

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA MECÁNICA



UNS
UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL SANTA

**Diseño estructural de un puente grúa de viga única, para soportar
carga de 9 toneladas**

**TESIS PARA OPTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO**

Autor:

Bach. Pretel Diaz, Charlton Harley

Asesor:

Msc. Escalante Espinoza, Nelder Javier

Código ORCID: 0000-0001-8586-3021

NUEVO CHIMBOTE – PERÚ

2026


HOJA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR

El presente informe de tesis titulado:

“DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN PUENTE GRÚA DE VIGA ÚNICA, PARA SOPORTAR CARGAS DE 9 TONELADAS”, elaborado por el bachiller:

PRETEL DIAZ, CHARLTON HARLEY

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico, ha constado con el asesoramiento de quien deja constancia de su aprobación. Por tal motivo, firmo el presente trabajo en calidad de asesor.



Msc. Escalante Espinoza, Nelder Javier
Código ORCID: 0000-0001-8586-3021
Asesor

HOJA DE CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR

El presente informe de tesis titulado:

“DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN PUENTE GRÚA DE VIGA ÚNICA, PARA SOPORTAR CARGAS DE 9 TONELADAS”, elaborado por el bachiller:

PRETEL DIAZ. CHARLTON HARLEY

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico, fue revisado y aprobado por el siguiente Jurado Evaluador:



Msc. Escobedo Ojeda, Rusber Alberto
Cod. ORCID: 0000-0003-0194-168X
Presidente



Msc. Escalante Espinoza, Nelver Javier
Cod. ORCID: 0000-0001-8586-3021
Integrante



Msc. Calderón Rodríguez, Luis Carlos
Cod. ORCID: 0000-0002-9447-2257
Secretario

ACTA DE INSTALACIÓN PARA SUSTENTACIÓN INFORME FINAL DE TESIS

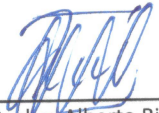
El día 24 del mes de noviembre del año dos mil veinticinco, siendo las 10:30 am. En el Laboratorio de Uso Múltiple de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica-FI-UNS, en concordancia a lo dispuesto en el Oficio Múltiple N° 034-2022-UNS-CU-SG, se instaló el Jurado Evaluador designado mediante Resolución N°-410-2025-UNS-CFI, y de expedito según Resolución Decanal N° 812-2025-UNS-FI integrado por los docentes: **Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda (presidente)**, **Msc. Luis Carlos Calderón Rodríguez (secretario)** y el **Msc. Nelver Javier Escalante Espinoza (Integrante)**, para dar inicio a la sustentación de la Tesis titulada: **"DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTE GRÚA DE VIGA ÚNICA, PARA SOPORTAR CARGAS DE 9 TONELADAS"**, presentado por el bachiller: **PRETEL DÍAZ CHARLTON HARLEY, con código de matrícula N° 0201116027**, quien fue asesorado por el Msc. Nelver Javier Escalante Espinoza, según Resolución Decanal N.º 051-2024-UNS-FI.


El Jurado Evaluador, después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo, y con las sugerencias pertinentes en concordancia con el Reglamento General de Grados y Títulos, vigente, declaran aprobar:

BACHILLER	PROMEDIO VIGESIMAL	PONDERACIÓN
PRETEL DÍAZ CHARLTON HARLEY	17	Bueno

Siendo las 11:00 a m del mismo día, se dio por terminado el acto de sustentación, firmando la presente acta en señal de conformidad.

Nuevo Chimbote, noviembre 24 de 2025


Msc. Rusber Alberto Risco Ojeda
PRESIDENTE


Msc. Luis Carlos Calderón Rodríguez
SECRETARIO


Msc. Nelver Javier Escalante Espinoza
INTEGRANTE

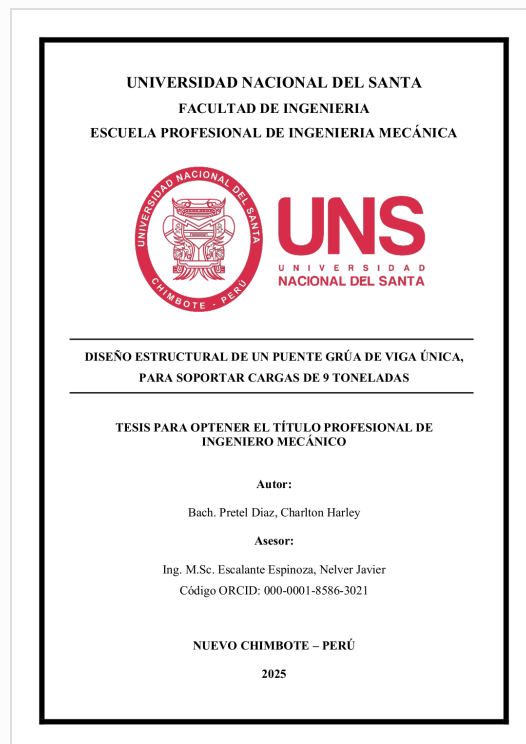


Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: CHARLTON HARLEY PRETEL DÍAZ
Título del ejercicio: PTI
Título de la entrega: DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN PUENTE GRÚA DE VIGA ÚNICA, ...
Nombre del archivo: TESIS_MEC_-_PRETEL_D_AZ_CHARLTON_H_V.4.6_2.pdf
Tamaño del archivo: 14.46M
Total páginas: 208
Total de palabras: 28,818
Total de caracteres: 141,620
Fecha de entrega: 22-jun-2026 11:57a. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2987885323



DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN PUENTE GRÚA DE VIGA ÚNICA, PARA SOPORTAR CARGAS DE 9 TONELADAS

INFORME DE ORIGINALIDAD

11%

INDICE DE SIMILITUD

11%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	3%
2	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
3	uteq.edu.mx Fuente de Internet	1%
4	www.scribd.com Fuente de Internet	1%
5	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	1%
6	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
7	Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador Trabajo del estudiante	1%
8	repositorio.usm.cl Fuente de Internet	<1%

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser el guía en mi camino de vida y darme paciencia, sabiduría y fortaleza para sortear todas las adversidades.

A mis padres, Norma y Rildo, y mi hermano Agustín, quienes han sido el principal soporte e impulso en mi vida académica.

A mi amada Abril, fundamental inspiración para alcanzar las metas proyectadas y soporte incondicional tanto en los buenos como en los malos momentos.

A mi querido amigo, Ing. Jorge Aliaga Domínguez, mi inspiración más importante en la labor ingenieril y maestro de vida.

A mis asesores, M.Sc. Nelver Javier Escalante Espinoza y Mg. Rubén Figueroa León, por la paciencia y dedicación para que este trabajo quede impecable.

A todas todos los familiares y amigos que siempre han estado presentes y han sido un aliento de superación.

Charlton H. Pretel Díaz

INDICE GENERAL

CONFORMIDAD DEL ASESOR	ii
CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR	iii
ACTA DE SUSTENTACIÓN.....	iv
ACTA DE APROBACIÓN DE ORIGINALIDAD	v
DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA	vi
RECIBO DE TURNITIN	vii
REPORTE PORCENTUAL DE TURNITIN.....	viii
AGRADECIMIENTO	ix
INDICE GENERAL	x
INDICE DE TABLAS.....	xiv
INDICE DE FIGURAS	xv
INDICE DE ANEXOS	xvi
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT	xix

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema	20
1.1.1. Fundamentación del problema	20
1.1.2. Formulación del Problema de Investigación.....	21
1.2. Objetivos de la Investigación	21
1.2.1. Objetivo general	21
1.2.2. Objetivos específicos.....	21
1.3. Formulación de la Hipótesis	22
1.4. Justificación e Importancia de la Investigación.....	22

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de la Investigación	24
2.2.	Fundamentos Teóricos de la Investigación	25
2.2.1.	Grúa.....	25
2.2.2.	Puente Grúa	26
2.2.3.	CMAA (Crane Manufacturers Association of America) Especificación 74.....	29
2.2.4.	Clasificación de grúas	29
2.2.5.	Material	30
2.2.6.	Cargas Principales	30
2.2.7.	Combinación de Cargas	33
2.2.8.	Flexión local en las alas debido a la carga en las ruedas.....	33
2.2.9.	Esfuerzos Combinados	36
2.2.10.	Esfuerzos Permisibles	36
2.2.11.	Deflexión máxima en vigas.....	36
2.2.12.	Distancia mínima entre ruedas de la viga testera	37
2.2.13.	Análisis de viga de apoyo simple con una carga.....	37
2.2.14.	Análisis de viga de apoyo simple con dos cargas idénticas	38
2.2.15.	Análisis de viga de apoyo simple con carga uniforme.....	39
2.2.16.	Análisis de viga hiperestática con carga única.....	39
2.2.17.	Análisis de viga hiperestática con carga uniforme.....	41
2.2.18.	Esfuerzo máximo por flexión.....	41
2.2.19.	Perfiles estructurales	42
2.2.20.	Método de superposición	42
2.2.21.	Factor de seguridad	42

