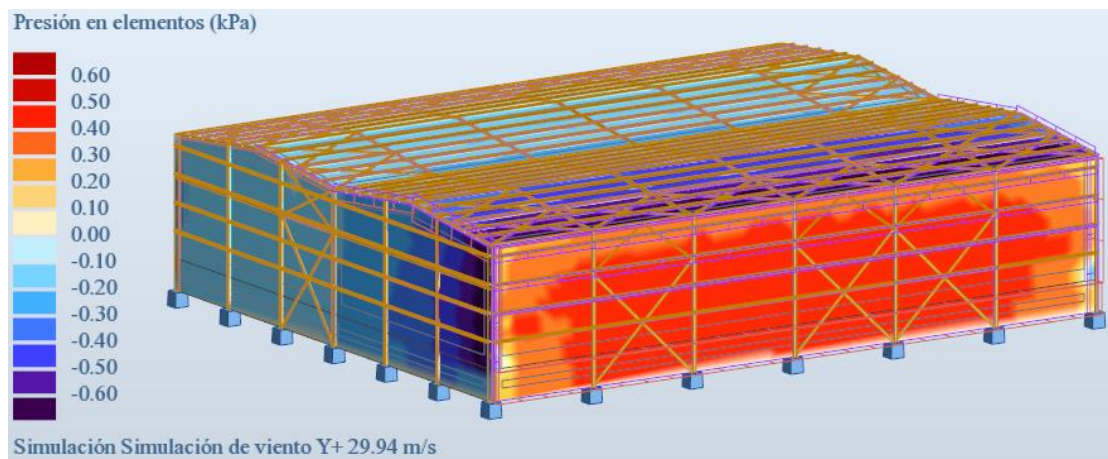


**Figura 6.14. Simulación de viento con incidencia lateral vista a barlovento. Fuente: Elaboración propia.
Producido por un producto educativo de Autodesk**

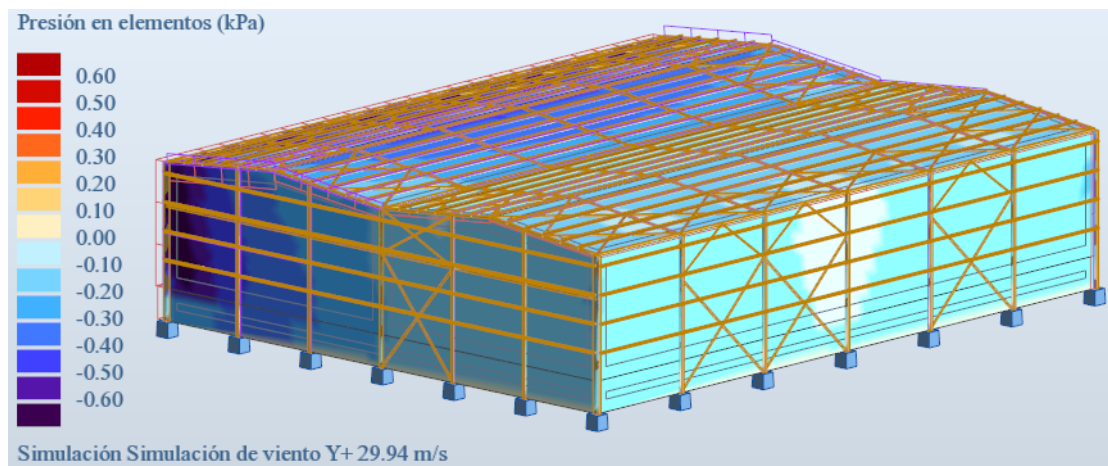


**Figura 6.15. Simulación de viento con incidencia lateral vista a sotavento. Fuente: Elaboración propia.
Producido por un producto educativo de Autodesk**

6.1.5 Cargas sísmicas

En conformidad con la Norma Chilena 2369-2003, las fuerzas sísmicas se deben distribuir en la altura según la ecuación (6.8):

$$F_k = \frac{A_k P_k}{\sum_{j=1}^{j=n} A_j P_j} \cdot Q_0 [N] \quad (6.8)$$

Donde cada término representa:

- F_k : Fuerza horizontal sísmica en el nivel k
- Q_0 : Esfuerzo de corte basal
- P_k, P_j : Peso sísmico en los niveles j y k
- A_k : Factor de ponderación para el peso asociado al nivel k

El factor (A_k) se calcula como se muestra en la ecuación (6.9):

$$A_k = \sqrt{1 - \frac{Z_{k-1}}{H}} - \sqrt{1 - \frac{Z_k}{H}} \quad (6.9)$$

Donde cada término representa:

- Z_{k-1}, Z_k : Altura sobre la base de los niveles k y $k - 1$
- H : Altura del nivel más alto sobre el nivel basal

El esfuerzo de corte basal se calcula según la ecuación (6.10):

$$Q_0 = C \cdot I \cdot P [N] \quad (6.10)$$

Donde cada término representa:

- C : Coeficiente sísmico
- I : Factor de importancia

De acuerdo con la Norma Chilena 2369-2003, el galpón industrial se encuentra ubicado en zona sísmica 2 y la edificación corresponde a categoría C2, por lo cual el factor de importancia es $I = 1,0$.

De esta forma, se debe calcular el coeficiente sísmico según la ecuación (6.11):

$$C = \frac{2.75 \cdot A_0}{g \cdot R} \left(\frac{T'}{T^*} \right)^n \left(\frac{0.05}{\varepsilon} \right)^{0.4} \quad (6.11)$$

Donde cada término representa:

- A_0 : Aceleración efectiva máxima según zonificación sísmica
- R : Factor de modificación de la respuesta
- T', n : Parámetros relativos al tipo de suelo de fundación
- T^* : Periodo fundamental de vibración en la dirección de análisis
- ε : Razón de amortiguamiento

El valor del coeficiente sísmico está limitado entre los siguientes valores:

$$0.195 > C > 0.075$$

De acuerdo con el criterio establecido en la Norma Chilena 2369-2003, se tienen los siguientes valores:

$$A_0 = 0.3 \cdot g; R = 5; \varepsilon = 0.02; T' = 0.35 [s]; n = 1.33$$

Al realizar un análisis de los modos propios de vibración de la estructura en Robot Structural Analysis Professional, se obtuvieron los periodos fundamentales de vibración para direcciones horizontales:

$$T_x^* = 0.16 [s]$$

$$T_y^* = 0.30 [s]$$

De esta forma, se obtuvo que el coeficiente sísmico para ambos ejes es:

$$C_x = 0.195$$

$$C_y = 0.195$$

Por lo tanto, el esfuerzo de corte basal calculado con la ecuación (6.10) es:

$$Q_0 = 0.195 \cdot P$$

Como la estructura del galpón industrial tiene solo 1 planta, se tiene que el parámetro $A_k = 1$.

De esta forma, las fuerzas horizontales calculadas según la ecuación (6.8) son:

$$F_k = 0.195 \cdot P$$

De acuerdo con las Tabla 6.1 y Tabla 6.2, la masa sísmica sin nieve es:

$$P_{Sin Nieve} = 1170.9 [kN]$$

Adicionalmente, se debe considerar una masa sísmica diferente para las combinaciones de carga que incluyen nieve y cargas sísmicas. Para esto, de acuerdo con la Norma Chilena 2369-2003 se considera un 50% de la sobrecarga de nieve, por lo cual se obtiene una masa sísmica de:

$$P_{Con Nieve} = 1680.31 [kN]$$

De esta forma, se obtiene que las cargas sísmicas calculadas según la ecuación (6.8) a considerar son:

$$F_{k_{Sin Nieve}} = 228.3 [kN]$$

$$F_{k_{Con Nieve}} = 327.7 [kN]$$

La carga sísmica estática se distribuye en todas las columnas a una altura de 10 metros que es donde se encuentra la mayor concentración de masas, como se muestra en la Figura 6.16 y la Figura 6.17.

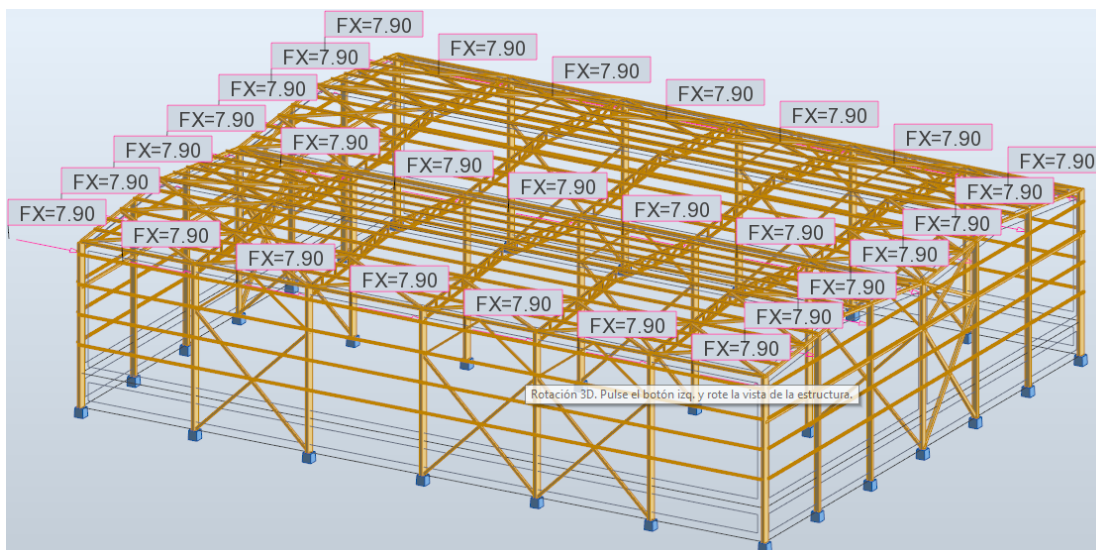


Figura 6.16. Carga sísmica estática sin nieve distribuida en la estructura. Fuente: Elaboración propia.
Producido por un producto educativo de Autodesk

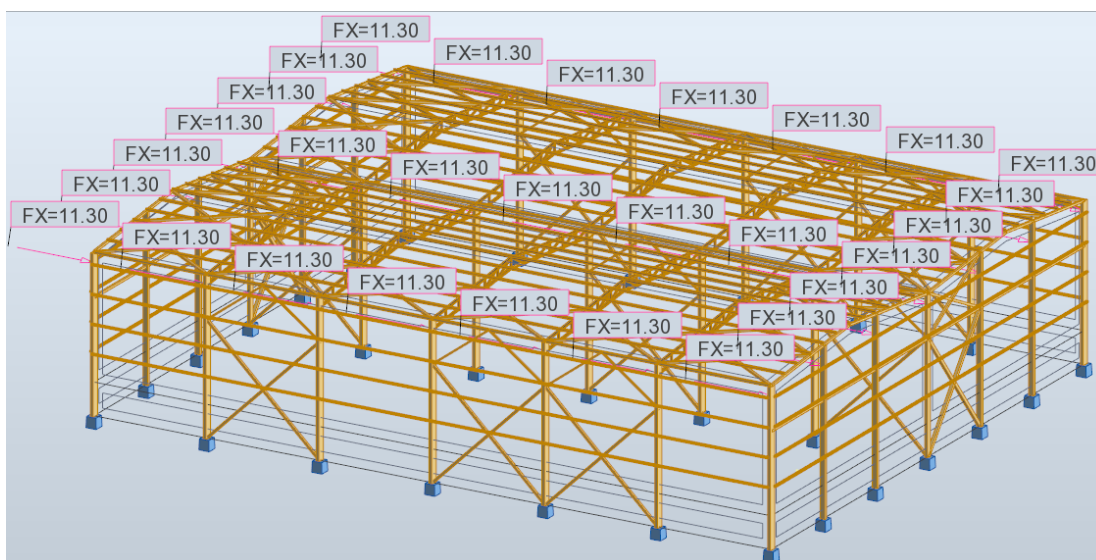


Figura 6.17. Carga sísmica estática con nieve distribuida en la estructura. Fuente: Elaboración propia.
Producido por un producto educativo de Autodesk.

De acuerdo con el criterio establecido en la Norma Chilena 2369-2003, no se deben considerar cargas sísmicas verticales.

6.1.6 Carga de uso

De acuerdo con la Norma Chilena 1537-2009, no se consideran cargas de uso para la estructura.

6.1.7 Carga de uso de techo

La carga de uso de techo (L_r) para techos accesibles solo para mantención es de 1 [kPa]. Sin embargo, esta puede ser reducida mediante factores de área y por pendiente de techo. Al realizar la reducción de la carga según lo indicado en la Norma Chilena 1537-2009, se obtuvo una carga similar a la carga de nieve. Para las combinaciones de carga, se debe elegir entre la carga de nieve, la carga de uso de techo y la carga de lluvia.

Como se obtuvieron valores similares, se consideró que la carga de uso de techo está contemplada dentro de la carga de nieve.

6.2 Combinaciones de cargas

Las combinaciones de cargas a usar para el análisis de la estructura del galpón industrial mediante el método LRFD y de acuerdo con la Norma Chilena 3171-2010, Norma Chilena 2369-2003 y Norma Chilena 1537-2009 son:

$$1.4 \cdot D \quad (6.12)$$

$$1.2 \cdot D + 1.6 \cdot L + 0.5S \quad (6.13)$$

$$1.2 \cdot D + 1.6 \cdot S + L \quad (6.14)$$

$$1.2 \cdot D + 1.6 \cdot S + 0.8 \cdot W \quad (6.15)$$

$$1.2 \cdot D + 1.6 \cdot W + L + 0.5 \cdot S \quad (6.16)$$

$$1.2 \cdot D + 1.4 \cdot E + L + 0.2 \cdot S \quad (6.17)$$

$$0.9 \cdot D + 1.6 \cdot W \quad (6.18)$$

$$0.9 \cdot D + 1.4 \cdot E \quad (6.19)$$

$$D + L + S + F_{impactov} + F_{lateral} + F_{longitudinal} \quad (6.20)$$

$$0.75 \cdot (D + L + S + F_{impactov} + W) \quad (6.21)$$

$$0.75 \cdot (D + L + S + F_{impactov} + F_{lateral} + 0.5 \cdot W) \quad (6.22)$$

$$0.75 \cdot (D + L + S + E_h) \quad (6.23)$$

$$1.2 \cdot D + F_{impactov} + F_{lateral} + F_{longitudinal} \pm 1.1 \cdot E_h \quad (6.24)$$

$$0.9 \cdot D \pm 1.1 \cdot E_h \quad (6.25)$$

De acuerdo con estas combinaciones de carga, se ingresaron 57 casos de carga al software, los cuales están compuestos por las diferentes direcciones de las cargas de viento, la sobrecarga de nieve balanceada/desbalanceada y las cargas sísmicas en direcciones horizontales. Además, se consideró una carga sísmica que incluye un 50% de la sobrecarga de nieve cuando en la combinación de carga se tienen ambas cargas.

En el ANEXO C se encuentra la tabla con todas las combinaciones de cargas ingresadas a la verificación estructural.

7 RESULTADOS

La estructura se analizó bajo las condiciones de la metodología de diseño LRFD de la norma AISC 360-2010, mediante la cual se determina para cada elemento de la estructura el caso de carga más desfavorable. De acuerdo con el criterio establecido por la norma AISC 360-2010, el valor del ratio se obtiene como el máximo valor de todas las comprobaciones que se realizan. La combinación de esfuerzos presentes en cada caso de carga debe ser ≤ 1.0 para todas las verificaciones.

En la Figura 7.1 se muestran los elementos más solicitados de la estructura. Estos elementos corresponden a los arriostramientos frontales inferiores y superiores, como se muestra en la Figura D.1 y la Figura D.2 en el ANEXO D.

Barra		Perfil	Material	Lay	Laz	Solicit	Caso
406 Viga_406	✗	Cuadrado_150x150x5_Frontal	A42-27ES	169.69	169.69	1.20	36 1.2D+1.6(Wy-) + L+ 0.5Sd
409 Viga_409	✗	Cuadrado_150x150x5_Frontal	A42-27ES	169.69	169.69	1.20	36 1.2D+1.6(Wy-) + L+ 0.5Sd
410 Viga_410	✗	Cuadrado_100x100x5_Frontal	A42-27ES	188.95	188.95	1.10	36 1.2D+1.6(Wy-) + L+ 0.5Sd
407 Viga_407	✗	Cuadrado_150x150x5_Frontal	A42-27ES	169.69	169.69	1.07	33 1.2D+1.6(Wy+) + L+0.5Sb
408 Viga_408	✗	Cuadrado_150x150x5_Frontal	A42-27ES	169.69	169.69	1.02	33 1.2D+1.6(Wy+) + L+0.5Sb
503 Viga_503	!	I (UPE 140)	A42-27ES	140.34	262.53	0.97	44 0.9D + 1.6 Wy-
38 Viga_38	!	Cuadrado_150x150x5	A42-27ES	162.89	162.89	0.97	44 0.9D + 1.6 Wy-
527 Viga_527	!	I (UPE 140)	A42-27ES	140.34	262.53	0.97	43 0.9D + 1.6 Wy+
511 Viga_511	!	I (UPE 140)	A42-27ES	140.34	262.53	0.94	44 0.9D + 1.6 Wy-

Figura 7.1. Elementos más solicitados de la estructura. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.

Estos elementos están sometidos a una compresión elevada debido a las combinaciones de carga con viento en la dirección Y.

7.1 Recomendaciones iniciales

De acuerdo con el criterio planteado con la norma AISC 360-2010, el elemento más solicitado tiene un ratio de $1.20 > 1.0$. Todo elemento que tenga un ratio mayor que 1.0 debe ser rediseñado para prevenir que se presente una falla en el galpón industrial.

Luego de realizar las iteraciones correspondientes al rediseño, se modificaron los arriostramientos inferiores de un perfil cuadrado de 150x150x5 a uno cuadrado de 200x200x5, mientras que los arriostramientos superiores se cambiaron de un perfil cuadrado de 100x100x5 a uno de 150x150x5. Luego, con estos nuevos elementos se realizó nuevamente la verificación estructural del galpón industrial.

En la Tabla 7.1 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para las vigas/columnas más solicitadas luego del rediseño, según el tipo de elemento constructivo. En esta tabla se muestra el ratio o factor de utilización y el caso de carga más desfavorable entre los 57 que se ingresaron.

Tabla 7.1. Resultados para los elementos más solicitados de la estructura rediseñada. Fuente: Elaboración propia.