2.2.22.	Factor de fijación de los extremos (K)	43
2.2.23.	Longitud efectiva (Le).....	43
2.2.24.	Relación de esbeltez (SR)	44
2.2.25.	Constante de columna (Cc)	44
2.2.26.	Fórmula de J.B. Johnson para columnas cortas	44
2.2.27.	Verificación de resistencia para miembros a compresión.....	45
2.2.28.	Carga Permisible	45
2.2.29.	Clasificación de secciones por pandeo local	45
2.2.30.	Análisis de pandeo lateral torsional en miembros compactos simétricas	46
2.2.31.	Recomendaciones de soldadura	48
2.2.32.	Soldaduras a tope	49
2.2.33.	Recomendaciones de empernado	50
2.2.34.	Autodesk Inventor	53
2.2.35.	Diseño Mecánico y Eléctrico	54
2.2.36.	Dilatación térmica en aceros al carbono	54
2.2.37.	Límite de resistencia a la fatiga.....	56
2.2.38.	Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga.....	56
2.2.39.	Factores de efectos varios k_f	57
2.2.40.	Caracterización de esfuerzos fluctuantes	57
2.2.41.	Criterios de falla por fatiga ante esfuerzos variables	58
2.2.42.	Análisis modal.....	58
2.2.43.	Carga exterior de viento	60
2.2.44.	Estabilidad por vuelco	61
2.3.	Marco conceptual	62

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1.	Método.....	64
3.1.1.	Tipo de Investigación.....	64
3.1.2.	Línea de Investigación.....	64
3.1.3.	Variables.....	64
3.1.4.	Métodos de la investigación.....	68
3.1.5.	Procedimiento de la investigación.....	69
3.1.6.	Diseño de la Investigación.....	70
3.1.7.	Técnicas de procesamiento y análisis de los resultados.....	70

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1.	Resultados.....	72
4.2.	Discusión.....	80

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.	Conclusiones.....	85
5.2.	Recomendaciones.....	87
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
	ANEXOS.....	93

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Definición conceptual de las variables.....	65
Tabla 2: Definición operacional de las variables.....	66
Tabla 3: Dimensiones e indicadores de la variable independiente.....	67
Tabla 4: Dimensiones e indicadores de la variable dependiente.....	68
Tabla 5: Condiciones de operación para el diseño de un puente grúa de viga única de 9 toneladas.....	72
Tabla 6: Resultados de cálculos y perfil de viga principal.....	73
Tabla 7: Resultados de cálculos y perfil de viga testera.....	74
Tabla 8: Resultados de cálculos y perfil de viga carrilera.....	75
Tabla 9: Resultados de cálculos y perfil de columna.....	76
Tabla 10: Resultados de cálculos de pernos.....	76
Tabla 11: Resultados de cálculos de soldadura.....	77
Tabla 12: Comparación entre cálculos y simulación de viga principal.....	77
Tabla 13: Comparación entre cálculos y simulación de viga testera.....	78
Tabla 14: Comparación entre cálculos y simulación de viga carrilera.....	78
Tabla 15: Comparación entre cálculos y simulación de columna.....	78
Tabla 16: Resultados de análisis modal – frecuencias.....	79
Tabla 17: Resultados de estabilidad por vuelco.....	79

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Puente grúa monorraíl.....	26
Figura 2: Puente grúa birraíl.....	27
Figura 3: Puente grúa suspendido.....	27
Figura 4: Partes principales de un puente grúa.....	28
Figura 5: Guía para el rango de tasas de aceleración típicas de movimientos de puentes.....	33
Figura 6: Esquema 1 para cálculo de flexión local en alas (posición de ruedas)	34
Figura 7: Esquema 2 para cálculo de flexión local en alas (para secciones de ala paralela).....	34
Figura 8: Esfuerzos admisibles.....	36
Figura 9: Apoyos simples: carga central.....	37
Figura 10: Apoyos simples: cargas idénticas.....	38
Figura 11: Apoyos simples: carga uniforme.....	39
Figura 12: Viga hiperestática: carga central.....	40
Figura 13: Viga hiperestática: carga uniforme.....	41
Figura 14: Factor de fijación (K)	43
Figura 15: Clasificación de miembros en pandeo lateral torsional.....	47
Figura 16: Soldadura a tope sometida a tensión o compresión.....	49
Figura 17: Soldadura de filete paralelas.....	50
Figura 18: Modos de falla por carga cortante con pernos o remaches.....	51
Figura 19: Relación de esfuerzo-tiempo de forma sinusoidal.....	57
Figura 20: Factor de forma C	60
Figura 21: Esquema general para calcular momento estabilizador y desestabilizador...	61
Figura 22: Diagrama de flujo del procedimiento de investigación.....	69

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Condiciones iniciales.....	94
Anexo 2: Cálculo de viga principal.....	95
Anexo 3: Resultados de simulación de viga principal.....	112
Anexo 4: Cálculo de viga testera.....	117
Anexo 5: Resultados de simulación de viga testera.....	125
Anexo 6: Cálculo de viga carrilera.....	130
Anexo 7: Resultados de simulación de viga carrilera.....	142
Anexo 8: Cálculo de columnas	148
Anexo 9: Resultados de simulación de columna.....	156
Anexo 10: Cálculo de unión empernada.....	161
Anexo 11: Cálculo de soldadura crítica	165
Anexo 12: Resultados de simulación de análisis modal.....	170
Anexo 13: Estabilidad por vuelco	179
Anexo 14: Propiedades del acero ASTM A36.....	182
Anexo 15: Tabla A9 del libro Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley.....	183
Anexo 16: Propiedades de perfiles W de la AISC.....	191
Anexo 17: Propiedades de perfiles HSS de la AISC.....	195
Anexo 18: Tabla B4.1b de la AISC 360-10.....	197
Anexo 19: Tabla 1 de la AWS D14.1 “Clasificación de la soldabilidad de los aceros” ...	198
Anexo 20: Tabla 9 de la AWS D14.1 “Requisitos del material de aporte”	201
Anexo 21: Propiedades del electro E6011 – Punto Azul.....	202
Anexo 22: Propiedades del electrodo E7018 – Supercito.....	203
Anexo 23: Tabla 5 de la AWS D14.1 “Garganta mínima efectiva para juntas parciales de soldadura a tope”	204

Anexo 24: Matriz de consistencia.....	205
Anexo 25: Teclé eléctrico.....	206
Anexo 26: Trolley eléctrico.....	207
Anexo 27: Testeros.....	208
Anexo 28: Propiedades mecánicas de los pernos ASTM A325.....	209
Anexo 29: Diámetros y áreas de roscas unificadas UNC y UNF.....	210
Anexo 30: Mapa eólico del Perú.....	211
Anexo 31: Planos.....	212

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó con el objetivo principal de realizar el diseño estructural de un puente grúa de viga única de 9 toneladas de capacidad. Se aplicó la norma CMAA especificación 74 y así se cumplió con la demanda de este equipo a la empresa COPEINCA, en su planta sede Chicama. De esta manera, se obtuvieron las condiciones de operación, se realizaron los cálculos estructurales principales, mencionados al final del resumen, y se compararon estos resultados con lo obtenidos por simulación.

Las condiciones iniciales de diseño fueron recopiladas mediante visitas de campo para tomar medidas y entrevistar a los operarios que trabajan en la zona donde se instalará el equipo, así como coordinaciones presenciales y vía virtual con los ingenieros encargados de planta. Así, los datos iniciales más importantes recopilados fueron la clasificación, que es de Clase A, la carga nominal de 9 ton, la luz de 9.6 m, el peso del trolley con tecla de 450 kg, la distancia entre columnas, que son 8.474 y 7.752 m, la altura de columnas de 6.6 m, materiales disponibles, que son perfiles estructurales de ASTM A36, y el modelo que es uno similar al existente en planta.

Todos los datos y condiciones iniciales fueron procesados mediante cálculos estructural para obtener la fuerza cortante, momento y esfuerzo máximo, deflexión y factor de seguridad, así como verificar pandeo local y pandeo lateral torsionante, el esfuerzo por flexión local en alas, cálculo de soldadura y de unión empernada. Finalmente, todos los componentes calculados (viga principal, viga testera, viga carrilera y columnas) cumplieron con los requisitos de diseño, esencialmente el elemento más importante que es la viga principal, la cual quedó con las siguientes especificaciones: un perfil personalizado con W18x71 lb/ft de base, fuerza cortante máxima de 66.53 kN, momento máximo de 285.74 kN.m, esfuerzo máximo de 48.955 MPa (< 200 MPa por norma), deflexión de 4.442 mm (< 16 mm por norma), factor de seguridad de 4.085 (> 1.5 recomendado) y no sufre de pandeo local ni de pandeo lateral torsionante.

Palabras clave: puente grúa, CMAA, AISC, estructura, factor de seguridad.

ABSTRACT

The present research work was carried out with the main objective of carrying out the structural design of a 9-ton capacity single-girder overhead crane. CMAA specification 74 was applied, thus meeting the demand for this equipment from COPEINCA at its Chicama plant. In this way, the operating conditions were obtained, the main structural calculations, mentioned at the end of the summary, were performed, and these results were compared with those obtained by simulation.

The initial design conditions were compiled through field visits to take measurements and interview the operators who work in the area where the equipment will be installed, as well as face-to-face and virtual coordination with the engineers in charge of the plant. Thus, the most important initial data collected were the classification, which is Class A, the nominal load of 9 tons, the span of 9.6 m, the weight of the trolley with a hoist of 450 kg, the distance between columns, which are 8.474 and 7.752 m, the height of columns of 6.6 m, available materials, which are structural profiles of ASTM A36, and the model which is similar to the one existing in the plant.

All the data and initial conditions were processed through structural calculations to obtain the shear force, maximum moment and stress, deflection and safety factor, as well as to verify local buckling and torsion lateral buckling, local bending stress in flanges, welding calculation and bolted joint. Finally, all the calculated components (main beam, end beam, runway beam and columns) met the design requirements, starting with the most important element, which is the main beam, which was left with the following specifications: a customized profile with W18x71 lb/ ft of base, maximum shear force of 66.53 kN, maximum moment of 285.74 kN.m, maximum stress of 48.955 MPa (< 200 MPa per standard), deflection of 4.442 mm (< 16 mm per standard), safety factor of 4.085 (> 1.5 recommended) and does not suffer from local buckling or torsional lateral buckling.

Keywords: overhead crane, CMAA, AISC, structure, safety factor.

CAPÍTULO I

INTRODUCCION

1.1. Planteamiento del Problema

1.1.1. Fundamentación del problema

El sector pesquero es históricamente uno de los más importantes y de mayor impacto en la economía del país, conociendo su auge en el año 1970, donde alcanzó el récord mundial de 12 millones de toneladas de anchoveta y una producción de harina de pescado de 2 253 000 toneladas (PERU21, 2021). Desde aquellos años a la actualidad, su impacto ha disminuido, pero se ha mantenido como un rubro importante que da trabajo a miles de personas a lo largo de la costa. Para el año 2020 este sector aportaba el 2.5% del PBI (Instituto Peruano de Economía, 2020).

Para que la industria pesquera pueda mantener su producción necesita cuidar de todas las partes del proceso, desde la misma actividad extractiva en el mar, pasando por el propio proceso productivo en planta, hasta la logística de exportación. En este sentido, COPEINCA (Corporación Pesquera Inca), ubicada en el quinto puesto de las empresas pesqueras más reconocidas a nivel nacional (Briceño, 2024), se esfuerza incesantemente por mejorar sus instalaciones con el afán de reforzar la seguridad y fiabilidad con la que opera sus plantas (COPEINCA, 2025). Así, una de las deficiencias con las que cuenta su planta ubicada en Puerto Malabrigo (departamento de La Libertad) es el uso de un antiguo y rústico puente grúa de aparentes 5 toneladas de capacidad con operación manual en la zona de prensas. Al hacer la consulta a los operarios que utilizan este puente grúa, revelaron que siempre lo utilizan con cargas mínimas y en lo posible evitan su uso por miedo a un accidente mayor, esto debido a que la luz del puente grúa, así como la mayor separación de columnas está tomada en el lado más largo de 16.2 metros y no del lado corto de 9.6 metros.

Es decir, deben compensar el uso del puente grúa con esfuerzo físico y no trabajan con seguridad ante la falta de confiabilidad en el equipo. Del mismo

modo, el diseño de perfil es deficiente ya que no cuenta con ningún refuerzo, aunque la altura de columna y el tipo de material (acero estructural ASTM A36) se puede mantener.

Ante esta problemática, se propone en esta investigación un nuevo diseño de puente grúa, moderno y con 9 toneladas de capacidad, basado en la norma CMAA Especificación 74 y centrado únicamente en el apartado Diseño Estructural (los apartados Diseño Mecánico y Diseño Eléctrico la norma los maneja como capítulos separados y por eso no se consideran, así también debido a que actualmente los componentes mecánicos son vendidos estandarizados y el área eléctrica no se encuentra en el alcance de la especialidad ni de esta investigación). De esta manera, complementando imprescindiblemente con los apartados Especificaciones Generales y Clasificación de Grúas (CMAA, 2020), el uso de la reconocida, vigente y confiable norma, cubre las necesidades y requerimientos de los operarios e ingenieros de la planta COPEINCA Chicama.

1.1.2. Formulación del Problema de Investigación

¿De qué manera se puede diseñar estructuralmente un puente grúa de viga única para soportar cargas de 9 toneladas?

1.2. Objetivos de la Investigación

1.2.1. Objetivo general

- Realizar el diseño estructural de un puente grúa de viga única de 9 toneladas de capacidad aplicando la norma CMAA especificación 74-2020.

1.2.2. Objetivos específicos

- a. Identificar las condiciones de operación para el diseño estructural de un puente grúa de viga única de 9 toneladas.

- b. Realizar los cálculos de fuerza cortante, momento y esfuerzo máximo, deflexión, factor de seguridad, pandeo, vida útil por fatiga y obtener los perfiles para el diseño estructural de un puente grúa de viga única de 9 toneladas.
- c. Comparar con simulación los cálculos para el diseño estructural de un puente grúa de viga única de 9 toneladas.
- d. Realizar los cálculos de análisis modal, verificación de la resistencia de la unión empernada, la soldadura y la estabilidad por vuelco.

1.3. Formulación de la Hipótesis

La aplicación adecuada de la norma CMAA especificación 74-2020 permite garantizar el diseño estructural correcto de un puente grúa de viga única para soportar cargas de 9 toneladas.

1.4. Justificación e Importancia de la Investigación

En todo lugar donde haya producción o fabricación siempre es necesario el traslado o movimiento de masas. Si bien es cierto que para cargas relativamente pequeñas se pueden utilizar herramientas como cargadores, tecles, carros de traslación y hasta la misma fuerza del hombre, cuando se trata de grandes volúmenes las opciones son otras (ABUS, 2023). De igual forma, por motivos de seguridad y según establece la normativa vigente no debe exigirse o permitirse el transporte de carga manual cuando esta carga comprometa su salud, teniendo esta como límite 25 kilogramos para hombres y 15 kilogramos para mujeres (Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo de Perú, 2008). En ese sentido, la implementación de un puente grúa apoyará en todos los ámbitos: ayudar en retiro de tapas de las prensas de pescado para temas de inspección, limpieza y mantenimiento del equipo; apoyar en maniobras y movilización de gusanos (helicoides) de prensas de pescado para llevar a reparación o mantenimiento; ayudar en el uso general de tareas de mantenimiento de personal de planta, operarios o terceros que realicen trabajos dentro de la zona. Todo dentro del marco de la seguridad y ergonomía. Adicionalmente, esta investigación ayudará en diversos aspectos:

- a) **A nivel teórico**, todos los cálculos realizados servirán de apoyo a futuros diseños, a la aplicación de la base teórica impartida en la universidad (como en cursos de estática, resistencia de materiales y estructuras metálicas) y la interpretación práctica de las normas que se utilizarán para el desarrollo del diseño (CMAA y AISC).
- b) **A nivel socioeconómico**, el puente grúa generará un beneficio económico y social ya que será menos costoso que los diseños comerciales de 9 ton y permitirá a los operarios trabajar con seguridad y comodidad, para que la cadena de producción no se detenga y siga su aporte al desarrollo del país.
- c) **A nivel ambiental**, reduce el uso de vehículos de combustión como montacargas y menor desgaste de materiales.
- d) **Y a nivel institucional y metodológico**, esta investigación será la base para nuevos trabajos, no solo a escala local (UNS), sino también nacional e internacional.