Barra	Tipo Elemento	RAT	Caso de carga
10	Columna	0.76	47: $D + L + S_b + D_{grúa} + F_{vert} + F_{lat} + F_{long}$
115	Cercha Montante	0.53	47: $D + L + S_b + D_{grúa} + F_{vert} + F_{lat} + F_{long}$
142	Cercha Diagonal	0.91	44: $0.9D + 1.6 W_{y-}$
241	Cercha Superior	0.74	23: $1.2D + 1.6S_b + L$
38	Cercha Frontal	0.98	44: $0.9D + 1.6 W_{y-}$
503	Costanera Lateral	0.98	44: $0.9D + 1.6 W_{y-}$
716	Costanera Techo	0.48	32: $1.2D + 1.6W_{x-} + L + 0.5S_b$
611	Costanera Techo	0.56	23: $1.2D + 1.6S_b + L$
438	Arriost. Superior	0.26	36: $1.2D + 1.6W_{y-} + L + 0.5S_d$
391	Arriost. Techo	0.49	44: $0.9D + 1.6W_{y-}$
427	Arriost. Inferior	0.88	41: $0.9D + 1.6W_{x+}$

Como se puede observar en la Tabla 7.1, para los elementos más solicitados de la estructura se cumple el criterio establecido con anterioridad, por lo tanto, todos los elementos son capaces de resistir las combinaciones de carga de la Norma Chilena 3171-2010 y la Norma Chilena 2369-2003.

En la Tabla 7.2 se detallan las propiedades del material del cual están compuestos todos los elementos del galpón industrial.

Tabla 7.2. Características del material utilizado en la columna 10. Fuente: Elaboración propia.

Material			
Símbolo	Valor	Unidad	Descripción del símbolo
Nombre	A42-27ES		
Fy	265	[MPa]	resistencia de material
Fu	412	[MPa]	límite mínimo de resistencia a la tracción
E	210	[GPa]	coeficiente de elasticidad longitudinal

En la Tabla 7.3 se muestran los valores de los coeficientes de reducción de resistencia según el método LRFD, los cuales se obtienen de los capítulos E, F, G y H de la norma AISC 360-2010. [17]

Tabla 7.3. Valores de los coeficientes de reducción de resistencia según el método LRFD. Fuente: Elaboración propia.

Método de coeficientes parciales LRFD		
Símbolo	Valor	Descripción del símbolo
Fic	0.9	parámetro de resistencia para la compresión
Fib	0.9	parámetro de resistencia para la flexión
Fiv	0.9	parámetro de resistencia para el cortante
FiT	0.9	Coeficiente de resistencia para la ruptura en torsión

A continuación, se muestran los resultados detallados para los elementos más solicitados luego del rediseño según el tipo de elemento constructivo (columna principal, cercha, arriostramiento y costanera):

7.2 Columna principal

Para la columna principal que se muestra en la Figura 7.2 (Columna 10), el caso de carga más desfavorable es el 47: $D + L + S_b + D_{grúa} + F_{vert} + F_{lat} + F_{long}$.

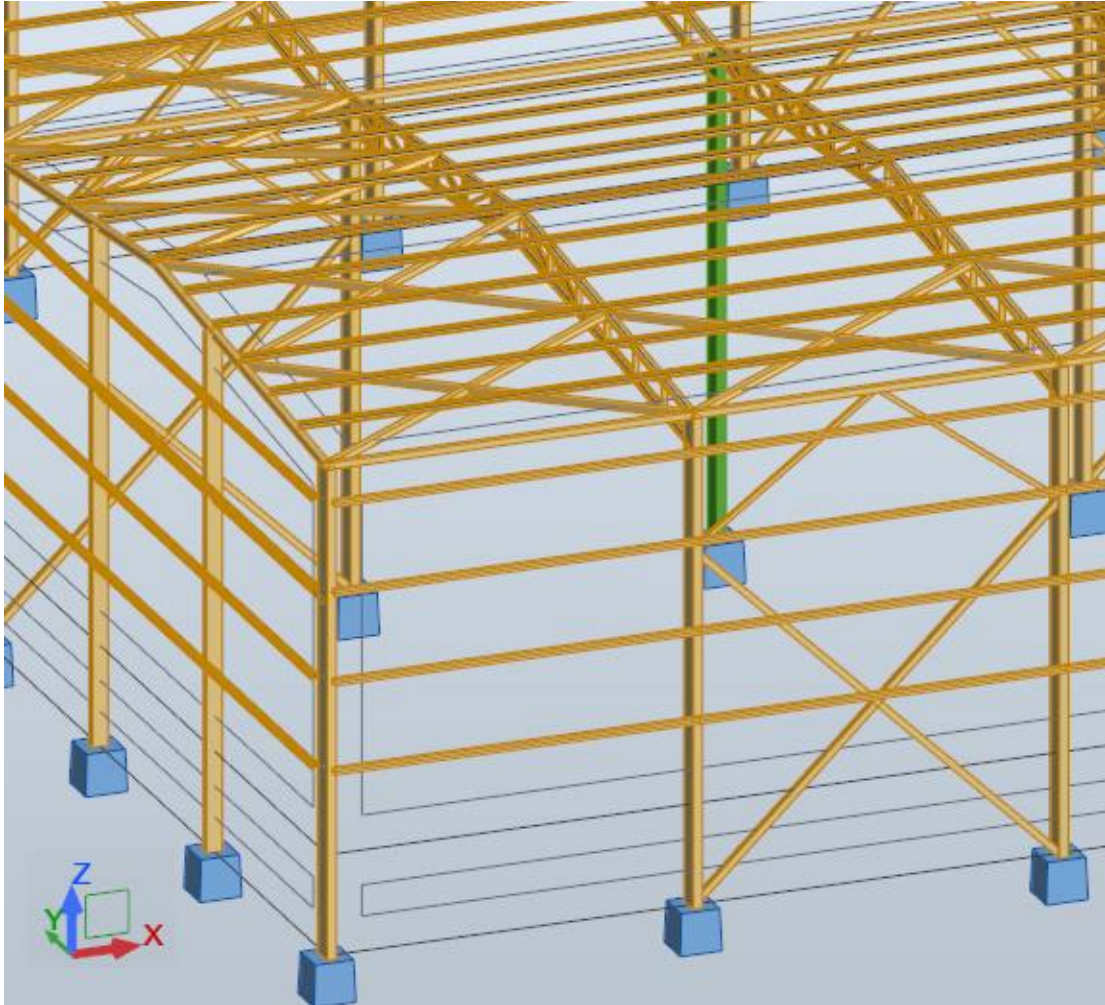


Figura 7.2. Vista 3D de la columna 10 (en verde). Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.

Las características de la columna se describen en la Tabla 7.4, donde se muestra el área de la sección transversal, los momentos de inercia en los ejes principales, la constante de torsión y el radio de giro respecto a cada eje principal. Se debe destacar también que se presenta el punto en el que se realiza la verificación, el cual corresponde a $x = 0.72 \cdot L$.

Tabla 7.4. Características principales de la sección transversal para la columna 10. Fuente: Elaboración propia.

BARRA: 10 Columna_10; COORDENADA: x = 0.72 L = 7.75 m			
Características de la sección: Tubest 550x200			
Símbolo	Valor	Unidad	Descripción del símbolo
Ax	8540	[mm ²]	área de la sección
Ay	2960	[mm ²]	área eficaz en cortante en la dirección Y
Az	5260	[mm ²]	área eficaz en cortante en la dirección Z
J	168260231	[mm ⁴]	constante de torsión
Iy	361922687	[mm ⁴]	momento de inercia respecto al eje Y
Iz	61441167	[mm ⁴]	momento de inercia respecto al eje Z
Zy	1580090	[mm ³]	módulo de sección plástico respecto al eje Y
Sy	1316083	[mm ³]	módulo de sección elástico respecto al eje Y
Zz	680650	[mm ³]	módulo de sección plástico respecto al eje Z
Sz	614412	[mm ³]	módulo de sección elástico respecto al eje Z
d	550	[mm]	altura de la sección
bf	200	[mm]	anchura de la sección
tf	8	[mm]	espesor del ala
tw	5	[mm]	espesor del alma
ry	206	[mm]	radio de inercia respecto al eje Y
rz	85	[mm]	radio de inercia respecto al eje Z

Luego, se presentan las fuerzas de compresión y la fuerza cortante en ambos ejes y los momentos de flexión y torsión para el caso de carga 47: $D + L + S_b + D_{grúa} + F_{vert} + F_{lat} + F_{long}$, los cuales se muestran en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5. Fuerzas y momentos actuantes en la columna 10 para el caso de carga más desfavorable en el punto de verificación. Fuente: Elaboración propia.

Símbolo	Valor	Unidad	Descripción del símbolo
Pr	310	[kN]	resistencia exigida a la compresión
Tr	0	[kN·m]	resistencia exigida a la torsión
Mry	12	[kN·m]	resistencia exigida a la flexión
Mrz	53	[kN·m]	resistencia exigida a la flexión
Vry	12	[kN]	resistencia exigida al cortante
Vrz	3	[kN]	resistencia exigida al cortante

Estas fuerzas y momentos se deben ingresar a las fórmulas de verificación que se aplican según los criterios establecidos por la norma AISC 360-2010.

En la Tabla 7.6 se muestran las fuerzas de compresión, corte y momentos de flexión nominales que es capaz de soportar la columna principal, calculados de acuerdo con la norma AISC 360-2010.

Tabla 7.6. Resistencias nominales de la columna 10 calculadas de acuerdo con los criterios de la norma AISC 360-2010. Fuente: Elaboración propia.

Resistencias nominales:				
Símbolo	Valor	Unidad	Descripción del símbolo	P
Pn	922	[kN]	Resistencia nominal a la compresión:	[E3]
Tn	88	[kN·m]	resistencia nominal de la barra en torsión	[H3.1]
respecto al eje Y de la sección				
Mpy	418	[kN·m]	Momento plástico nominal	[F]
Mny[YD]	418	[kN·m]	Resistencia nominal a flexión en el estado límite de plastificación	[F7.1]
Mny[WLB]	389	[kN·m]	Resistencia nominal al pandeo local del alma	[F7.3]
Mny	389	[kN·m]	Resistencia nominal a la flexión	[F7]
Vnz	439	[kN]	Resistencia nominal en cortante	[G2.1]
respecto al eje Z de la sección				
Mpz	180	[kN·m]	Momento plástico nominal	[F]
Mnz[YD]	180	[kN·m]	Resistencia nominal a flexión en el estado límite de plastificación	[F7.1]
Mnz[WLB]	148	[kN·m]	Resistencia nominal al pandeo local del alma	[F7.2]
Mnz	148	[kN·m]	Resistencia nominal a la flexión	[F]
Vny	470	[kN]	Resistencia nominal en cortante	[G2.1]

Finalmente, en la Tabla 7.7 se presentan las fórmulas de verificación utilizadas para la columna 10. Con la primera verificación realizada se comprueba que el elemento sea estable, por lo cual el valor del cociente entre las relaciones de esbeltez y la relación de esbeltez recomendada por la norma AISC 360-2010 debe ser menor que 1. La segunda verificación corresponde a la combinación de cargas axiales y flexión, como se muestra en el capítulo 4.3.6 “Diseño de miembros para requerimientos combinadas”, de

acuerdo con la norma AISC 360-2010. La tercera y cuarta verificación corresponden a la resistencia de miembros en corte en la sección transversal.

Tabla 7.7. Verificación de la columna 10 para el caso de carga más desfavorable. Fuente: Elaboración propia.

Fórmulas de verificación:			
Símbolo	Valor	Descripción del símbolo	Comentario
UF[KL/r]	0.63	$\text{Max} \left\{ \frac{\frac{K_y \cdot L_y}{r_y}}{200}, \frac{\frac{K_z \cdot L_z}{r_z}}{200} \right\}$	Estable
UF(H1_1a)	0.76	$\frac{P_r}{F_{ic} \cdot P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ry}}{F_{ib} \cdot M_{ny}} + \frac{M_{rz}}{F_{ib} \cdot M_{nz}} \right)$	Cumple criterio
UF(G2_1)	0.03	$\frac{V_{ry}}{F_{iv} \cdot V_{ny}}$	Cumple criterio
UF(G2_1)	0.01	$\frac{V_{rz}}{F_{iv} \cdot V_{nz}}$	Cumple criterio
Solicitud:			
RAT	0.76	Perfil correcto	

El valor del ratio o factor de utilización se obtiene como el máximo valor entre todas las verificaciones realizadas, excluyendo la verificación de estabilidad. De acuerdo con el criterio establecido por la norma AISC 360-2010, el valor del ratio debe ser menor que 1, por lo tanto, se concluye que todas las columnas cumplen con los criterios de verificación.

7.3 Cercha frontal

Para la cercha frontal que se muestra en la Figura 7.3, el caso de carga más desfavorable es el 44: $0.9D + 1.6 W_y$.

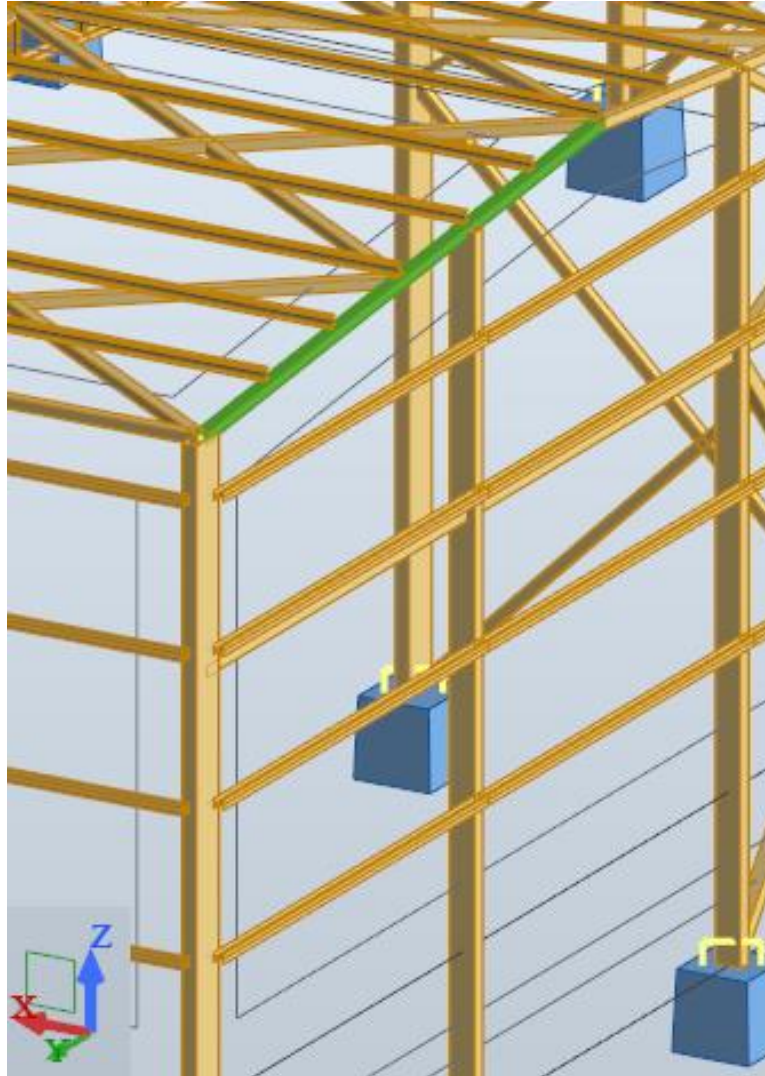


Figura 7.3. Vista 3D de la viga 38 (en verde). Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.

Las características de la viga se describen en la Tabla 7.8, donde se muestra el área de la sección transversal, los momentos de inercia en los ejes principales, la constante de torsión y el radio de giro respecto a cada eje principal. Se debe destacar también que se presenta el punto en el que se realiza la verificación, el cual corresponde a $x = 0.33 \cdot L$.

Tabla 7.8. Características principales de la sección transversal para la viga 38. Fuente: Elaboración propia.

BARRA: Viga 38; COORDENADA: $x = 0.33 L = 3.22 \text{ m}$			
Características de la sección Cuadrado 150x150x5			
Ax	2900	[mm ²]	área de la sección
Ay	1350	[mm ²]	área eficaz en cortante en la dirección Y
Az	1350	[mm ²]	área eficaz en cortante en la dirección Z
J	15243125	[mm ⁴]	constante de torsión
Iy	10174167	[mm ⁴]	momento de inercia respecto al eje Y
Iz	10174167	[mm ⁴]	momento de inercia respecto al eje Z
Zy	157750	[mm ³]	módulo de sección plástico respecto al eje Y
Sy	135656	[mm ³]	módulo de sección elástico respecto al eje Y
Zz	157750	[mm ³]	módulo de sección plástico respecto al eje Z
Sz	135656	[mm ³]	módulo de sección elástico respecto al eje Z
d	150	[mm]	altura de la sección
bf	150	[mm]	anchura de la sección
tf	5	[mm]	espesor del ala
tw	5	[mm]	espesor del alma
ry	59	[mm]	radio de inercia respecto al eje Y
rz	59	[mm]	radio de inercia respecto al eje Z

En la Tabla 7.5 se presentan las fuerzas de compresión, la fuerza cortante en ambos ejes y los momentos de flexión y torsión para el caso de carga 44: $0.9D + 1.6 W_y$:

Tabla 7.9. Fuerzas y momentos actuantes en la viga 38 para el caso de carga más desfavorable en el punto de verificación. Fuente: Elaboración propia.

Pr	36	[kN]	resistencia exigida a la compresión
Tr	11	[kN·m]	resistencia exigida a la torsión
Mry	12	[kN·m]	resistencia exigida a la flexión
Mrz	9	[kN·m]	resistencia exigida a la flexión
Vry	9	[kN]	resistencia exigida al cortante
Vrz	12	[kN]	resistencia exigida al cortante

Estas fuerzas y momentos se utilizan en las fórmulas de verificación que se deben aplicar según los criterios establecidos por la norma AISC 360-2010.

En la Tabla 7.10 se muestran la fuerza de compresión, fuerzas cortantes y los momentos nominales que es capaz de soportar la cercha frontal, calculados de acuerdo con la norma AISC 360-2010.

Tabla 7.10. Fuerzas y momentos que es capaz de resistir la viga 38. Fuente: Elaboración propia.

Resistencias nominales:				
Pn	199	[kN]	Resistencia nominal a la compresión:	[E3]
Tn	33	[kN·m]	resistencia nominal de la barra en torsión	[H3.1]
respecto al eje Y de la sección				
Mpy	42	[kN·m]	Momento plástico nominal	[F]
Mny[YD]	42	[kN·m]	Resistencia nominal a flexión en el estado límite de plastificación	[F7.1]
Mny	42	[kN·m]	Resistencia nominal a la flexión	[F7]
Vnz	214	[kN]	Resistencia nominal en cortante	[G2.1]
respecto al eje Z de la sección				
Mpz	42	[kN·m]	Momento plástico nominal	[F]
Mnz[YD]	42	[kN·m]	Resistencia nominal a flexión en el estado límite de plastificación	[F7.1]
Mnz	42	[kN·m]	Resistencia nominal a la flexión	[F]
Vny	214	[kN]	Resistencia nominal en cortante	[G2.1]

En la Tabla 7.11 se presentan las fórmulas de verificación utilizadas para la viga 38. Con la primera verificación que se realiza se comprueba que el elemento es estable, por lo cual el valor del cociente entre las relaciones de esbeltez y la relación de esbeltez recomendada por la norma AISC 360-2010 debe ser menor que 1. La segunda verificación corresponde a la combinación de cargas axiales y flexión, como se muestra en el capítulo 4.3.6 “Diseño de miembros para requerimientos combinadas”, de acuerdo con la norma AISC 360-2010. La tercera verificación corresponde a la combinación de cargas axiales, cortante, flexión y torsión de acuerdo con la norma AISC 360-2010. La cuarta y quinta verificación corresponden a la resistencia de miembros en corte en la sección transversal.

Tabla 7.11. Verificación de la viga 38 para el caso de carga más desfavorable. Fuente: Elaboración propia.

Fórmulas de verificación:			
UF[KL/r]	0.81	$Max \left\{ \frac{\frac{K_y \cdot L_y}{r_y}}{\frac{K \cdot L}{r}}, \frac{\frac{K_z \cdot L_z}{r_z}}{\frac{K \cdot L}{r}} \right\}$	Estable
UF(H1_1a)	0.69	$\frac{P_r}{F_{ic} \cdot P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ry}}{F_{ib} \cdot M_{ny}} + \frac{M_{rz}}{F_{ib} \cdot M_{nz}} \right)$	Cumple criterio
UF(H3_6)	0.98	$\frac{P_r}{F_{ic} \cdot P_n} + \frac{M_{ry}}{F_{ib} \cdot M_{ny}} + \frac{M_{rz}}{F_{ib} \cdot M_{nz}} + \left(\frac{V_{ry}}{F_{iv} \cdot V_{yn}} + \frac{V_{rz}}{F_{iv} \cdot V_{zn}} + \frac{T_r}{F_{iT} \cdot T_n} \right)^2$	Cumple criterio
UF(G2_1)	0.05	$\frac{V_{ry}}{F_{iv} \cdot V_{ny}}$	Cumple criterio
UF(G2_1)	0.06	$\frac{V_{rz}}{F_{iv} \cdot V_{nz}}$	Cumple criterio
Solicitud:			
RAT	0.98	Perfil correcto	

El valor del ratio o factor de utilización se obtiene como el máximo valor entre todas las verificaciones realizadas, excluyendo la verificación de estabilidad. De acuerdo con el criterio establecido por la norma AISC 360-2010, el valor del ratio debe ser menor que 1, por lo cual se concluye que el perfil es correcto.

7.4 Arriostramiento inferior

Para el arriostramiento que se muestra en la Figura 7.4 el caso de carga más desfavorable es el 41: $0.9D + 1.6 W_{x+}$

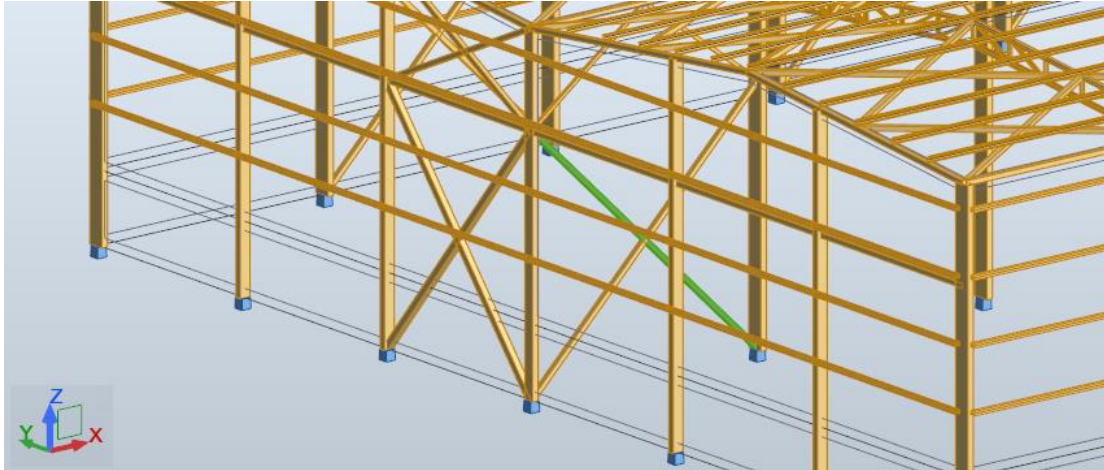


Figura 7.4. Vista 3D de la viga 427 (en verde). Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.

Las características de la viga se describen en la Tabla 7.12, donde se muestra el área de la sección transversal, los momentos de inercia en los ejes principales, la constante de torsión y el radio de giro respecto a cada eje principal. Se debe destacar también que se presenta el punto en el que se realiza la verificación, el cual corresponde a $x = L$.

Tabla 7.12. Características principales de la sección transversal de la viga 427. Fuente: Elaboración propia.

BARRA: Viga_427; COORDENADA: x = 1.00 L = 11.14 m			
Características de la sección: Cuadrado_150x150x5			
Símbolo	Valor	Unidad	Descripción del símbolo
Ax	2900	[mm ²]	área de la sección
Ay	1350	[mm ²]	área eficaz en cortante en la dirección Y
Az	1350	[mm ²]	área eficaz en cortante en la dirección Z
J	15243125	[mm ⁴]	constante de torsión
Iy	10174167	[mm ⁴]	momento de inercia respecto al eje Y
Iz	10174167	[mm ⁴]	momento de inercia respecto al eje Z
Zy	157750	[mm ³]	módulo de sección plástico respecto al eje Y
Sy	135656	[mm ³]	módulo de sección elástico respecto al eje Y
Zz	157750	[mm ³]	módulo de sección plástico respecto al eje Z
Sz	135656	[mm ³]	módulo de sección elástico respecto al eje Z
d	150	[mm]	altura de la sección
bf	150	[mm]	anchura de la sección
tf	5	[mm]	espesor del ala
tw	5	[mm]	espesor del alma
ry	59	[mm]	radio de inercia respecto al eje Y
rz	59	[mm]	radio de inercia respecto al eje Z

En la Tabla 7.13 se presentan las fuerzas de compresión, la fuerza cortante en ambos ejes y los momentos de flexión y torsión para el caso de carga 41: $0.9D + 1.6 W_{x+}$.

Tabla 7.13. Fuerzas y momentos actuantes en la viga 427 para el caso de carga más desfavorable en el punto de verificación. Fuente: Elaboración propia.

Pr	108	[kN]	resistencia exigida a la compresión
Tr	0	[kN·m]	resistencia exigida a la torsión
Mry	3	[kN·m]	resistencia exigida a la flexión
Mrz	0	[kN·m]	resistencia exigida a la flexión
Vry	0	[kN]	resistencia exigida al cortante
Vrz	1	[kN]	resistencia exigida al cortante

Estas fuerzas y momentos se utilizan en las fórmulas de verificación que se deben aplicar según los criterios establecidos por la norma AISC 360-2010.

En la Tabla 7.14 se muestran la fuerza de compresión, fuerzas cortantes y los momentos nominales que es capaz de soportar el arriostramiento inferior, calculados de acuerdo con la norma AISC 360-2010.

Tabla 7.14. Fuerzas y momentos que es capaz de resistir la viga 427. Fuente: Elaboración propia.

Resistencias nominales:				
Pn	149	[kN]	Resistencia nominal a la compresión:	[E3]
Tn	33	[kN·m]	resistencia nominal de la barra en torsión	[H3.1]
respecto al eje Y de la sección				
Mpy	42	[kN·m]	Momento plástico nominal	[F]
Mny[YD]	42	[kN·m]	Resistencia nominal a flexión en el estado límite de plastificación	[F7.1]
Mny	42	[kN·m]	Resistencia nominal a la flexión	[F7]
Vnz	214	[kN]	Resistencia nominal en cortante	[G2.1]
respecto al eje Z de la sección				
Mpz	42	[kN·m]	Momento plástico nominal	[F]
Mnz[YD]	42	[kN·m]	Resistencia nominal a flexión en el estado límite de plastificación	[F7.1]
Mnz	42	[kN·m]	Resistencia nominal a la flexión	[F]
Vny	214	[kN]	Resistencia nominal en cortante	[G2.1]

En la Tabla 7.15 se presentan las fórmulas de verificación utilizadas para la viga 427. Con la primera verificación que se realiza se comprueba que el elemento sea estable, por lo cual el valor del cociente entre las relaciones de esbeltez y la relación de esbeltez recomendada por la norma AISC 360-2010 debe ser menor que 1. La segunda verificación corresponde a la combinación de cargas axiales y flexión, como se muestra en el capítulo 4.3.6 “Diseño de miembros para requerimientos combinadas”, de acuerdo con la norma AISC 360-2010. La tercera y cuarta verificación corresponden a la resistencia de miembros en corte en la sección transversal

Tabla 7.15. Verificación de la viga 427 para el caso de carga más desfavorable. Fuente: Elaboración propia.

Fórmulas de verificación:			
UF[KL/r]	0.94	$\text{Max} \left\{ \frac{\frac{K_y \cdot L_y}{r_y}}{\frac{K \cdot L}{r}}, \frac{\frac{K_z \cdot L_z}{r_z}}{\frac{K \cdot L}{r}} \right\}$	Estable
UF(H1_1a)	0.88	$\frac{P_r}{F_{ic} \cdot P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ry}}{F_{ib} \cdot M_{ny}} + \frac{M_{rz}}{F_{ib} \cdot M_{nz}} \right)$	Cumple criterio
UF(G2_1)	0	$\frac{V_{ry}}{F_{iv} \cdot V_{ny}}$	Cumple criterio
UF(G2_1)	0	$\frac{V_{rz}}{F_{iv} \cdot V_{nz}}$	Cumple criterio
Solicitud:			
RAT	0.88	Perfil correcto	

El valor del ratio o factor de utilización se obtiene como el máximo valor entre todas las verificaciones realizadas, excluyendo la verificación de estabilidad. De acuerdo con el criterio establecido por la norma AISC 360-2010, el perfil es correcto.

7.5 Costanera lateral

Para la costanera lateral que se muestra en la Figura 7.5 el caso de carga más desfavorable es el 44: $0.9D + 1.6 W_{y-}$

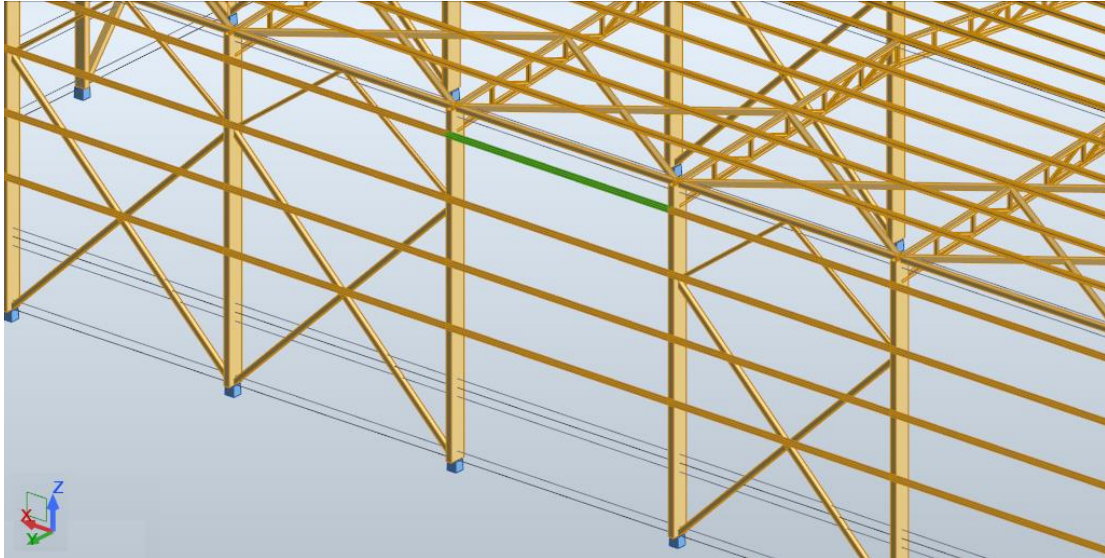


Figura 7.5. Vista 3D de la viga 503 (en verde). Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.

Las características de la viga se describen en la Tabla 7.16, donde se muestra el área de la sección transversal, los momentos de inercia en los ejes principales, la constante de torsión y el radio de giro respecto a cada eje principal. Se debe destacar también que se presenta el punto en el que se realiza la verificación, el cual corresponde a $x = L$.

Tabla 7.16. Características principales de la sección transversal para la viga 503. Fuente: Elaboración propia.

BARRA: Viga 503; COORDENADA: $x = 1.00$ L = 8.00 m			
Características de la sección: IPE 140			
Símbolo	Valor	Unidad	Descripción del símbolo
Ax	3560	[mm ²]	área de la sección
Ay	2340	[mm ²]	área eficaz en cortante en la dirección Y
Az	1400	[mm ²]	área eficaz en cortante en la dirección Z
J	98989	[mm ⁴]	constante de torsión
Iy	11568187	[mm ⁴]	momento de inercia respecto al eje Y
Iz	3305667	[mm ⁴]	momento de inercia respecto al eje Z
Zy	190480	[mm ³]	módulo de sección plástico respecto al eje Y
Sy	165260	[mm ³]	módulo de sección elástico respecto al eje Y
Zz	79100	[mm ³]	módulo de sección plástico respecto al eje Z
Sz	50856	[mm ³]	módulo de sección elástico respecto al eje Z
d	140	[mm]	altura de la sección
bf	130	[mm]	anchura de la sección
tf	9	[mm]	espesor del ala
tw	10	[mm]	espesor del alma
ry	57	[mm]	radio de inercia respecto al eje Y
rz	31	[mm]	radio de inercia respecto al eje Z

En la Tabla 7.17 se presentan las fuerzas de compresión, la fuerza cortante en ambos ejes y los momentos de flexión y torsión debido al caso de carga más desfavorable.

Tabla 7.17. Fuerzas y momentos actuantes en la viga 503 para el caso de carga más desfavorable. Fuente: Elaboración propia.

Pr	54	[kN]	resistencia exigida a la compresión
Tr	0	[kN·m]	resistencia exigida a la torsión
Mry	10	[kN·m]	resistencia exigida a la flexión
Mrz	0.4	[kN·m]	resistencia exigida a la flexión
Vry	0.2	[kN]	resistencia exigida al cortante
Vrz	8	[kN]	resistencia exigida al cortante

Estas fuerzas y momentos son lo que se utilizan en las fórmulas de verificación que se deben aplicar según los criterios establecidos por la norma AISC 360-2010.

En la Tabla 7.18 se muestra la fuerza de compresión, fuerza de corte y momentos nominales que es capaz de soportar el elemento, calculados de acuerdo con los criterios establecidos por la norma AISC 360-2010.

Tabla 7.18. Fuerzas, momentos y esfuerzos que es capaz de resistir la viga 503 se sección transversal IPE

140. Fuente: Elaboración propia.

Resistencias nominales:				
Pn	94	[kN]	Resistencia nominal a la compresión:	[E3]
respecto al eje Y de la sección				
Mpy	50	[kN·m]	Momento plástico nominal	[F]
Mny[YD]	50	[kN·m]	Resistencia nominal a flexión en el estado límite de plastificación	[F2.1]
Mny[LTB]	31	[kN·m]	Resistencia nominal al pandeo lateral	[F2.2]
Mny1[LTB]	31	[kN·m]	Resistencia nominal al pandeo lateral ($C_b = 1.0$)	[F2.2]
Mny	31	[kN·m]	Resistencia nominal a la flexión	[F2]
Vnz	222	[kN]	Resistencia nominal en cortante	[G2.1]
respecto al eje Z de la sección				
Mpz	21	[kN·m]	Momento plástico nominal	[F]
Mnz[YD]	21	[kN·m]	Resistencia nominal a flexión en el estado límite de plastificación	[F6]
Mnz	21	[kN·m]	Resistencia nominal a la flexión	[F6]
Vny	372	[kN]	Resistencia nominal en cortante	[G2.1]

En la Tabla 7.19 se presentan las fórmulas de verificación utilizadas para la viga 503. Con la primera verificación que se realiza se comprueba que el elemento sea estable, por lo cual el valor del cociente entre las relaciones de esbeltez y la relación de esbeltez recomendada por la norma AISC 360-2010 debe ser menor que 1. Para este elemento, se obtiene un valor mayor a 1, por lo cual se determina que el elemento es inestable. La segunda verificación corresponde a la combinación de cargas axiales y flexión, como se muestra en el capítulo 4.3.6 “Diseño de miembros para requerimientos combinadas”, de acuerdo con la norma AISC 360-2010. La tercera y cuarta verificación

corresponden a la resistencia de miembros en corte en los ejes ortogonales a la sección transversal.

Tabla 7.19. Verificación de la viga 503 para el caso de carga más desfavorable. Fuente: Elaboración propia.

Fórmulas de verificación:			
UF[KL/r]	1.31	$Max \left\{ \frac{\frac{K_y \cdot L_y}{r_y}}{\frac{K \cdot L}{r}}, \frac{\frac{K_z \cdot L_z}{r_z}}{\frac{K \cdot L}{r}} \right\}$	Inestable
UF(H1_1a)	0.98	$\frac{P_r}{F_{ic} \cdot P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ry}}{F_{ib} \cdot M_{ny}} + \frac{M_{rz}}{F_{ib} \cdot M_{nz}} \right)$	Cumple criterio
UF(G2_1)	0	$\frac{V_{ry}}{F_{iv} \cdot V_{ny}}$	Cumple criterio
UF(G2_1)	0.04	$\frac{V_{rz}}{F_{iv} \cdot V_{nz}}$	Cumple criterio
Solicitud:			
RAT	0.98	Perfil Correcto; Inestable	

El valor del ratio o factor de utilización se obtiene como el máximo valor entre todas las verificaciones realizadas, excluyendo la verificación de estabilidad. De acuerdo con el criterio establecido por la norma AISC 360-2010, el perfil es correcto pero inestable.