Limitaciones: Como esta investigación fue basada en la normativa CMAA especificación 74-2020, en sus apartados general y estructural, no se cubren los diseños o el apartado civil, es decir, lo que respecta a la cimentación, las bases de las columnas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

En el ámbito internacional:

Muñoz Yunda (2013): En su tesis “Diseño de un procedimiento para el cálculo y selección de la viga principal de un puente grúa” dónde opta por el título de ingeniero mecánico utiliza la norma AISC para escoger el perfil óptimo para la viga principal de un puente grúa de 16 toneladas con 12 metros de luz. Además, utiliza el programa ANSYS para hacer un análisis por elementos finitos mediante simulación. Finalmente hace una comparación entre utilizar un perfil laminado W24x162 y una viga de alma llena doble mediante equivalencias. Ambos perfiles tienen coeficientes de seguridad que varían entre 5 y 15 a lo largo de toda la viga.

Rebollo Perdomo (2013): En su tesis “Análisis y diseño de una grúa viajera tipo bipunte” dónde opta por el título de ingeniero civil utiliza la norma CMAA 70 y AISC para diseñar un puente grúa de 30 toneladas con 25 metros de luz. También utiliza simulación mediante el programa SolidWorks para hacer un análisis por elementos finitos. Al final utiliza un perfil de viga de alma llena doble. Los resultados de simulación de la viga principal arrojan una variación de los esfuerzos, pero una aproximación casi perfecta de la deflexión. Por el contrario, los resultados de simulación de la viga testera arrojan resultados muy próximos tanto para los esfuerzos y la deflexión.

Jaramillo Calle (2018): En su tesis “Diseño de puente grúa y sistema stand reel para mejorar el transporte de bobinas de papel en el proceso de rebobinado de la empresa Cartopel” para optar por el título de ingeniero civil utiliza la norma CMAA 70 y AISC para diseñar un puente grúa de 10 toneladas con 7.25 metros de luz. Además, utiliza el programa ANSYS para hacer un análisis por elementos finitos mediante simulación. Por último, utiliza una viga principal de alma llena doble con un coeficiente de seguridad de 3.75 y una deflexión máxima calculada de 7.1 mm. Luego, la viga testera cuenta con un coeficiente de seguridad de 11,47 y una deflexión máxima calculada de 0.27 mm.

En el ámbito nacional:

Marcelo Machay (2017): En su tesis “Diseño de una grúa puente monorriel con capacidad de 02 toneladas aplicando las normas AISC y CMAA para la empresa Sedapal-Lima” dónde opta por el título de ingeniero mecánico utiliza la norma CMAA 70, 74 y AISC para diseñar un puente grúa de 2 toneladas con 7.195 metros de luz. Además, utiliza el programa SolidWorks para hacer un análisis por elementos finitos mediante simulación. Finalmente utiliza una viga principal de alma llena con un coeficiente de seguridad de 2 y una deflexión máxima calculada de 4.5 mm. Por otro lado, la viga testera cuenta con un coeficiente de seguridad de 6.

Carlos Merma (2022): En su tesis “Diseño de una grúa pórtico para la carga y descarga de materiales y equipos con una capacidad 10 toneladas en la empresa Smelting Ingenieros SAC, Arequipa-Perú 2021” dónde opta por el título de ingeniero mecánico utiliza la metodología VDI 2221-2225 para diseñar una grúa pórtico de 10 toneladas con 12 metros de luz. Además, utiliza el programa SolidWorks para hacer un análisis por elementos finitos mediante simulación. Después de proponer 5 alternativas o propuestas de diseño, escoge la más óptima contando con un factor de seguridad de 4.

Huaroc Espinoza (2018): En su tesis “Diseño de un puente grúa para el winche de servicios en mina Yauricocha” dónde opta por el título de ingeniero mecánico utiliza la metodología VDI 2221-2225, la norma AISC y las normas nacionales E020 y E090 para diseñar un puente grúa de 10 toneladas con 9.06 metros de luz. Después de proponer 3 alternativas o propuestas de diseño, escoge la más óptima contando con un factor de seguridad de 10 para la viga principal y de 10.8 para la viga testera.

2.2. Fundamentos Teóricos de la Investigación

2.2.1. Grúa

El concepto general y coloquial de una grúa puede definirse como una máquina diseñada para cumplir la función principal de elevar y trasladar, de forma mecánica, cargas pesadas que sobrepasan las capacidades de un ser humano por seguridad y ergonomía.

Otra acepción del significado, haciendo alusión a un tipo particular de grúa, es que es un vehículo provisto de un sistema de elevación o brazo móvil con una plataforma rotativa para transportar o trasladar otros vehículos o cargas (Real Academia Española, 2023).

2.2.2. Puente Grúa

Es un tipo particular de grúa que es comúnmente utilizada en talleres de fabricación o plantas industriales donde se requiere trasladar elementos o cargas de gran peso en espacios relativamente cortos (ABUS, 2023).

A continuación, se repasarán los principales tipos de puente grúa que existen según los modelos que ofrece la empresa ABUS:

- a. **Puente grúa monorraíl:** Es uno de los tipos de grúa más utilizados, principalmente porque trabaja a capacidades bajas, desde 1 hasta 16 toneladas aproximadamente. Su principal característica es que solo tiene una viga principal.

Figura 1

Puente Grúa Monorraíl



Fuente: *Grúas* (ABUS, 2023)

- b. **Puente grúa birraíl:** Junto a la grúa monorraíl, es uno de los tipos más usados, pero dentro de las capacidades altas que van desde las 17 hasta

las 120 toneladas. Su principal característica es que usa dos vigas principales.

Figura 2

Puente Grúa Birraíl



Fuente: *Grúas* (ABUS, 2023)

- c. **Puente grúa suspendido:** Son grúas similares a las grúas monorraíl, pero se diferencian en que esta va suspendida de la viga carrilera y no por encima. Sus capacidades también son similares, desde 1 hasta 16 toneladas.

Figura 3

Puente Grúa Suspendido

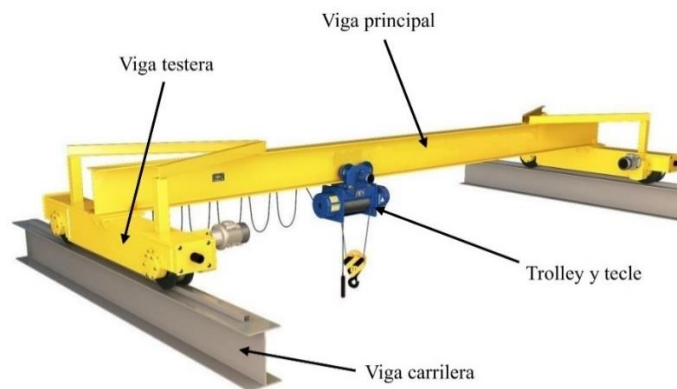


Fuente: *Grúas* (ABUS, 2023)

A continuación, se presentan las partes principales de un puente grúa:

Figura 4

Partes Principales De Un Puente Grúa



Fuente: *Puente grúa* (Grúas Corcan, 2021)

- **Viga principal:** Es el elemento más importante de todo el puente grúa debido a que de esta depende directamente el soportar la carga. Está sometida principalmente a fuerzas de flexión (Jaramillo Calle, 2018).
- **Viga testera:** Son vigas colocadas en forma perpendicular y a los extremos de la viga principal. Generalmente está fabricada con perfiles de sección hueca. Dentro de ella se ubican las ruedas y junto a ellas los motorreductores para la traslación del puente grúa (Jaramillo Calle, 2018).
- **Viga carrilera:** Sobre esta viga van acoplados los rieles que permiten el desplazamiento longitudinal del puente grúa. Esta viga soporta las cargas dinámicas y tiene que garantizar la seguridad estructural (Jaramillo Calle, 2018).
- **Trolley y tecle:** Es un sistema compuesto por un mecanismo para elevación y otro para traslación de la carga sobre la viga principal. Existen modelos que funcionan 100% con electricidad y un mando, ya sea con cable o a radiocontrol, o de forma manual (Jaramillo Calle, 2018).