Como se puede observar en la primera verificación que se realizó, los elementos de costaneras laterales tienen una relación de esbeltez superior a la recomendada por la norma AISC 360-2010, por lo cual se considera que las costaneras laterales son inestables.

7.6 Otros elementos

Debido a la gran cantidad de elementos que componen la estructura, en el archivo de Excel “Resultados_Resumen.xlsx” se presenta un resumen de todos los elementos que componen la estructura, ordenados según el tipo de elemento donde se destacan los elementos más solicitados. Adicionalmente, en la carpeta adjunta “Verificaciones” se encuentran archivos en Formato de texto enriquecido (.RTF), en los cuales se presenta el resultado detallado de todos los elementos, ordenados según el tipo de elemento constructivo.

En el ANEXO D se presenta de manera general los valores de ratio o factor de utilización de la estructura.

7.7 Deformaciones

7.7.1 Sísmicas

La deformación máxima obtenida para los casos de carga que contienen carga sísmica es de $25.7 [mm]$ en el caso de carga 84: $1.2D + F_{impactoV} + F_{lateral} + F_{longitudinal} + 1.1E_x$ -, como se muestra en la Figura 7.6. Esta deformación ocurre en la columna 10 que es una de las más solicitadas. De acuerdo con la Norma Chilena 2369-2003 [20], la deformación máxima admisible de la estructura se debe calcular como:

$$d_{m\acute{a}x} = 0.015 \cdot h = 160.5 [mm]$$

Como la deformación máxima obtenida es menor a la máxima admisible, la estructura se encuentra dentro del rango admisible de desplazamiento para el tipo de estructura analizada.

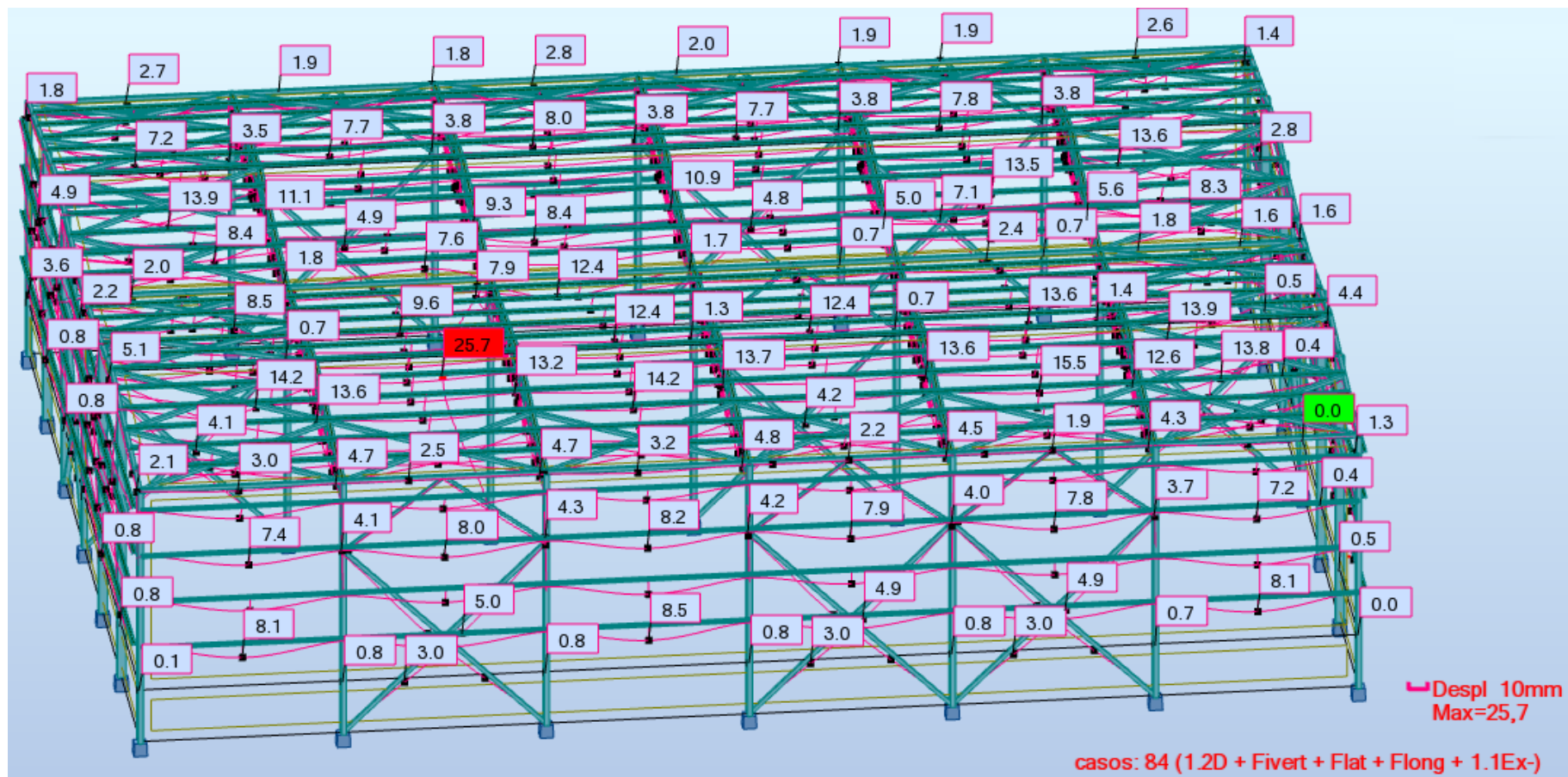


Figura 7.6. Deformación máxima de la estructura en casos de carga sísmicos Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.

7.7.2 Viento

La deformación máxima obtenida para los casos de carga que incluyen la carga viento es de 31,4 [mm]. La deformación máxima admisible se debe calcular como:

$$d_{m\acute{a}x} = \frac{h}{200} = 53,5 \text{ [mm]}$$

Como la deformación máxima obtenida es menor a la máxima admisible, la estructura se encuentra dentro del rango admisible de desplazamiento para el tipo de estructura analizada.

7.8 Recomendaciones

Luego del rediseño de la estructura del galpón industrial y de acuerdo con el criterio planteado por la norma AISC 360-2010, el elemento más solicitado tiene un ratio de $0.98 < 1.0$, por lo cual todos los elementos que componen la edificación cumplen con los criterios de verificación y por lo tanto son capaces de resistir las combinaciones de carga aplicadas.

Los elementos también cumplen con los criterios de deformaciones máximas admisibles.

Como la estructura cumple con las normas aplicadas y con los estados límites exigidos, no se requiere de otra intervención de diseño en la estructura del galpón industrial.

8 CONCLUSIONES

Para finalizar este trabajo de titulación se presentan las siguientes conclusiones:

Se identificaron y clasificaron los diferentes tipos de puente grúa que existen en el mercado en la actualidad. Esta clasificación permitió determinar los tipos de puentes grúa adecuados para cumplir los requerimientos actuales de la empresa. Los puentes grúa seleccionados son puentes grúa clase C de la CMAA, monorraíl y de estructura elevada.

Se investigó el método de certificación de puentes grúa que se aplica actualmente por empresas que definen su rubro como la “recertificación de equipos de izaje”. Este procedimiento consiste en verificar que se realizaron todas las inspecciones y mantenimientos recomendados por el fabricante y realizar una prueba de carga donde se utiliza una carga de levante de 1,25 veces la carga máxima nominal, es decir, para un puente grúa de 10 toneladas de capacidad de levante, se utiliza una carga de prueba de 12,5 toneladas. Sin embargo, este procedimiento carece de un respaldo que asegure que la estructura que soporta al puente grúa sea capaz de resistir estas cargas de prueba sin generar deformaciones plásticas. Es por esta razón que se concluye que el método actual de recertificación no es el más adecuado a todas las estructuras industriales.

Cuando sea necesario realizar el proceso de recertificación de los equipos de izaje se recomienda, de manera adicional, realizar inspecciones visuales de columnas y arriostramientos en busca de defectos superficiales. En caso de encontrar algún defecto o grieta superficial se debe hacer uso de alguno de los métodos de inspección no destructiva (IND) detallados en esta memoria, considerando la finalidad de cada uno y sus ventajas y desventajas.

De forma adicional, se puede realizar un seguimiento de las deformaciones de la estructura antes y después de realizar la prueba de carga, con lo cual se puede verificar si las deformaciones de la estructura se encuentran dentro del rango elástico.

Se analizaron las Normas Chilenas del Instituto Nacional de Normalización que son aplicables en el diseño de la estructura de un galpón industrial. A partir de estas se determinaron las cargas y condiciones que se deben cumplir para la verificación estructural. Estas son:

- Norma Chilena 431 en su versión 2010: “Diseño estructural - Sobrecargas de nieve”
- Norma Chilena 432 en su versión 2010: “Diseño estructural - Cargas de viento”
- Norma Chilena 1537 en su versión 2009: “Diseño Estructural-Cargas Permanentes y Cargas de Uso”
- Norma Chilena 2369 en su versión 2003: “Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales”
- Norma Chilena 3171 en su versión 2010: “Diseño estructural - Disposiciones generales y combinaciones de cargas”

También se analizaron las normas extranjeras que se pueden aplicar de forma complementaria o como reemplazo de las Normas Chilenas:

- Norma ASCE/SEI 7-2005: “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures”
- AISC 360-2010: “Specification for Structural Steel Buildings”

Las simulaciones de viento se realizaron en el software Robot Structural Analysis Professional, el cual utiliza la norma ASCE/SEI 7-2005. Esta es equivalente a la Norma Chilena 432-2010, por lo cual las simulaciones de las cargas de viento realizadas se consideran válidas para la normativa local de Chile.

La Norma AISC 360-2010 se utilizó como reemplazo de la Norma Chilena 427, ya que la normativa local se basa en la norma estadounidense y por tanto, se considera que son equivalentes. De esta forma se realizó la verificación directamente en el software mediante la metodología de diseño LRFD.

Se modeló la estructura del galpón industrial en su totalidad utilizando el software Robot Structural Analysis Professional en su versión 2016 donde se ingresaron todas las combinaciones de cargas descritas en la Norma Chilena 3171-2010 y la Norma Chilena 2369-2003, considerando todas las cargas que se deben aplicar según las normativas analizadas.

Se analizó la estructura del galpón industrial verificando que este sea capaz de resistir las combinaciones de carga aplicables. Respecto a este punto y de acuerdo con las normativas analizadas, se concluye que la estructura del galpón industrial no es capaz de resistir todas las combinaciones de cargas, por lo tanto, fue necesario rediseñar los elementos más solicitados.

Luego del rediseño, donde se modificaron los perfiles para los arriostramientos inferiores y superiores mostrados en la Figura D.1 y la Figura D.2, se realizó una nueva verificación estructural con resultados que permitieron concluir que el galpón es capaz de resistir las combinaciones de carga descritas en la Norma Chilena 3171-2010 y la Norma Chilena 2369-2003.

Para realizar la instalación de los puentes grúa de 5 y 10 toneladas para su funcionamiento en naves paralelas, se recomienda cambiar los arriostramientos más solicitados.

9 BIBLIOGRAFÍA

1. *Prevención de defectos en puentes grúa*. **Verbal, Fernando**. Santiago, Chile : Revista de Ingeniería de Construcción, 1987, Vol. II.
2. **Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo**. NTP 736 Grúas Tipo Puente. *INSHT Web site*. [En línea] 2006. [Citado el: 15 de Marzo de 2017.] http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/701a750/ntp_736.pdf.
3. **Dirección del Trabajo, Gobierno de Chile**. *Código del Trabajo*. Santiago, Chile, 2017. ISBN 978-956-9661-56-3.
4. **Ernst, Hellmut**. *Aparatos De Elevación Y Transporte*. Barcelona, España : Editorial Blume, 1972.
5. **TAEP Grúas**. TAEP Grúas . [En línea] 2011. [Citado el: 16 de Marzo de 2017.] <http://www.gruas-taep.com/site/productos/puentes-grua/>. .
6. **ABUS Grúas**. ABUS Grúas. [En línea] 2017. [Citado el: 16 de Marzo de 2017.] <http://www.abusgruas.es/gruas-y-polipastos/puentes-grua>.
7. **The American Society of Mechanical Engineers**. *ASME B30.2*. New York : s.n., 2005. ISBN 0-7918-2985-5.
8. **ABUS Kransysteme**. *Manual General de Producto para grúas ABUS*. Gummersbach, Alemania : ABUS Kransysteme, 2012. .
9. **American Society for Nondestructive Testing, Inc**. *Nondestructive Testing Handbook: Liquid Penetrant Testing*. [ed.] Noel A. Tracy. Colombus, OH : Technical Editor, 2011. Vol. Volume 2. ISBN-13 978-1-57117-028-6.
10. **Iddings, Frank A. y Shull, Peter J**. Liquid Penetrant. [aut. libro] Peter J. Shull. *Nondestructive evaluation: Theory, techniques, and applications*. New York : M. Dekker., 2002, Capítulo 2.
11. **Shull, Peter J. y Tittmann, Bernard R**. Ultrasound. [aut. libro] Peter J. Shull. *Nondestructive evaluation: Theory, techniques, and applications*. New York : M. Dekker, 2002, Capítulo 3.

12. **Lindgren, Arthur y Shull, Peter J.** Magnetic Particle. [aut. libro] Peter J. Shull. *Nondestructive evaluation: Theory, techniques, and applications*. New York : M. Dekker, 2002, Capítulo 4.
13. **Martz, Harry E., Logan, Clinton M. y Shull, Peter J.** Radiology. [aut. libro] Peter J. Shull. *Nondestructive evaluation: Theory, techniques, and applications*. New York : M. Dekker, 2002, Capítulo 7.
14. **Shull, Peter J.** Introduction to NDE. *Nondestructive evaluation: Theory, techniques, and applications*. New York : M. Dekker, 2002, Capítulo 1.
15. **Instituto Nacional de Normalización.** *Norma Chilena 1537: Diseño Estructural-Cargas Permanentes y Cargas de Uso*. Santiago, Chile, 2009.
16. —. *Norma Chilena 432: Diseño estructural - Cargas de viento*. Santiago, 2010.
17. —. *Norma Chilena 431: Diseño estructural - Sobrecargas de nieve*. Santiago, 2010.
18. —. *Norma Chilena 3171: Diseño estructural - Disposiciones generales y combinaciones de cargas*. Santiago, Chile, 2010.
19. —. *Norma Chilena 2369: Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales*. Santiago, Chile, 2003.
20. **Crane Manufacturers Association of America, Inc.** *Specification N°74: Specifications for Top Running & Under Running Single Girder Electric Traveling Cranes Utilizing Under Running Trolley Hoist*. EEUU, 2015.
21. **Crane Manufacturers Association of America.** *Specification N°70: Specifications for Top Running Bridge & Gantry Type Multiple Girder Electric Overhead Traveling Cranes*. EE.UU : s.n., 2015.
22. **American Institute of Steel Construction.** *AISC 360: Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, 2010.
23. **American Society of Civil Engineers.** *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Virginia : ASCE STANDARD, 2005. 0-7844-0831-9.
24. **Gerdau Corsa.** Miembros en Flexión- Trabes y Vigas: Gerdau Corsa. *Sitios Web Gerdau*. [En línea] 2015. [Citado el: 20 de Octubre de 2017.]

<https://www.gerdau.com/gerdaucorsa/es/productsservices/products/Document%20Gallery/miembros-en-flexion-trabes-y-vigas.pdf>.

ANEXOS

A NUMERACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL MODELO

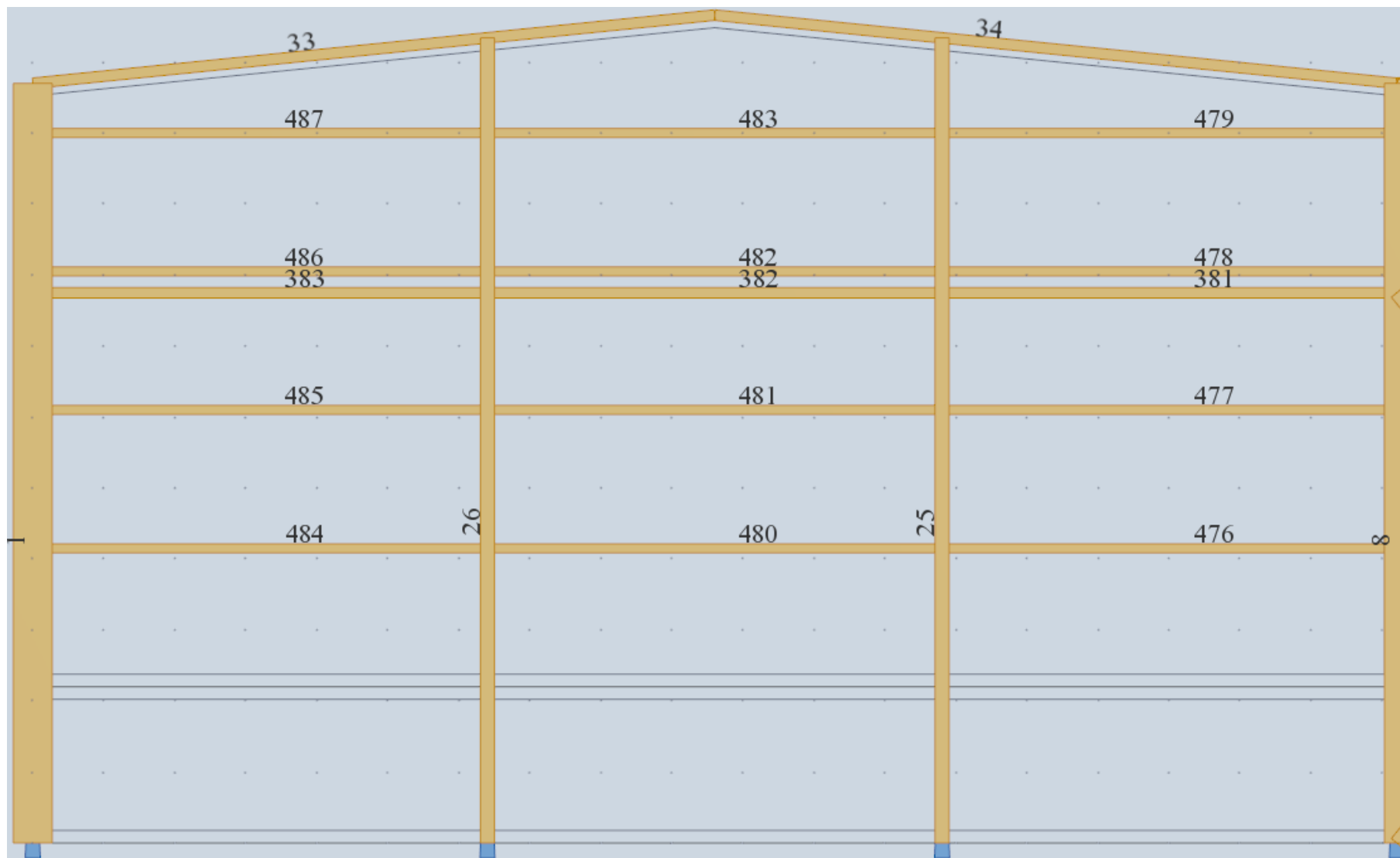


Figura A.1. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 1 y 8. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.