2.2.3. CMAA (Crane Manufacturers Association of America) Especificación 74

Esta especificación será conocida como recomendaciones para el diseño y fabricación de grúas viajeras eléctricas de una sola viga de recorrido superior (sobre las vigas carrileras) o recorrido inferior (debajo de las vigas carrileras) con Trolley y polipasto de recorrido inferior. Ciertas partes de esta norma se refiere a partes de otras especificaciones, códigos o estándares aplicables. La CMAA cita a otras normas como: AWS, AISC y ASTM (CMAA, 2020).

2.2.4. Clasificación de grúas

La clasificación de grúas se estableció para elegir la opción más económica de acuerdo al rango de carga y las condiciones de servicio según las especificaciones de la norma (CMAA, 2020).

La CMAA especificación 74 sección 2 clasifica a las grúas de viga única en 4 clases según las condiciones de servicio:

a. Clase A (En espera o servicio infrecuente)

En este servicio las grúas pueden usarse en instalaciones como centrales eléctricas, servicio público, sala de turbinas, salas de motores y estaciones de transformadores donde se requiera de un preciso manejo de equipos a velocidades bajas y con largos periodos de inactividad entre levantamientos.

b. Clase B (Servicio ligero)

Este servicio cubre las grúas que se pueden utilizar en talleres de reparación, operaciones de montaje ligero, edificios de servicios, almacenamiento ligero, etc., donde los requisitos de servicio son ligeros y de velocidad lenta. Los levantamientos pueden variar de 2 a 5 por hora con un promedio de altura de 3 metros.

c. Clase C (Servicio moderado)

Este servicio cubre las grúas que se pueden utilizar en talleres mecánicos o salas de máquinas de fábricas, etc., donde los requisitos de servicio son moderados. Aquí la grúa moverá cargas con el 50% de la capacidad nominal con 5 a 10 izajes por hora con un promedio de 5 metros de altura.

d. Clase D (Servicio pesado)

Este servicio cubre las grúas que pueden usarse en talleres de máquinas pesadas, fundiciones, plantas de fabricación, almacenes de acero, patio de contenedores, aserraderos, etc., donde se requiere una producción de servicio pesado. Aquí la grúa moverá cargas con el 50% de la capacidad nominal con 10 a 20 izajes por hora con un promedio de 5 metros de altura a velocidades altas.

2.2.5. Material

La norma CMMA especificación 74 en la sección 3 recomienda el acero ASTM A36 o cualquier otro material similar que cumpla con los requisitos de diseño de la norma. Los datos más importantes utilizados para el diseño estructural son los siguientes (pueden verse completamente en el Anexo 14):

— Esfuerzo de fluencia: $\sigma_y = 250 \text{ MPa}$ (36 ksi)

— Esfuerzo de tracción: $\sigma_t = 400 \text{ MPa}$ (58 ksi)

— Módulo de elasticidad del acero: $E = 200 \text{ GPa}$ (29000 ksi)

— Densidad del acero: $\rho_a = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

2.2.6. Cargas Principales

La norma CMMA especificación 74 en la sección 3 considera 5 fuerzas principales en el análisis de diseño para un puente grúa.

a. Carga Muerta (DL)

Es el peso efectivo de la estructura del puente, las partes de maquinaria y el equipo apoyado en la estructura.

b. Carga de Trolley (TL)

Es el peso del Trolley y el tecele, así como el equipamiento que lo compone.

c. Carga Izada (LL)

Es la carga de trabajo y el peso de los dispositivos de elevación utilizados para manipular y sostener la carga como el yugo, el bloque de carga, viga de elevación, cuchara, imán y dispositivos complementarios.

d. Fuerzas de Inercia Vertical (VIF)

Estas fuerzas se incluyen debido al movimiento de la grúa, sus componentes y al levantamiento y descenso de la carga. Estas cargas se pueden incluir de manera simplificada mediante factores para la carga muerta y la carga izada.

— **Factor de carga muerta (DLF)**

Este factor solo cubre únicamente las cargas muertas de la grúa, Trolley y su equipamiento asociado. Se toma de acuerdo a:

$$DLF = 1.1 \leq 1.05 + \frac{\text{Velocidad de viaje (FPM)}}{2000} \leq 1.2 \quad (1)$$

Dónde:

FPM = pies por minuto (ft/min)

Si el valor obtenido no se encuentra en el rango indicado se considera el valor mínimo.

— **Factor de carga izada (HLF)**

El factor de carga izada se debe aplicar a la carga levantada (LL) en la dirección vertical y es el resultado de las fuerzas operativas normales. Se toma de acuerdo a:

$$HLF = 0.15 \leq 1.05 \times \text{Velocidad de Izaje (FPM)} \leq 0.5 \quad (2)$$

Dónde:

FPM = pies por minuto (ft/min)

Si el valor obtenido no se encuentra en el rango indicado se considera el valor mínimo.

e. Fuerzas de Inercia de Transmisión (IFD)

Estas fuerzas son el resultado de la aceleración y desaceleración del puente grúa o el trolley. El factor se aplica a la carga levantada y al peso de los componentes de la grúa, incluidos accesorios. Se toma de acuerdo a la tabla 5.2.8.1.1-A (Guía para el rango de tasas de aceleración típicas de movimiento de puentes) de la norma y la siguiente ecuación:

$$IDF_{factor} = 0.078 \times \text{Aceleración o desaceleración} \left(\frac{ft}{s^2}\right) \geq 0.025 \quad (3)$$

Después de calcular el factor se calcula la fuerza:

$$IFD = IDF_{factor} \times (TL + LL) \quad (4)$$

Figura 5*Guía Para el Rango de Tasas de Aceleración Típicas*

Velocidad de Estabilización (Final) a Plena Carga		a = Régimen de Aceleración en ft/sec ² Para motores AC y DC
ft/min	ft/sec	
60	1.0	0.25 Min.
120	2.0	0.25–0.80
180	3.0	0.30–1.0
240	4.0	0.40–1.0
300	5.0	0.50–1.1

Fuente: *Especificación 74* (CMAA, 2020)

2.2.7. Combinación de Cargas

La combinación de cargas para las cargas principales debe ser calculada con el Caso 1 según la norma CMAA especificación 74 sección 3:

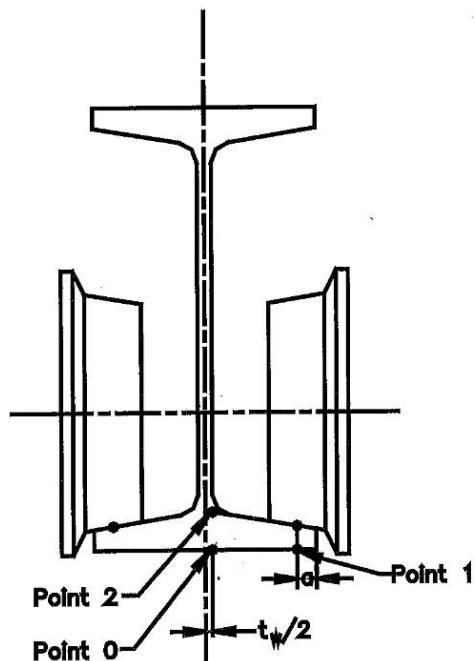
$$Carga = DL(DLF_B) + TL(DLF_T) + LL(1 + HLF) + IFD \quad (5)$$

2.2.8. Flexión local en las alas debido a la carga en las ruedas

Se calcula según las recomendaciones de la CMAA especificación 74 sección 3 para comprobar la resistencia del perfil utilizado: (los valores deben darse en pulgadas)

Figura 6

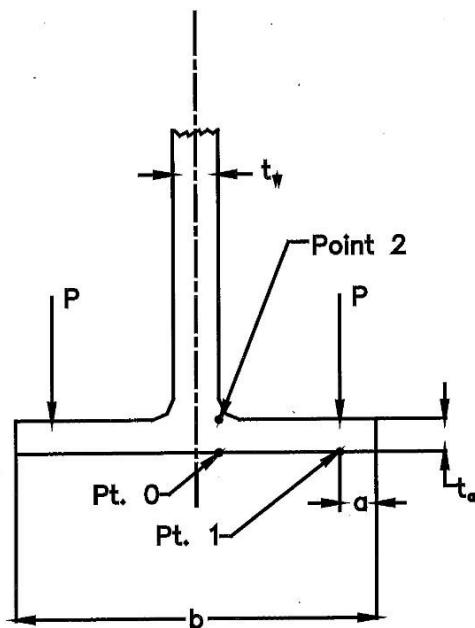
*Esquema 1 Para Cálculo de Flexión Local en Alas
(Posición de Ruedas)*