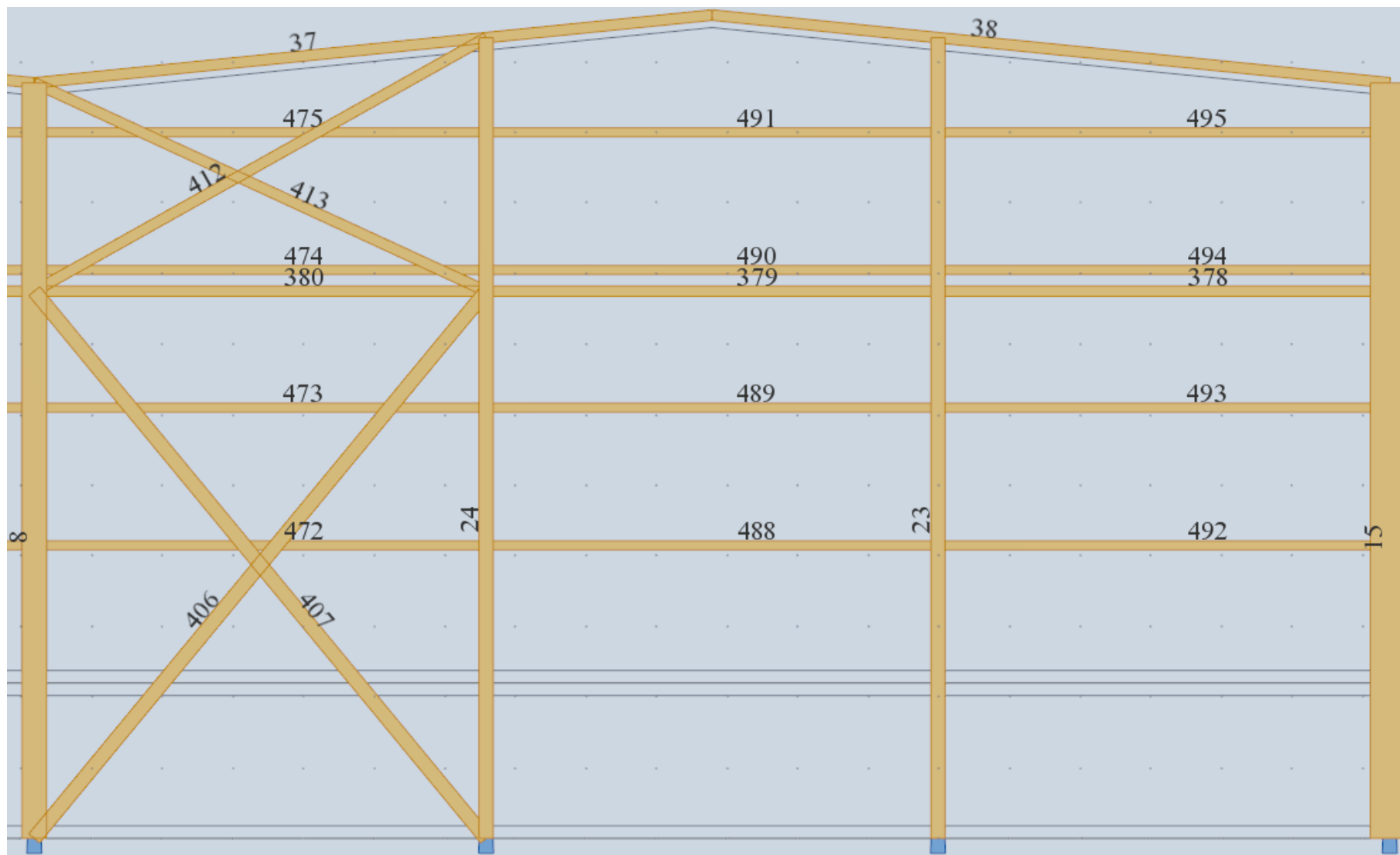


Figura A.2. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 8 y 15. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk.

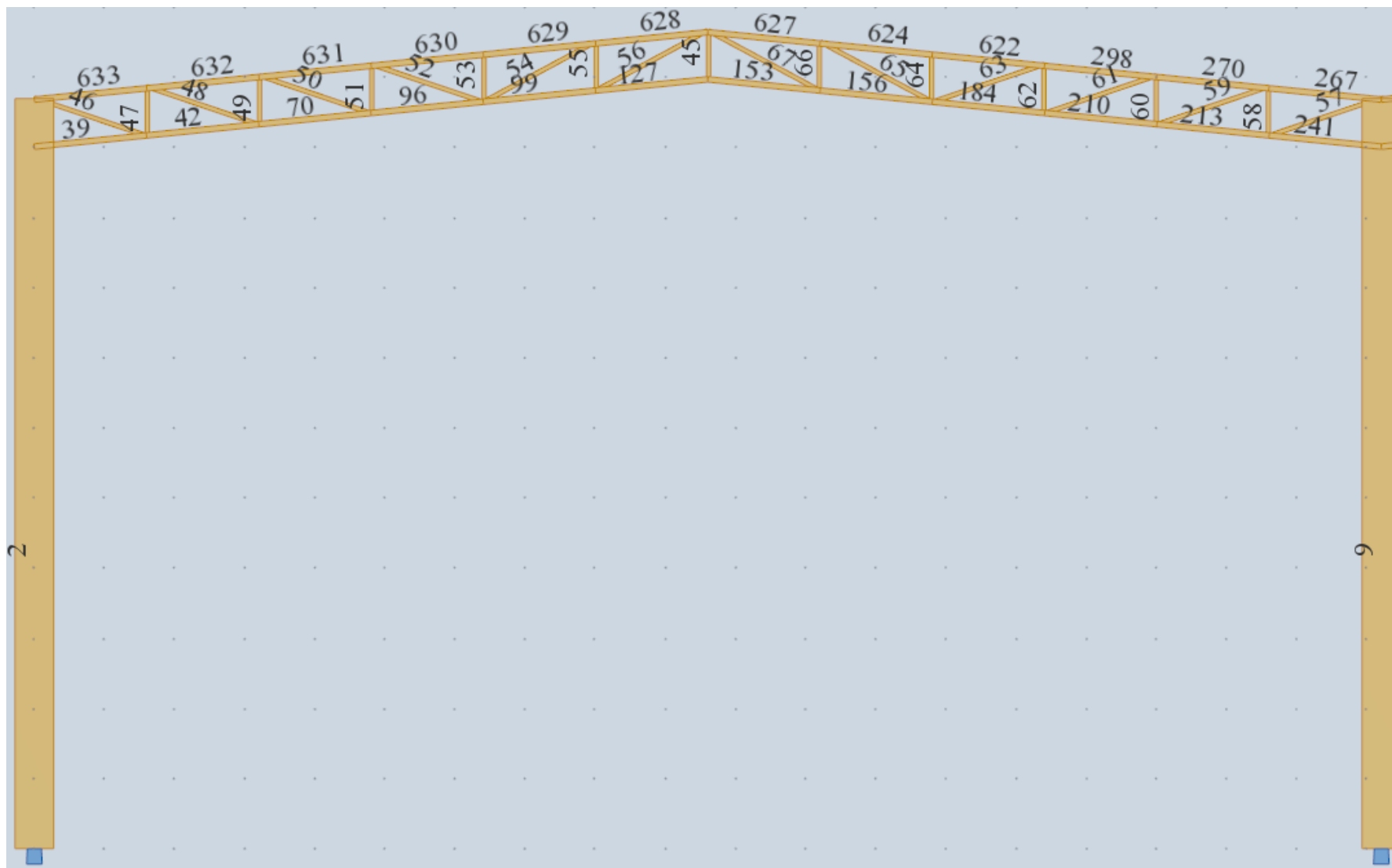


Figura A.3. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 2 y 9. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk



Figura A.4. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 9 y 16. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

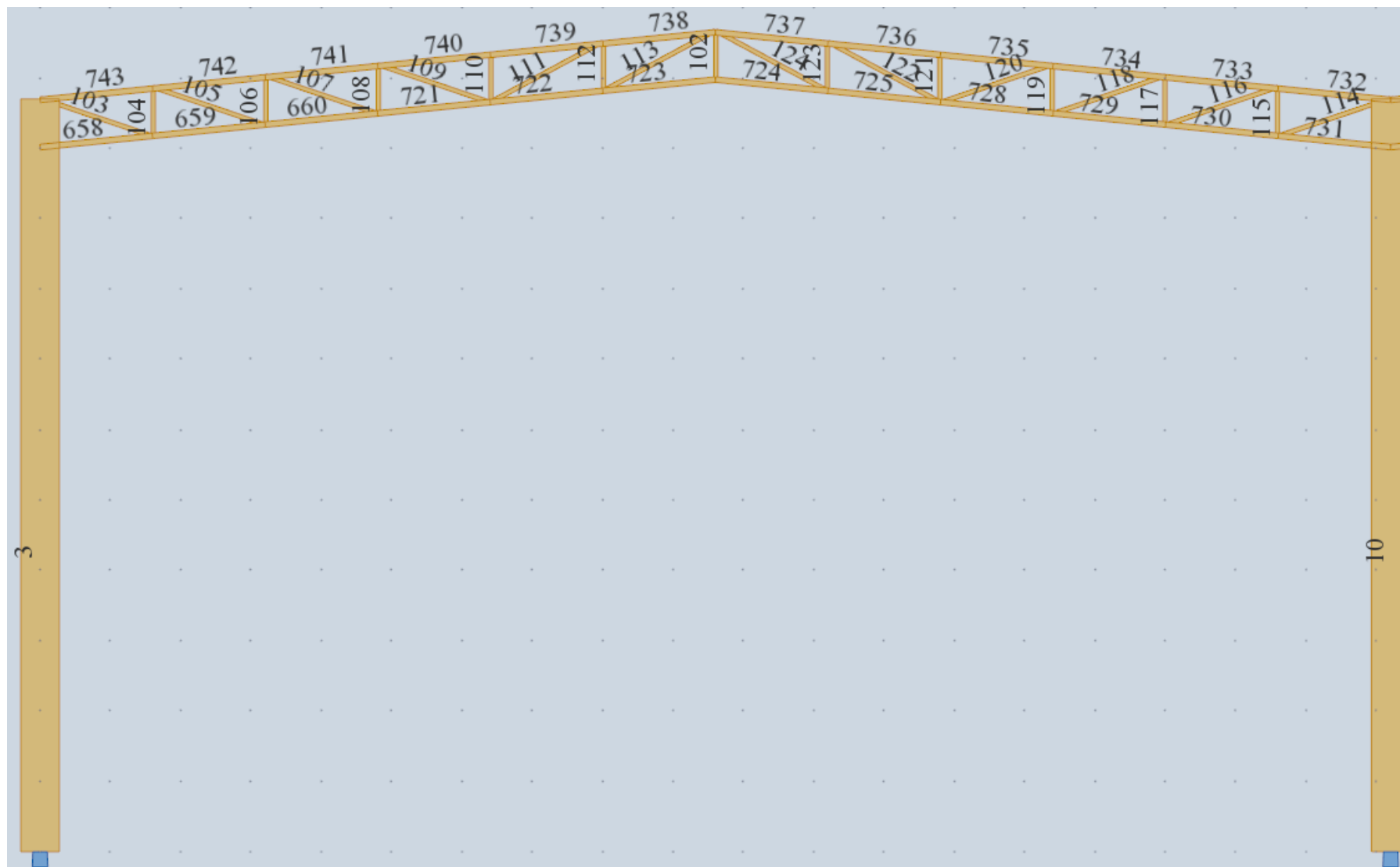


Figura A.5. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 3 y 10. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

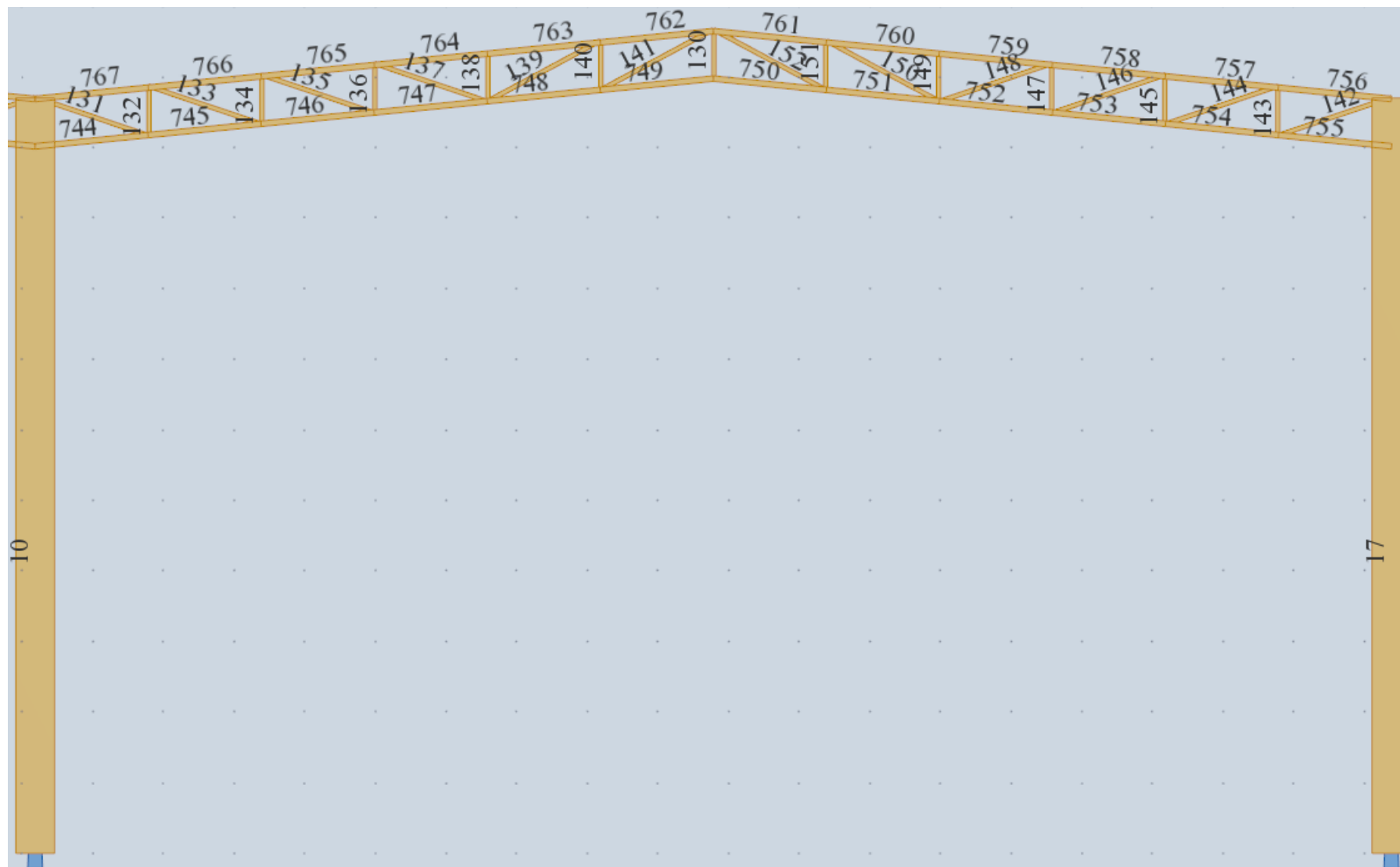


Figura A.6. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 10 y 17. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

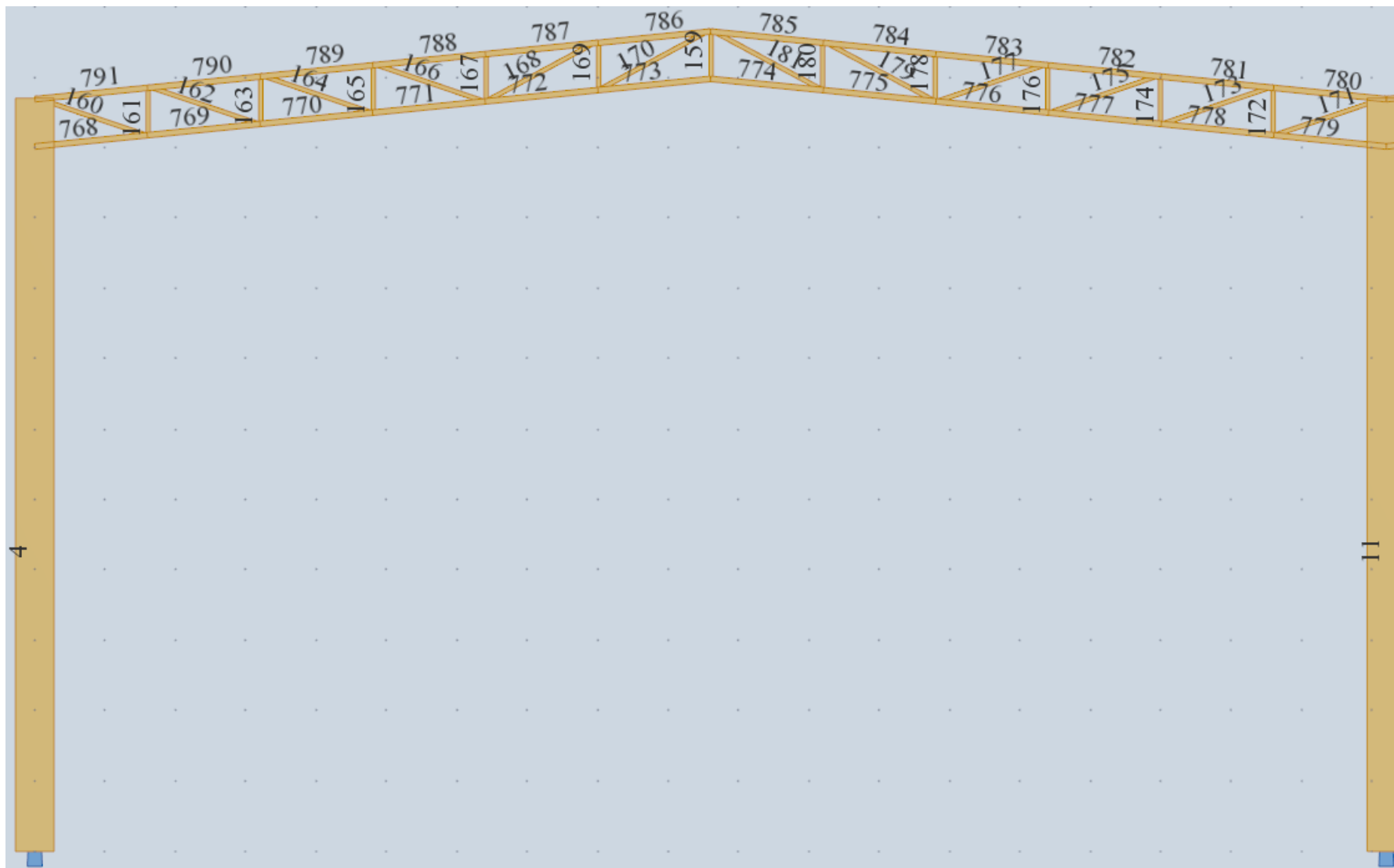


Figura A.7. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 4 y 11. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk



Figura A.8. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 11 y 18. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

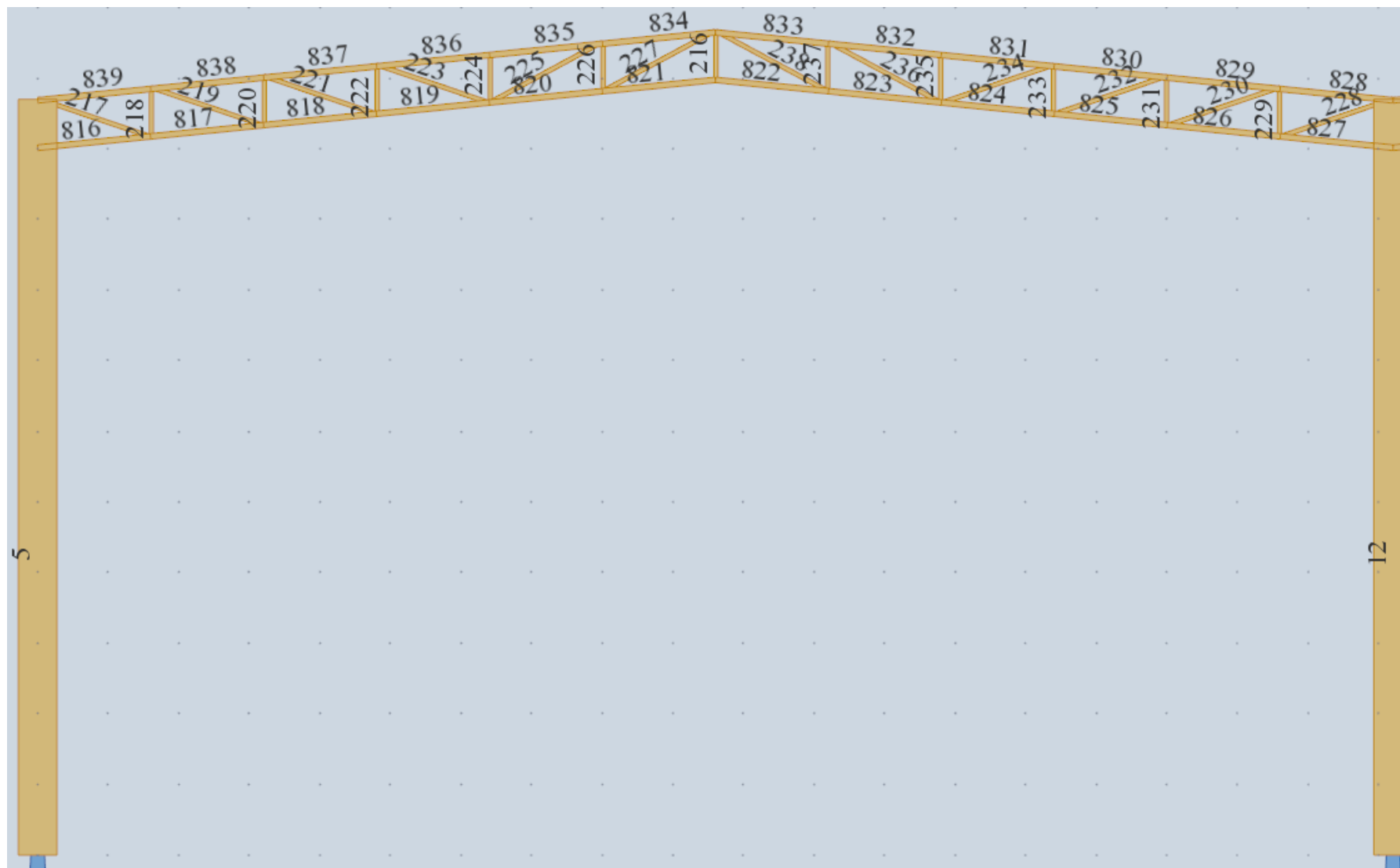


Figura A.9. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 5 y 12. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

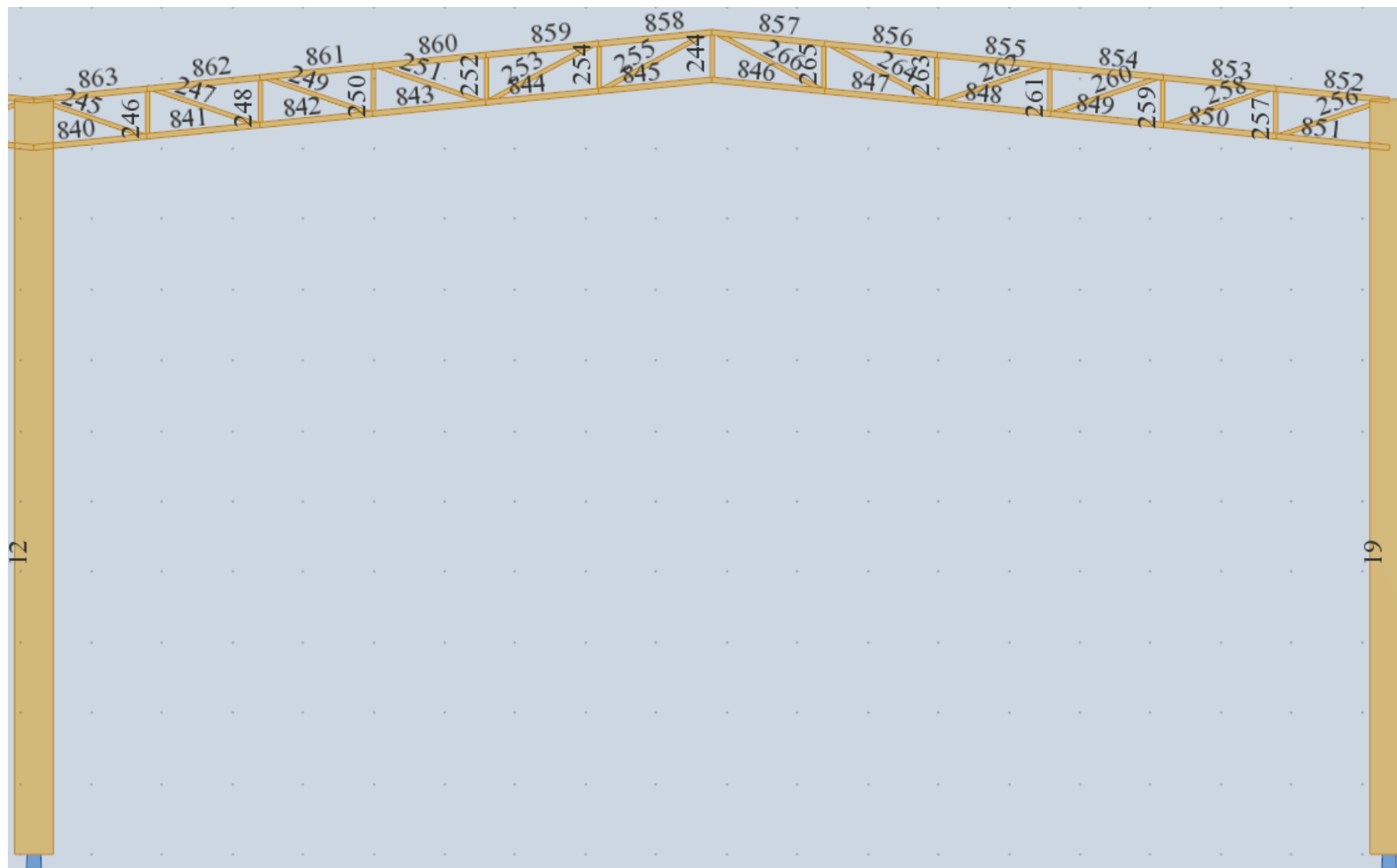


Figura A.10. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 12 y 19. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

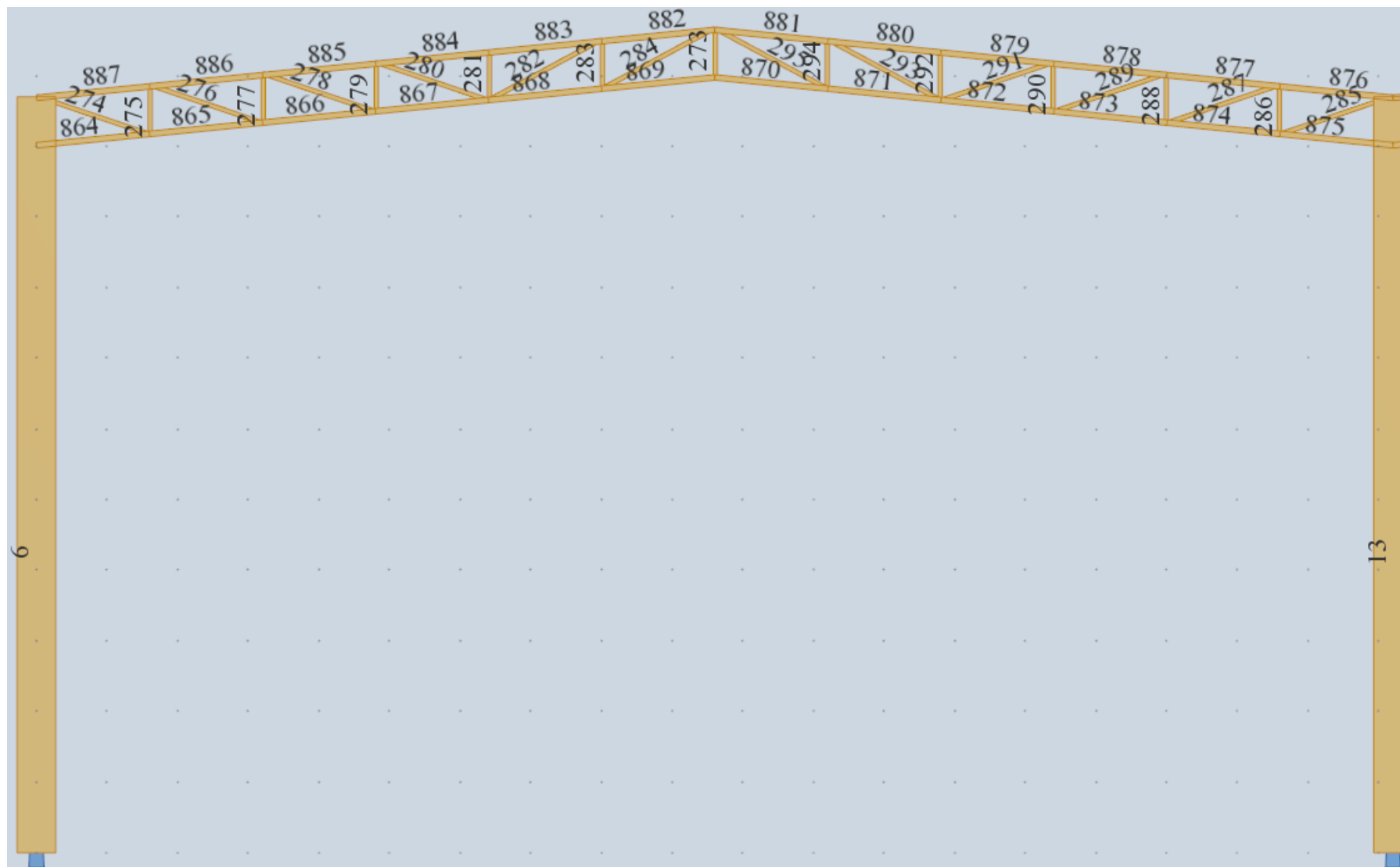


Figura A.11. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 6 y 13. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

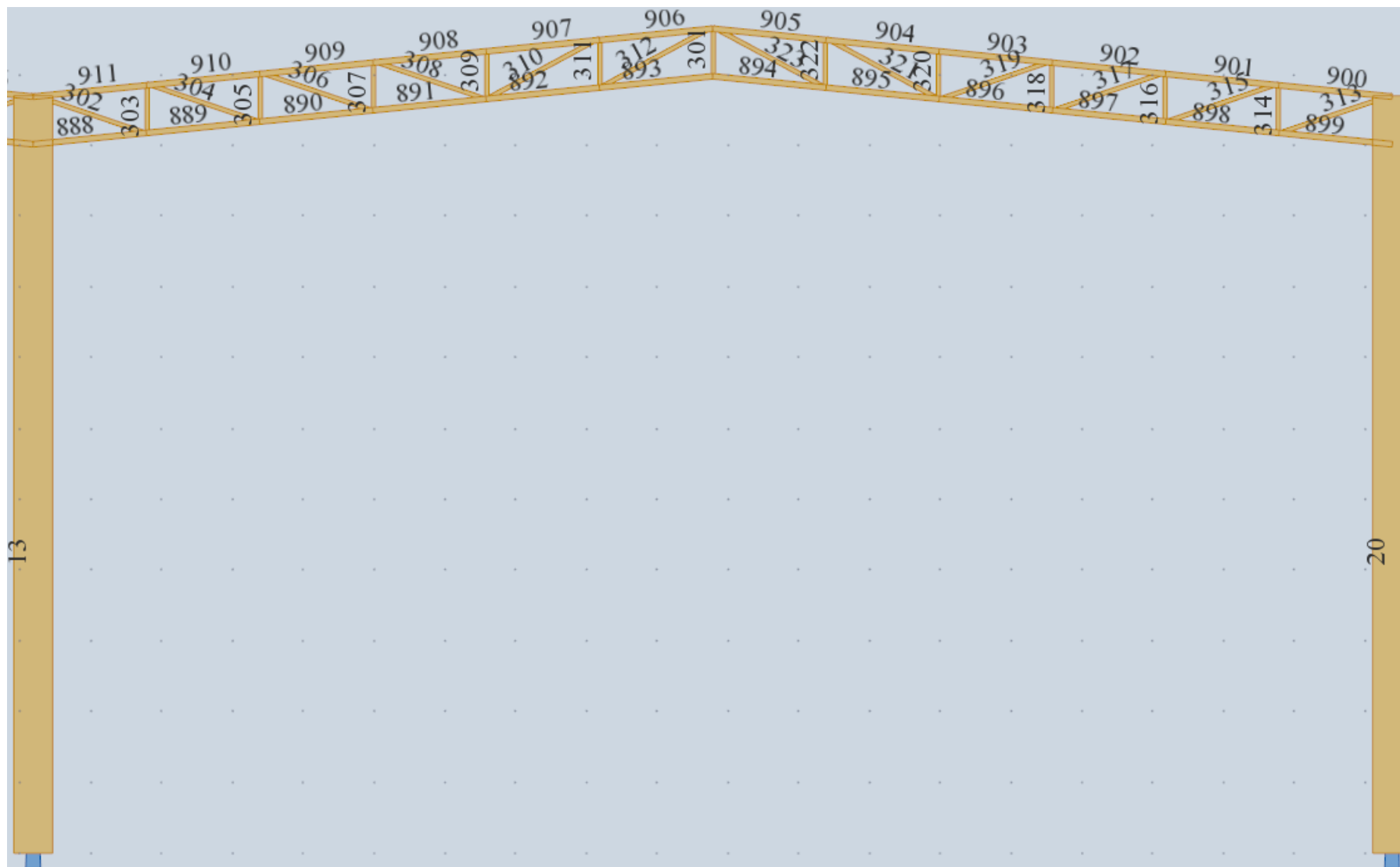


Figura A.12. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 13 y 20. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