Fuente: *Especificación 74* (CMAA, 2020)

Figura 7

*Esquema 2 Para Cálculo de Flexión Local en
Alas (Para Secciones de Ala Paralela)*



Fuente: *Especificación 74* (CMAA, 2020)

Para secciones simétricas de una sola alma:

$$\lambda = \frac{2a}{b-t_w} \quad (6)$$

Para secciones ala paralela:

$$C_{X0} = -2.110 + 1.977\lambda + 0.0076e^{6.53\lambda} \quad (7)$$

$$C_{X1} = 10.108 - 7.408\lambda - 10.108e^{-1.364\lambda} \quad (8)$$

$$C_{Y0} = 0.050 - 0.580\lambda + 0.148e^{3.015\lambda} \quad (9)$$

$$C_{Y1} = 2.230 - 1.490\lambda + 1.390e^{-18.33\lambda} \quad (10)$$

Los esfuerzos en la parte inferior del ala en la transición ala-alma (Punto 0)

$$\sigma_{X0} = C_{X0} \frac{P}{(t_a)^2} \quad (11)$$

$$\sigma_{Y0} = C_{Y0} \frac{P}{(t_a)^2} \quad (12)$$

Los esfuerzos en la parte inferior del ala directamente debajo del punto de contacto de la rueda (Punto 1)

$$\sigma_{X1} = C_{X1} \frac{P}{(t_a)^2} \quad (13)$$

$$\sigma_{Y1} = C_{Y1} \frac{P}{(t_a)^2} \quad (14)$$

Los esfuerzos en la parte inferior del ala en la transición ala-alma (Punto 0)

$$\sigma_{X2} = -\sigma_{X0} \quad (15)$$

$$\sigma_{Y2} = -\sigma_{Y0} \quad (16)$$

2.2.9. Esfuerzos Combinados

Cuando las condiciones de carga de un componente producen esfuerzos tanto de tracción como de compresión en dos direcciones ortogonales, los esfuerzos deben combinarse según corresponda:

$$\sigma_{comb} = \sqrt{(\sigma_X)^2 + (\sigma_Y)^2 - \sigma_X\sigma_Y + 3(\tau_{XY})^2} \leq \sigma_{all} \quad (17)$$

El esfuerzo σ_{all} se explica en la siguiente sección.

2.2.10. Esfuerzos Permisibles

Son los esfuerzos límite con los que se debe comparar los análisis recomendados según la CMMA especificación 74. En el cuadro siguiente se pueden apreciar.

Figura 8

Esfuerzos Admisibles

COMBINACIÓN DE CARGA	ESFUERZO DE COMPRESION ADMISIBLE σ_{CALL}	ESFUERZO DE TRACCIÓN ADMISIBLE σ_{TALL}	ESFUERZO DE CORTE ADMISIBLE τ_{ALL}	ESFUERZO DE SOPORTE ADMISIBLE σ_{BrgALL}
Case 1	$0.60\sigma_{yp}$	$0.60\sigma_{yp}$	$0.36\sigma_{yp}$	$0.80\sigma_{yp}$
Case 2	$0.66\sigma_{yp}$	$0.66\sigma_{yp}$	$0.40\sigma_{yp}$	$0.90\sigma_{yp}$
Case 3	$0.75\sigma_{yp}$	$0.75\sigma_{yp}$	$0.45\sigma_{yp}$	$1.00\sigma_{yp}$

Fuente: *Especificación 74 (CMAA, 2020)*

2.2.11. Deflexión máxima en vigas

La deflexión máxima para vigas sin contra flecha que están producidas por la carga muerta, el peso del trolley y la carga nominal está recomendada por la CMMA especificación 74 como:

$$y_{max} = \frac{L}{600} \quad (18)$$

Dónde:

L = luz

2.2.12. Distancia mínima entre ruedas de la viga testera

Está dada por la recomendación de la CMMA especificación 74 como sigue:

$$D_{rmin} = \frac{L}{8} \quad (19)$$

Dónde:

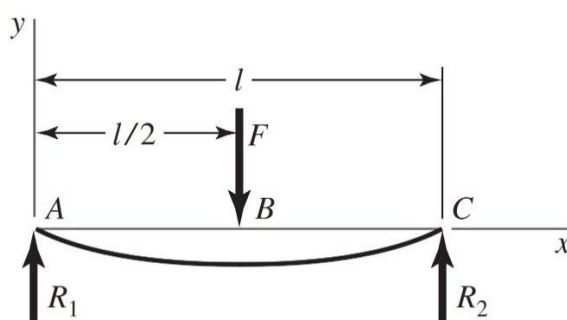
L = luz

2.2.13. Análisis de viga de apoyo simple con una carga

Las fórmulas simplificadas se pueden obtener de la tabla A-9 del libro “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley”. Ver Anexo 15.

Figura 9

Apoyos Simples: Carga Central



Fuente: *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Budinas & Keith Nisbett, 2012)

Las reacciones se calculan como sigue:

$$R_1 = R_2 = \frac{F}{2} \quad (20)$$

El momento máximo se calcula como sigue:

$$M_{max} = \frac{Fl}{4} \quad (21)$$

La deflexión máxima se calcula como sigue:

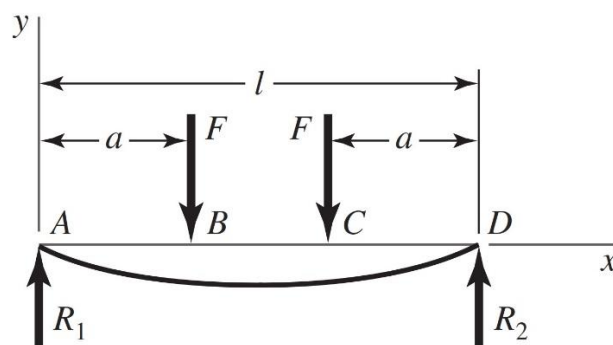
$$y_{max} = -\frac{Fl^3}{48EI} \quad (22)$$

2.2.14. Análisis de viga de apoyo simple con dos cargas idénticas

Las fórmulas simplificadas se pueden obtener de la tabla A-9 del libro “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley”. Ver Anexo 15.

Figura 10

Apoyos Simples: Cargas Idénticas



Fuente: *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Budinas & Keith Nisbett, 2012)

Las reacciones se calculan como sigue:

$$R_1 = R_2 = F \quad (23)$$

El momento máximo se calcula como sigue:

$$M_{max} = Fa \quad (24)$$

La deflexión máxima se calcula como sigue:

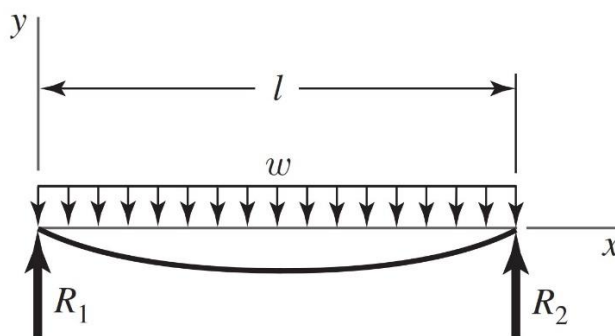
$$y_{max} = \frac{Fa}{24EI} (4a^2 - 3l^2) \quad (25)$$

2.2.15. Análisis de viga de apoyo simple con carga uniforme

Las fórmulas simplificadas se pueden obtener de la tabla A-9 del libro “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley”. Ver Anexo 15.