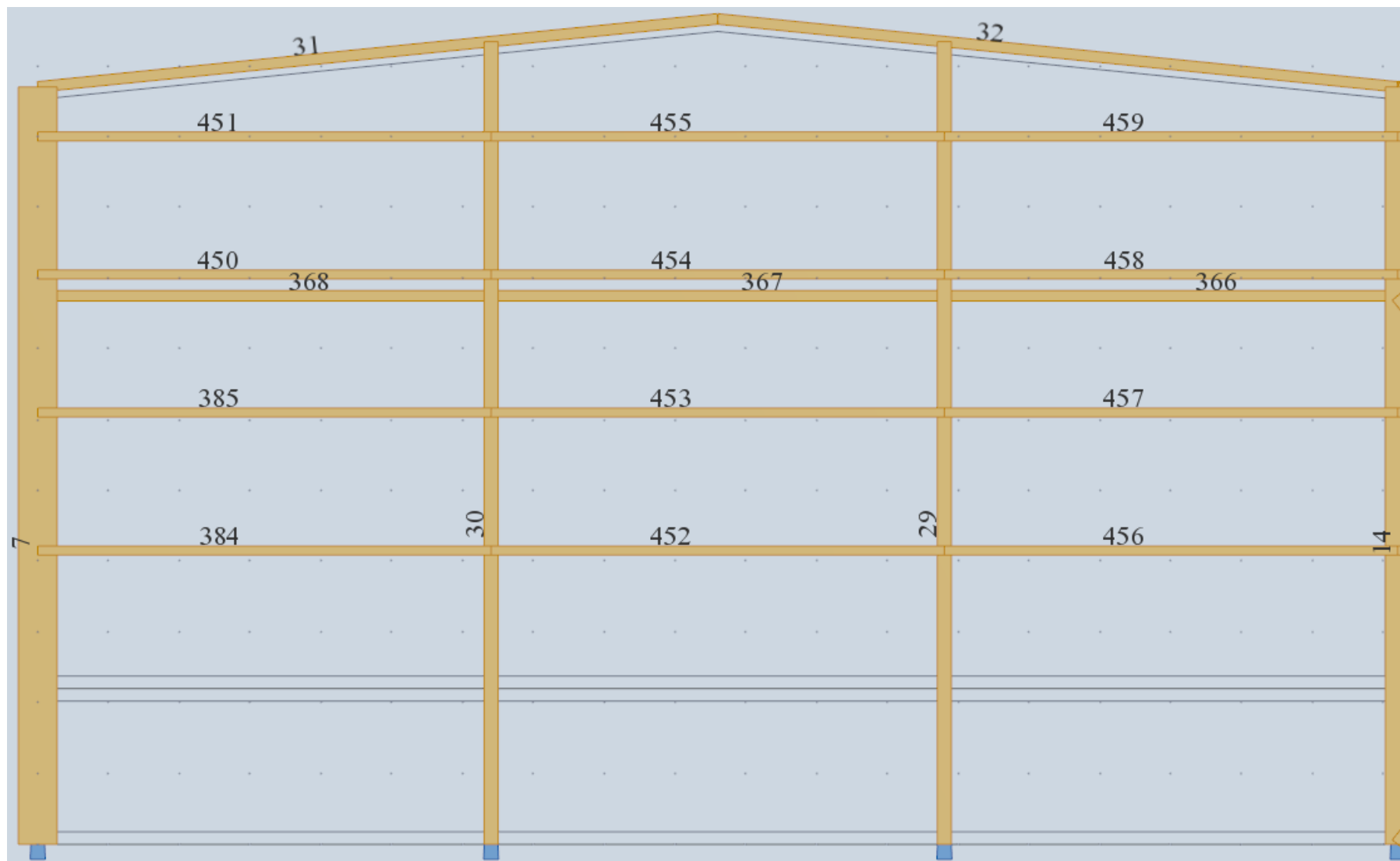


Figura A.13. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 7 y 14. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

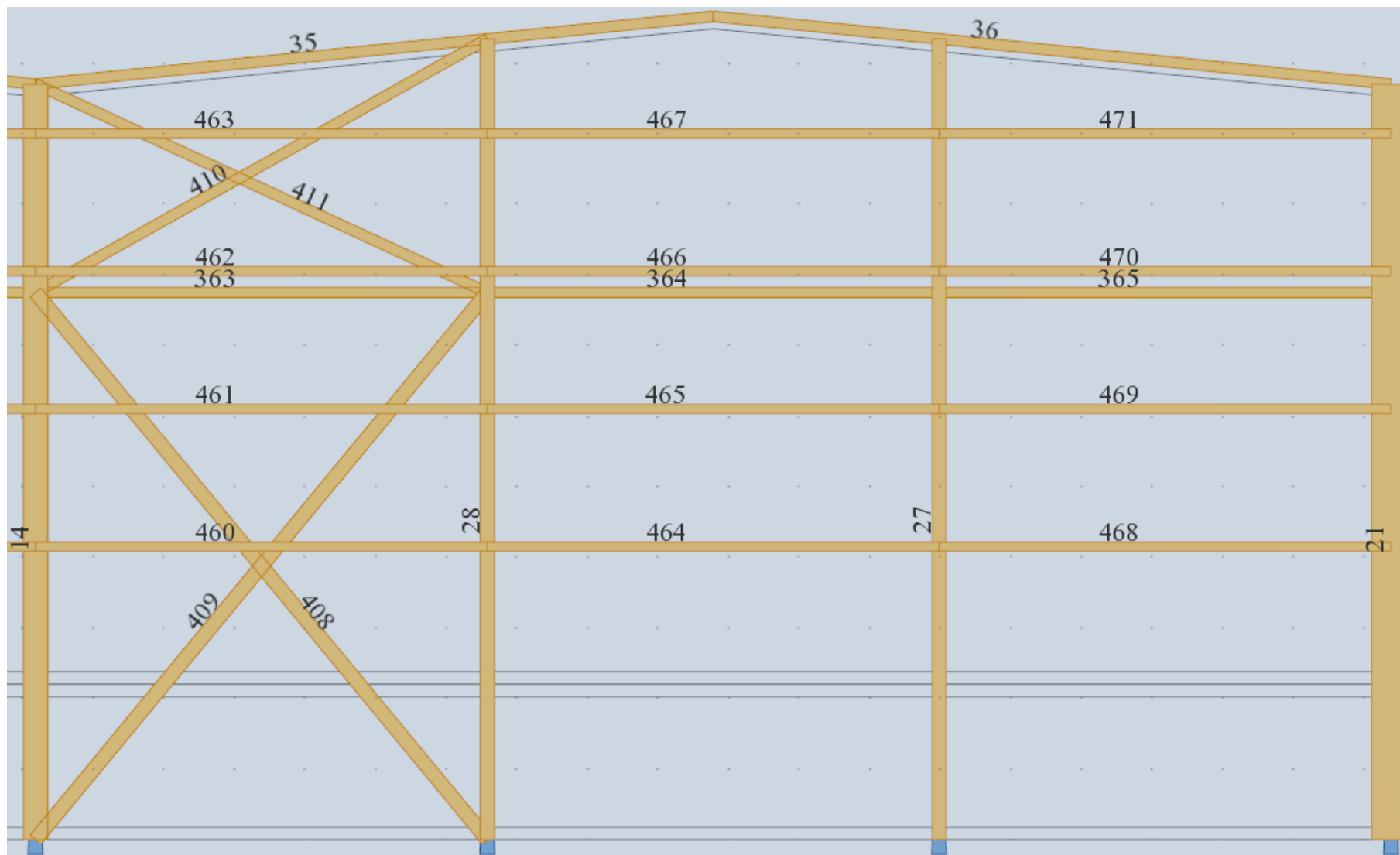


Figura A.14. Vista frontal del galpón industrial. Columnas 14 y 21. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

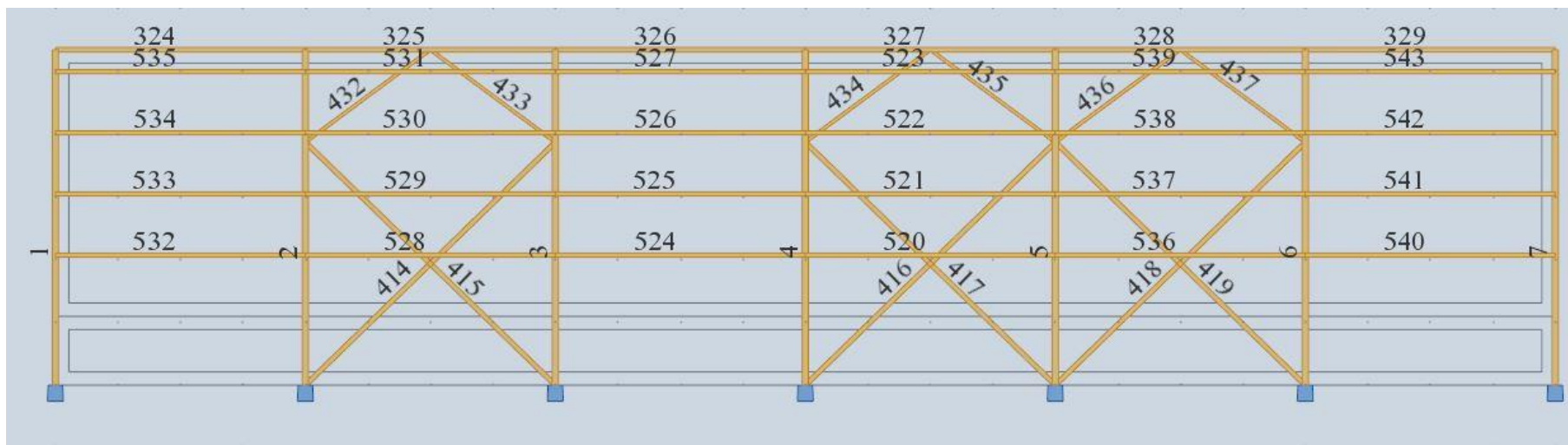


Figura A.15. Vista lateral del galpón industrial. Columnas 1 a 7. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

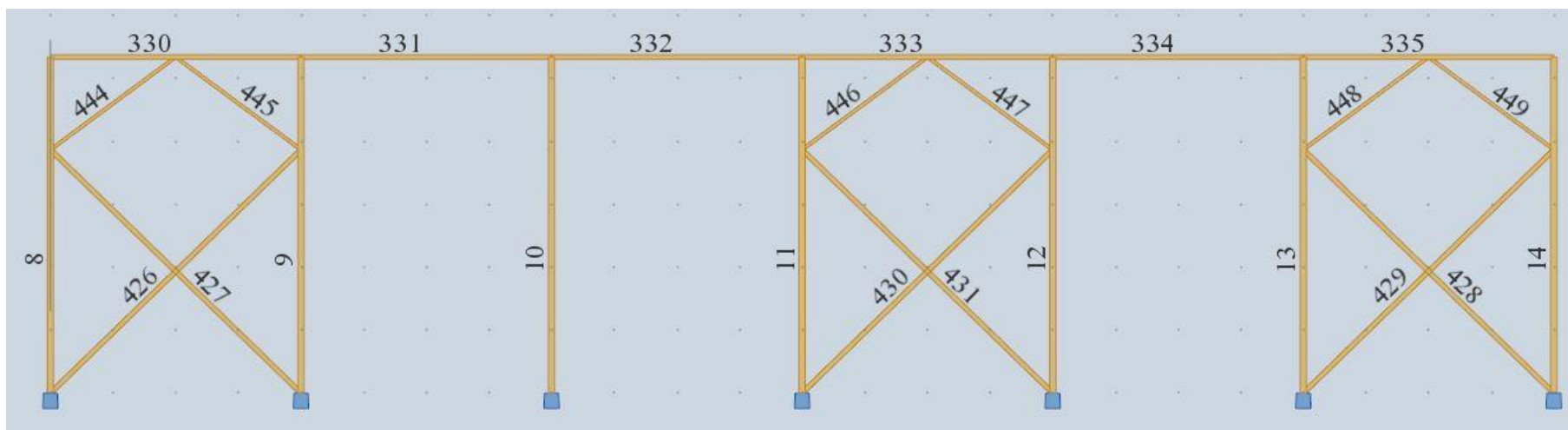


Figura A.16. Vista central del galpón industrial. Columnas 8 a 14. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

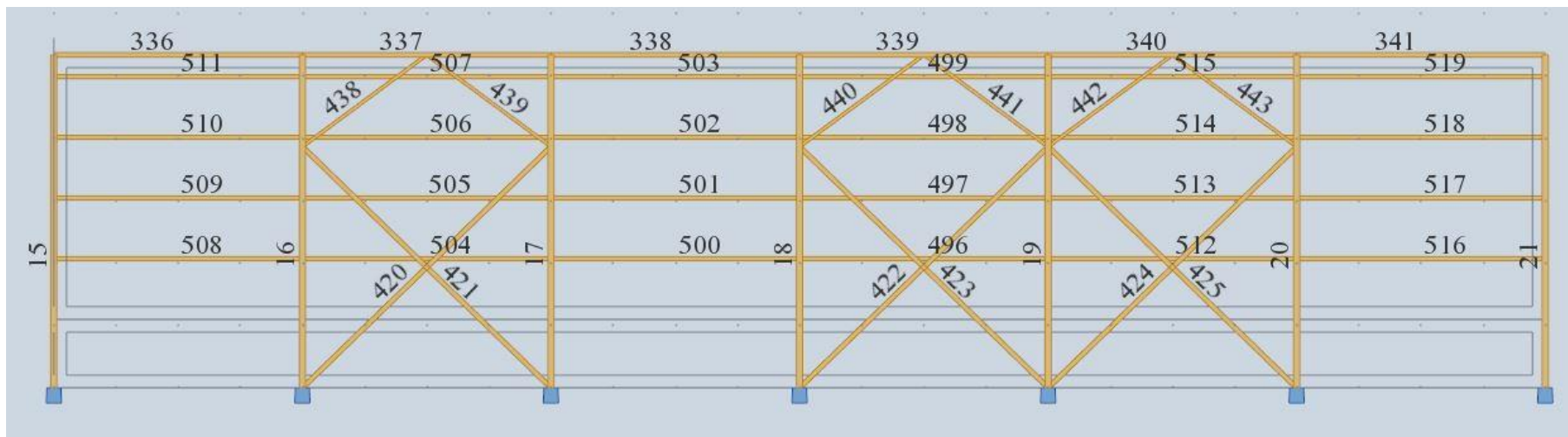


Figura A.17. Vista lateral del galpón industrial. Columnas 15 a 21. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

B COTIZACIÓN INAMAR

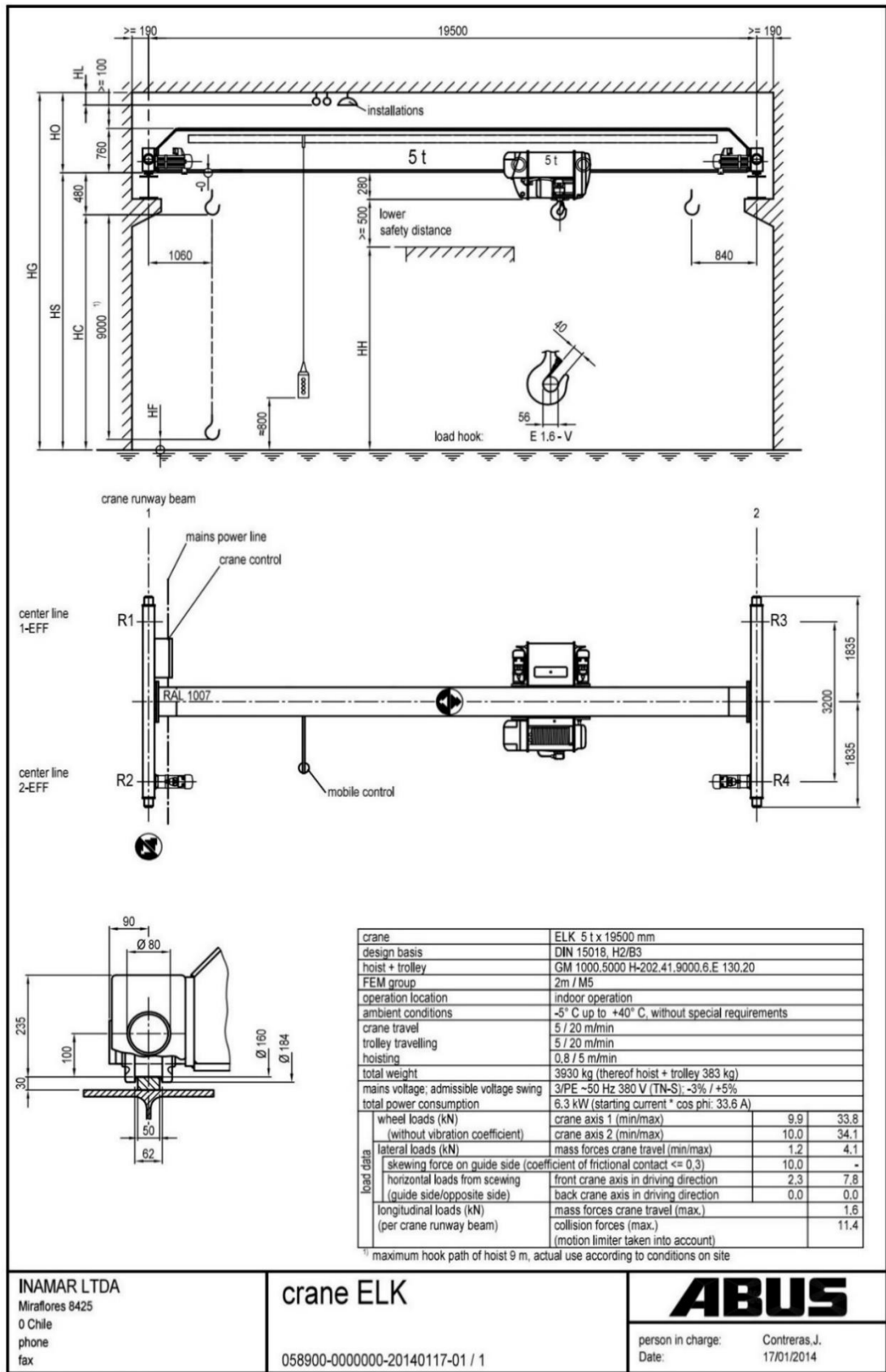


Figura B.1. Cotización de INAMAR Ltda. para puente grúa de 5 toneladas.