Figura 11

Apoyos Simples: Carga Uniforme



Fuente: *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Budinas & Keith Nisbett, 2012)

Las reacciones se calculan como sigue:

$$R_1 = R_2 = \frac{wl}{2} \quad (26)$$

El momento máximo se calcula como sigue:

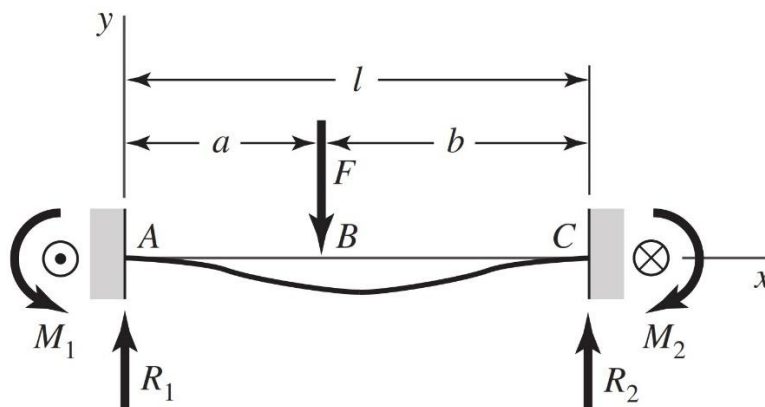
$$M_{max} = \frac{wl^2}{8} \quad (27)$$

La deflexión máxima se calcula como sigue:

$$y_{max} = -\frac{5wl^4}{384EI} \quad (28)$$

2.2.16. Análisis de viga hiperestática con carga única

Las fórmulas simplificadas se pueden obtener de la tabla A-9 del libro “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley”. Ver Anexo 15.

Figura 12*Viga Hiperestática: Carga Central*

Fuente: *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Budinas & Keith Nisbett, 2012)

Las reacciones se calculan como sigue:

$$R_1 = \frac{Fb^2}{l^3} (3a + b) \quad (29)$$

$$R_2 = \frac{Fa^2}{l^3} (3b + a) \quad (30)$$

Los momentos se calcula como sigue:

$$M_1 = \frac{Fab^2}{l^2} \quad (31)$$

$$M_2 = \frac{Fa^2b}{l^2} \quad (32)$$

La deflexión se calcula como sigue:

$$y_{AB} = \frac{Fb^2x^2}{6EI l^3} [x(3a + b) - 3al] \quad (33)$$

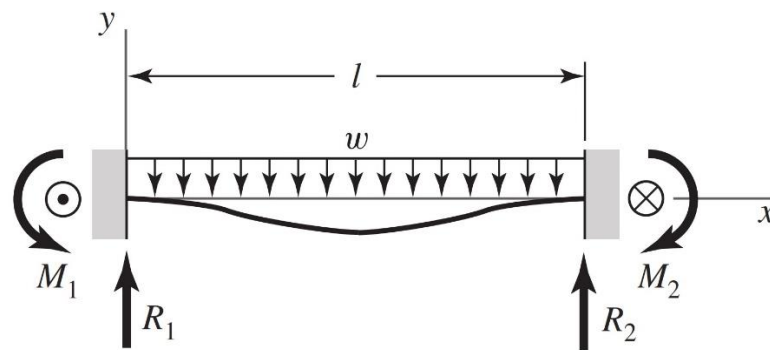
$$y_{BC} = \frac{Fa^2(l-x)^2}{6EI l^3} [(l-x)(3b + a) - 3bl] \quad (34)$$

2.2.17. Análisis de viga hiperestática con carga uniforme

Las fórmulas simplificadas se pueden obtener de la tabla A-9 del libro “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley”. Ver Anexo 15.

Figura 13

Viga Hiperestática: Carga Uniforme



Fuente: *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Budinas & Keith Nisbett, 2012)

Las reacciones se calculan como sigue:

$$R_1 = R_2 = \frac{wl}{2} \quad (35)$$

El momento máximo se calcula como sigue:

$$M_1 = M_2 = \frac{wl^2}{12} \quad (36)$$

La deflexión máxima se calcula como sigue:

$$y_{max} = -\frac{wl^4}{384EI} \quad (37)$$

2.2.18. Esfuerzo máximo por flexión

El esfuerzo máximo causado por flexión es directamente proporcional al momento máximo de la sección del perfil y la distancia al eje neutro (centroidal). Por el contrario, es inversamente proporcional al momento de

inercia respecto a al mismo eje neutro horizontal de la sección (Mott, 2009).

La fórmula del esfuerzo máximo causado por flexión es la siguiente:

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (38)$$

Dónde:

M = Momento flexionante en la sección

c = Distancia del eje centroidal del perfil a las fibras más externas

I = Momento de Inercia de la sección

2.2.19. Perfiles estructurales

Son materiales de construcción. Las características de los perfiles estructurales se pueden observar en las tablas de la AISC. Pueden revisarse en los Anexos 16 y 17.

2.2.20. Método de superposición

La superposición ayuda a resolver el efecto de la combinación de cargas sobre un elemento estructural mediante la definición de los efectos de cada carga por separado y sumados posteriormente de manera algebraica (Budinas & Keith Nisbett, 2012). Existen 3 condiciones para aplicar la superposición:

- Los efectos estén relacionados linealmente con la carga que la produce.
- Cada carga no debe afectar el resultado de otra carga.
- Las deformaciones que resulten de una carga no deben ser tan grandes que alteren los efectos producidos por las demás cargas.

2.2.21. Factor de seguridad

Como los esfuerzos en determinadas ocasiones pueden no variar de forma lineal con la carga, el uso de la carga como parámetro de pérdida de función no es correcto. Por este motivo es más recomendado expresar el factor de

diseño utilizando los esfuerzos y una resistencia relevante (Budinas & Keith Nisbett, 2012). La ecuación puede describirse como sigue:

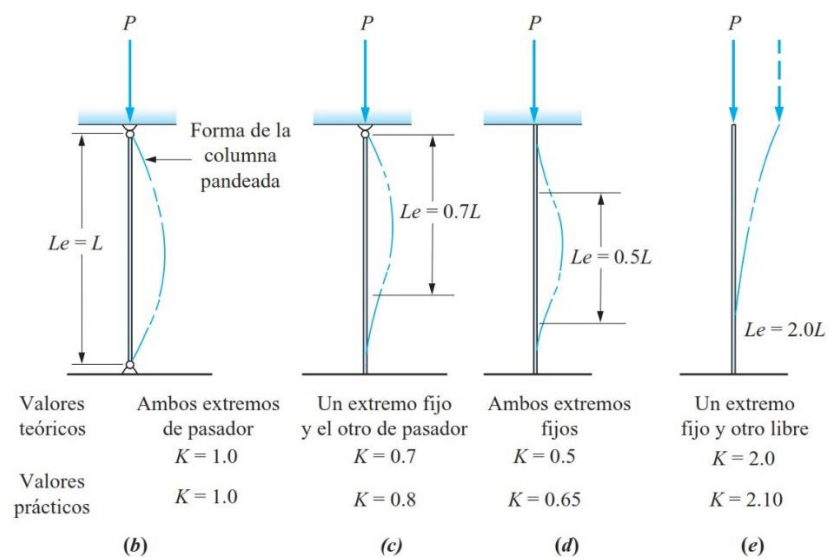
$$n_d = \frac{\text{Resistencia de pérdida de función}}{\text{esfuerzo permisible}} = \frac{S}{\sigma(o \tau)} \quad (39)$$

2.2.22. Factor de fijación de los extremos (K)

Este factor mide el grado al cual cada extremo de una columna se encuentra limitado contra la rotación (Mott, 2009).

Figura 14

Factor de Fijación (K)



Fuente: *Resistencia de materiales* (Mott, 2009)

2.2.23. Longitud efectiva (Le)

Esta longitud combina la longitud real con el factor de fijación de los extremos mediante la siguiente relación (Mott, 2009).

$$L_e = KL \quad (40)$$

Dónde:

L = Longitud real de columna

2.2.24. Relación de esbeltez (SR)

Esta relación se necesita para calcular los esfuerzos de miembros a compresión según la CMAA. Según Mott, en el capítulo 11 de su libro de resistencia de materiales define a esta relación como:

$$SR = \frac{KL}{r} = \frac{L_e}{r} \quad (41)$$

Dónde:

r = radio de giro mínimo de la sección transversal de la columna.