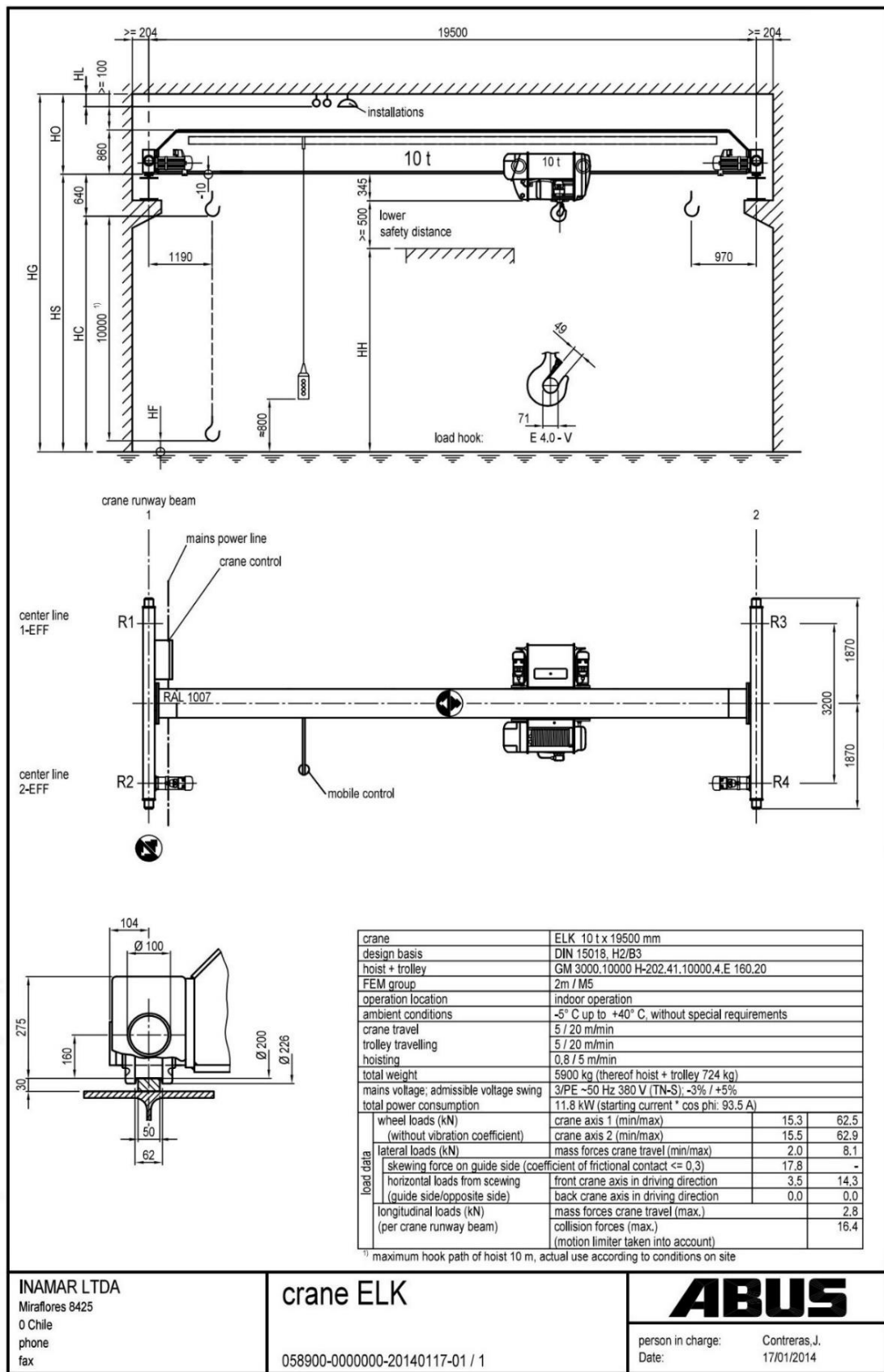


Figura B.2. Cotización de INAMAR Ltda. para puente grúa de 10 toneladas.

C COMBINACIONES DE CARGA

Tabla C.1. Combinaciones de carga ingresadas para evaluar la estructura. Fuente: Elaboración Propia

20	$1.4D$	47	$D + L + Sb + F_{\text{impactoV}} + F_{\text{lateral}} + F_{\text{longitudinal}}$
21	$1.2D + 1.6L + 0.5Sb$	48	$D + L + Sd + F_{\text{impactoV}} + F_{\text{lateral}} + F_{\text{longitudinal}}$
22	$1.2D + 1.6L + 0.5Sd$	49	$0.75(D + L + Sb + F_{\text{impactoV}} + W_{x+})$
23	$1.2D + 1.6Sb + L$	50	$0.75(D + L + Sb + F_{\text{impactoV}} + W_{x-})$
24	$1.2D + 1.6Sd + L$	51	$0.75(D + L + Sb + F_{\text{impactoV}} + W_{y+})$
25	$1.2D + 1.6Sb + 0.8W_{x+}$	52	$0.75(D + L + Sb + F_{\text{impactoV}} + W_{y-})$
26	$1.2D + 1.6Sb + 0.8W_{x-}$	53	$0.75(D + L + Sd + F_{\text{impactoV}} + W_{y+})$
27	$1.2D + 1.6Sb + 0.8W_{y+}$	54	$0.75(D + L + Sd + F_{\text{impactoV}} + W_{y-})$
28	$1.2D + 1.6Sb + 0.8W_{y-}$	55	$0.75(D + L + Sb + F_{\text{impactoV}} + F_{\text{lateral}} + 0.5W_{x+})$
29	$1.2D + 1.6Sd + 0.8W_{y+}$	56	$0.75(D + L + Sb + F_{\text{impactoV}} + F_{\text{lateral}} + 0.5W_{x-})$
30	$1.2D + 1.6Sd + 0.8W_{y-}$	57	$0.75(D + L + Sb + F_{\text{impactoV}} + F_{\text{lateral}} + 0.5W_{y+})$
31	$1.2D + 1.6W_{x+} + L + 0.5Sb$	58	$0.75(D + L + Sb + F_{\text{impactoV}} + F_{\text{lateral}} + 0.5W_{y-})$
32	$1.2D + 1.6W_{x-} + L + 0.5Sb$	59	$0.75(D + L + Sb + F_{\text{impactoV}} + F_{\text{lateral}} + 0.5W_{y+})$
33	$1.2D + 1.6W_{y+} + L + 0.5Sb$	60	$0.75(D + L + Sb + F_{\text{impactoV}} + F_{\text{lateral}} + 0.5W_{y-})$
34	$1.2D + 1.6W_{y-} + L + 0.5Sb$	61	$0.75(D + L + Sb + E_{x+})$
35	$1.2D + 1.6W_{y+} + L + 0.5Sd$	62	$0.75(D + L + Sb + E_{y+})$
36	$1.2D + 1.6W_{y-} + L + 0.5Sd$	63	$1.2D + F_{\text{impactoV}} + F_{\text{lateral}} + F_{\text{longitudinal}} + 1.1E_x$
37	$1.2D + 1.4E_{x+} + L + 0.2Sb$	64	$1.2D + F_{\text{impactoV}} + F_{\text{lateral}} + F_{\text{longitudinal}} + 1.1E_y$
38	$1.2D + 1.4E_{y+} + L + 0.2Sb$	65	$0.9D + 1.1E_{x+}$
39	$1.2D + 1.4E_{x+} + L + 0.2Sd$	66	$0.9D + 1.1E_{y+}$
40	$1.2D + 1.4E_{y+} + L + 0.2Sd$	76	$1.2D + 1.4E_{x-} + L + 0.2Sb$
41	$0.9D + 1.6W_{x+}$	77	$1.2D + 1.4E_{y-} + L + 0.2Sb$
42	$0.9D + 1.6W_{x-}$	78	$1.2D + 1.4E_{x-} + L + 0.2Sd$
43	$0.9D + 1.6W_{y+}$	79	$1.2D + 1.4E_{y-} + L + 0.2Sd$
44	$0.9D + 1.6W_{y-}$	80	$0.9D + 1.4E_{x-}$
45	$0.9D + 1.4E_{x+}$	81	$0.9D + 1.4E_{y-}$
46	$0.9D + 1.4E_{y+}$	82	$0.75(D + L + Sb + E_{x-})$
		83	$0.75(D + L + Sb + E_{y-})$
		84	$1.2D + F_{\text{impactoV}} + F_{\text{lateral}} + F_{\text{longitudinal}} + 1.1E_{x-}$
		85	$1.2D + F_{\text{impactoV}} + F_{\text{lateral}} + F_{\text{longitudinal}} + 1.1E_{y-}$

D MAPA DE RESULTADOS

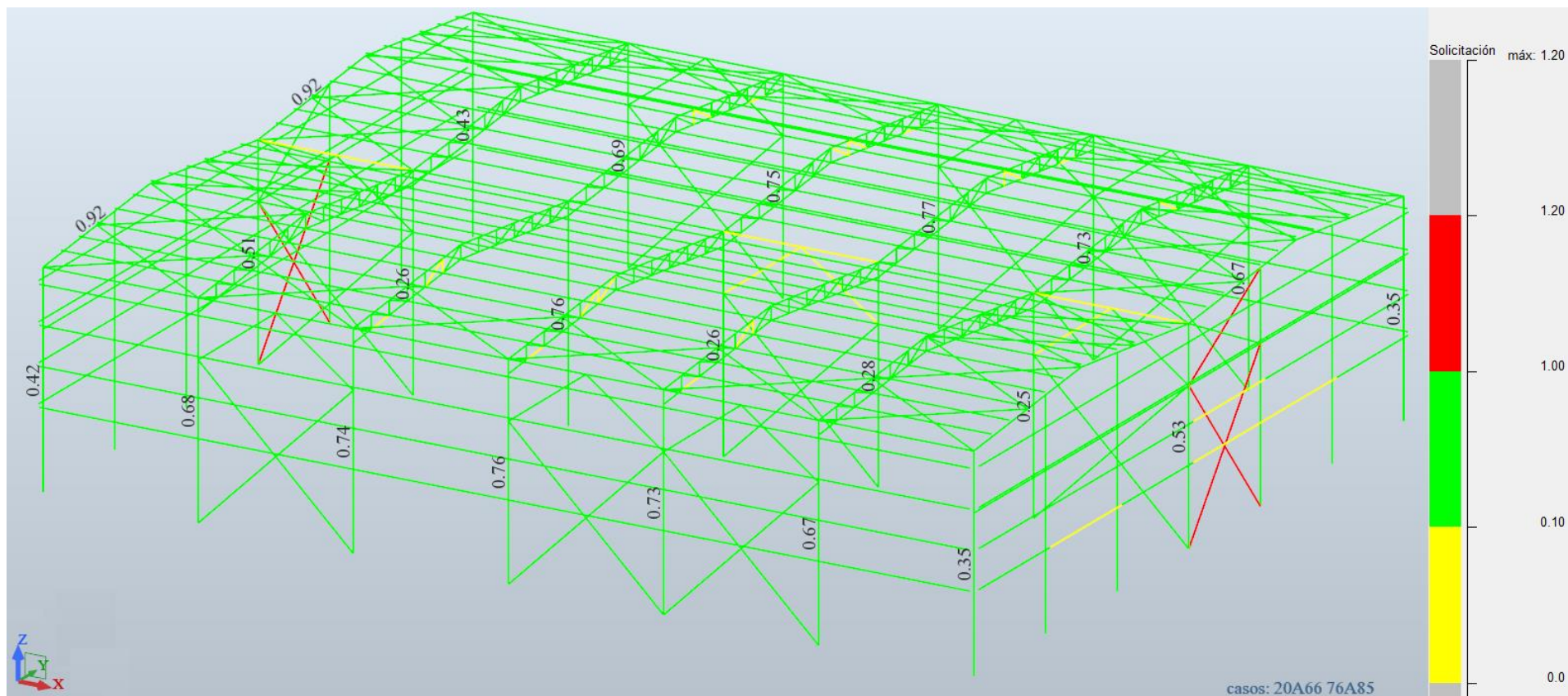


Figura D.1. Mapa de resultados de los elementos del galpón industrial. Ratio máximo obtenido 1.20 (en rojo). Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

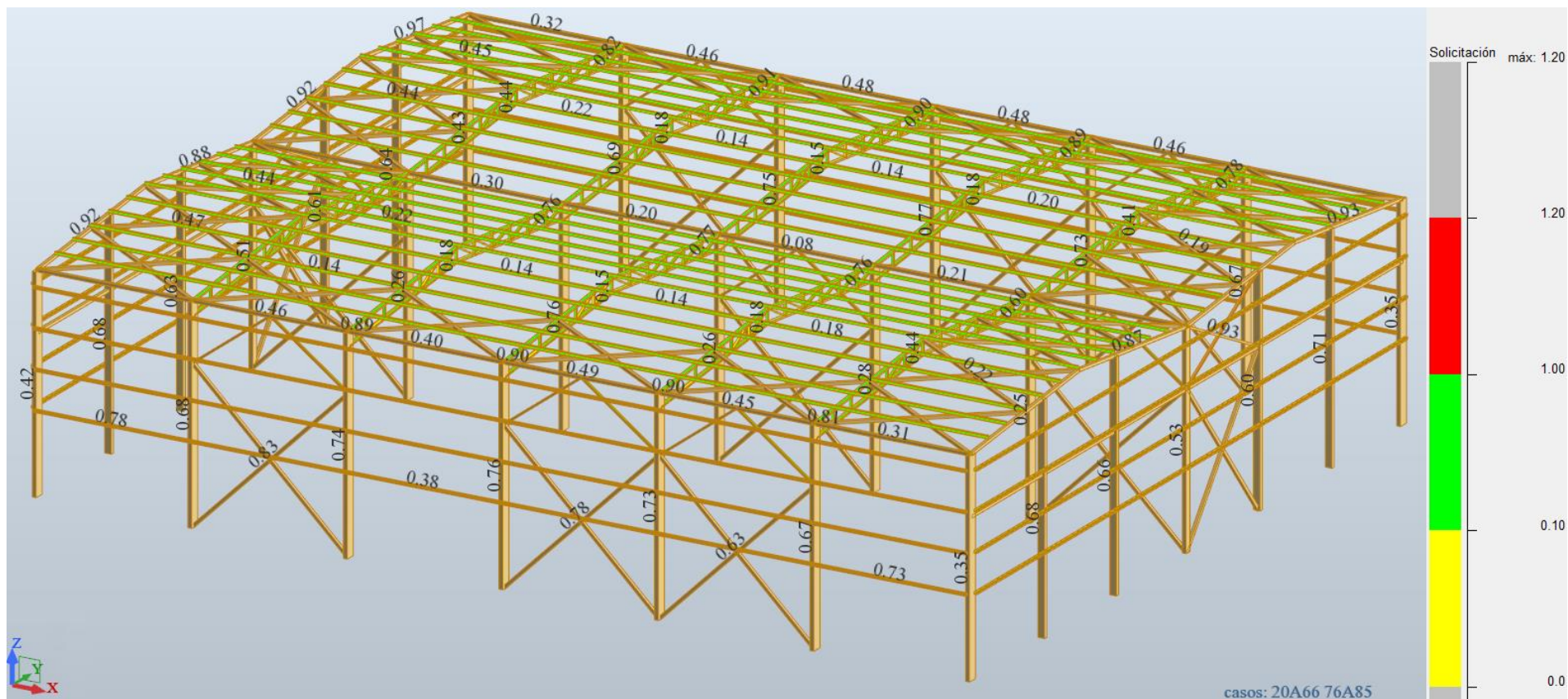


Figura D.2. Mapa de resultados de los elementos del galpón industrial. Fuente: Elaboración propia. Producido por un producto educativo de Autodesk

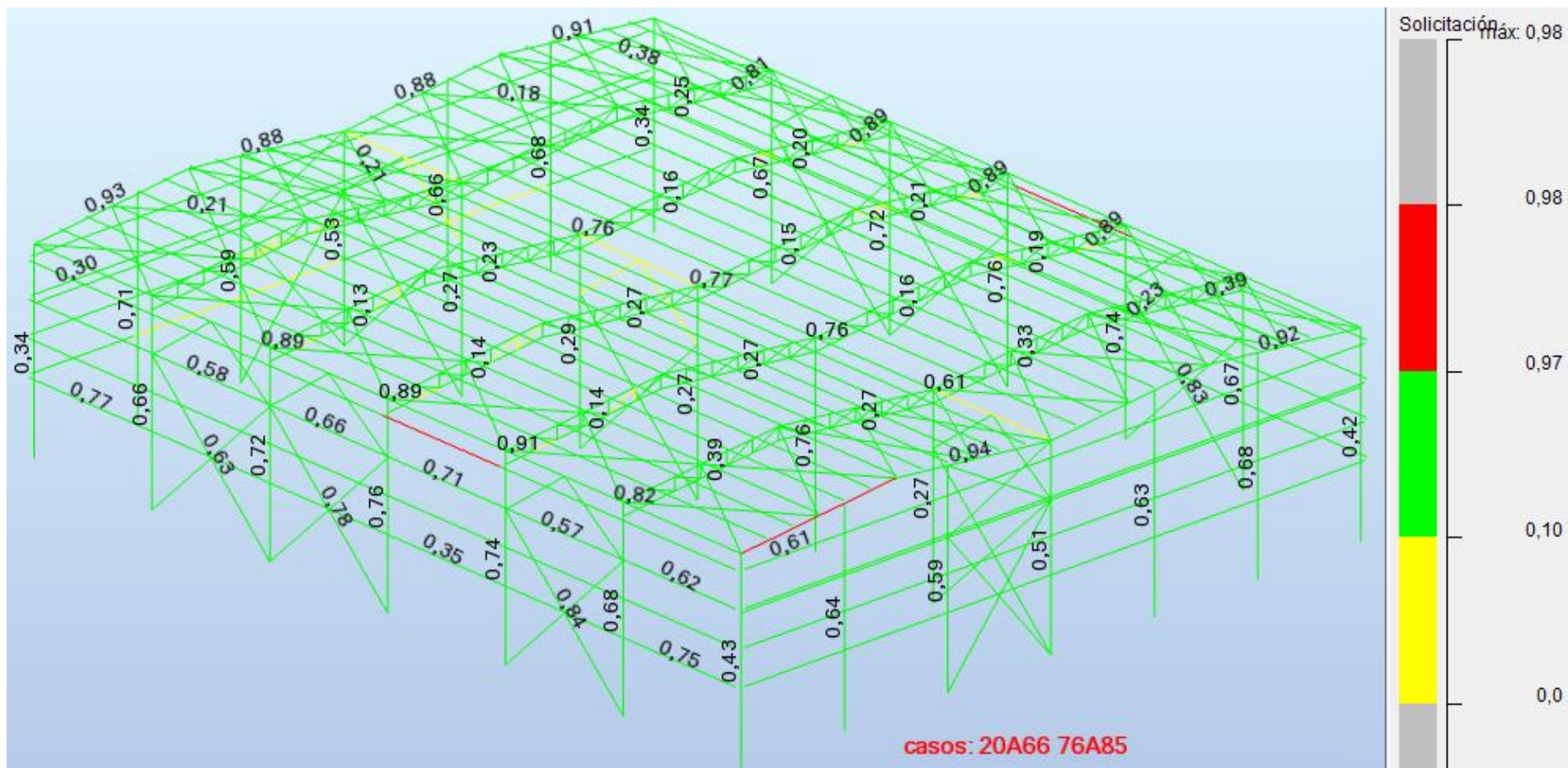


Figura D.3. Mapa de resultados de los elementos del galpón industrial luego de aplicar las recomendaciones. Ratio máximo obtenido 0.98 (en rojo). Fuente: Elaboración propia.

Producido por un producto educativo de Autodesk