2.2.25. Constante de columna (Cc)

Se utiliza para determinar si una columna es larga o corta. Según Mott, en el capítulo 11 de su libro de resistencia de materiales esta constante se define como:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_y}} \quad (42)$$

Dónde:

E = Módulo de elasticidad del acero

σ_y = Esfuerzo de fluencia del material del perfil

2.2.26. Fórmula de J.B. Johnson para columnas cortas

Esta fórmula se utiliza si la relación de esbeltez SR es menor que la constante de columna Cc (Mott, 2009). La fórmula para la carga de pandeo crítica es la siguiente:

$$P_{cr} = A\sigma_y \left[1 - \frac{\sigma_y(SR)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (43)$$

Dónde:

A = Área de la sección transversal de la columna

2.2.27. Verificación de resistencia para miembros a compresión

Esta fórmula se utiliza si la relación de esbeltez SR es menor que la constante de columna C_c (CMAA, 2020). El factor de diseño depende de las consideraciones del diseñador a menos que el proyecto se encuentre desarrollado dentro de los márgenes de un reglamento (Mott, 2009).

$$\sigma_A = \frac{\left[1 - \frac{(SR)^2}{2(C_c)^2}\right] \sigma_y}{\left[\frac{5}{3} + \frac{3(SR)}{8(C_c)} - \frac{(SR)^3}{8(C_c)^3}\right] N} \quad (44)$$

Dónde:

N = Factor de diseño según CMAA (1.1 para Caso 1, 1.0 para Caso 2 y 0.89 para Caso 3)

2.2.28. Carga Permissible

Para una columna que no falla por cedencia o por resistencia de material, sino por pandeo, se calcula una carga permissible al dividir la carga crítica entre un factor de diseño (Mott, 2009). El factor de diseño empleado se especifica en la sección anterior.

$$P_a = \frac{P_{cr}}{N} \quad (45)$$

2.2.29. Clasificación de secciones por pandeo local

Según la sección B4 de la AISC 360-10, para flexión, las secciones se clasifican en miembros compactos, no compactos o esbeltos. Esta se puede calcular utilizando la tabla B4.1b de esta misma norma que puede verse en el Anexo 18.

La sección será compacta si se cumple:

$$\text{Relación ancho} - \text{espesor} \leq \lambda_p \quad (46)$$

Para perfiles W debe usarse estas fórmulas, acotando que para estos perfiles se usa solo la mitad de “b” según especifica AISC 360-10:

$$\frac{b_f}{2t_f} < 0.38 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = \lambda_p \quad (47)$$

$$\frac{h}{t_w} < 3.76 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = \lambda_p \quad (48)$$

Para perfiles HSS debe usarse estas fórmulas:

$$\frac{b}{t} < 1.23 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = \lambda_p \quad (49)$$

$$\frac{h}{t} < 2.42 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = \lambda_p \quad (50)$$

2.2.30. Análisis de pandeo lateral torsional en miembros compactos simétricas

Este análisis se encuentra dentro de las recomendaciones de la AISC 360-10. Para empezar, se toma en cuenta la distancia mínima no arriostrada “ L_b ”. Luego se calculan dos límites: “ L_p ” y “ L_r ”.

$$L_p = 1.76r_y \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad (51)$$

$$L_r = 1.95r_{ts} \frac{E}{0.7\sigma_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{S_x h_o}\right)^2 + 6.76\left(\frac{0.7\sigma_y}{E}\right)^2}} \quad (52)$$

Además:

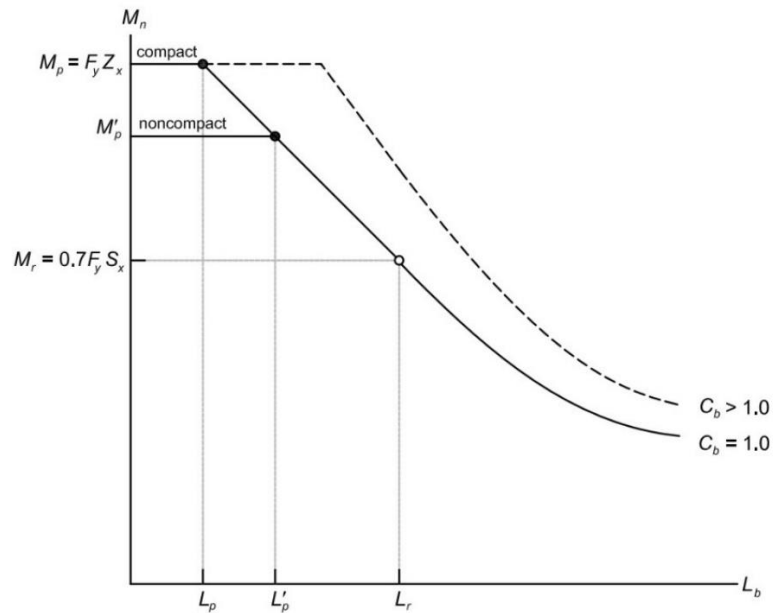
$$r_{ts} = \sqrt{\frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x}} \quad (53)$$

Dónde:

$J, S_x, h_o, C_w, r_y, I_y$ = parámetros obtenidos en tablas según el perfil
 c = coeficiente de corrección (para perfiles W es 1)

Figura 15

Clasificación de Miembros en Pandeo Lateral Torsional



Fuente: *Steel Construction Manual* (AISC SCM, 2011)

Luego se clasifica la sección como sigue:

- Cuando $L_b \leq L_p$, el estado límite del pandeo lateral torsional no aplica.
- Cuando $L_p < L_b \leq L_r$, se analizan los momentos.

Por flexión:

$$M_n = M_p = \sigma_y Z_x \quad (54)$$

Dónde:

Z_x = parámetro obtenido en tablas según el perfil

Por pandeo lateral torsionante:

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7 \sigma_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (55)$$

Dónde:

C_b = coeficiente de modificación (para el caso de vigas sin carga transversal es 1)

Luego se elige el menor M_n .

— Cuando $L_b > L_r$:

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p \quad (56)$$

Dónde:

F_{cr} = esta ecuación puede encontrarse en la sección F2 de la norma AISC 360-10

Después se calcula el momento crítico:

$$M_r = \phi_b M_n \gg M_{max} \quad (57)$$

Dónde:

M_{max} = es el momento máximo calculado en la sección

ϕ_b = es igual a 0.9 para LRFD

2.2.31. Recomendaciones de soldadura

La norma CMAA especificación 74 en la sección 3 recomienda usar la norma AWS D14.1 “Especificación para soldar grúas industriales y de fábrica”.

Esta norma, en la sección 4 tabla 1 (Clasificación de soldabilidad de los aceros), clasifica al acero ASTM A36 como material de Clase II. Esta tabla se puede ver en el Anexo 19. En la sección 8 tabla 9 (Requisitos del metal de aporte), la norma recomienda los electrodos E60XX y E70XX para soldar materiales de Clase II como el ASTM A36 (AWS D14.1, 2005). Revisar el Anexo 20.

Según el Manual de Soldadura y Catálogo de Productos de SOLDEXA los datos para los electrodos recomendados son los siguientes.

Par el electrodo E6011-Punto Azul (Ver Anexo 21):

— Esfuerzo de fluencia: $\sigma_y = 330 \text{ MPa (48 ksi)}$

— Esfuerzo de tracción: $\sigma_t = 430 \text{ MPa (60 ksi)}$

Par el electrodo E7018-Supercito (Ver Anexo 22):

- Esfuerzo de fluencia: $\sigma_y = 400 \text{ MPa}$ (58 ksi)
- Esfuerzo de tracción: $\sigma_t = 520 \text{ MPa}$ (75.4 ksi)

En la sección 6 tabla 5 (Garganta mínima efectiva para juntas parciales de soldaduras a tope), se considera la garganta mínima según el espesor de plancha para que la soldadura tenga resistencia mínima (AWS D14.1, 2005). Ver Anexo 23.

Según el espesor de plancha “t”:

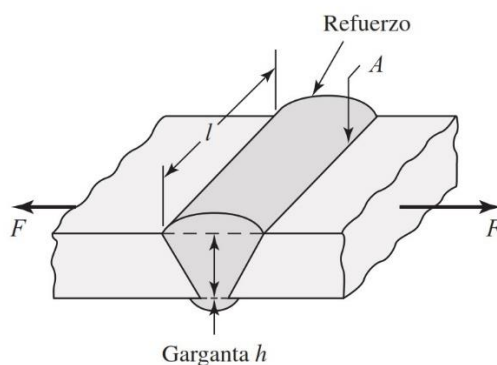
- Para $6 < t \leq 13$ se recomienda una garganta mínima de 5 mm.
- Para $13 < t \leq 20$ se recomienda una garganta mínima de 6 mm.
- Para $20 < t \leq 40$ se recomienda una garganta mínima de 8 mm.

2.2.32. Soldaduras a tope

Para el caso de cargas que provocan tensión o compresión, el esfuerzo es normal y se calcula con la siguiente relación (Budinas & Keith Nisbett, 2012):

Figura 16

Soldadura a Tope Sometida a Tensión o Compresión



Fuente: *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*
(Budinas & Keith Nisbett, 2012)

$$\sigma = \frac{F}{hl} \quad (58)$$

Dónde:

F = carga

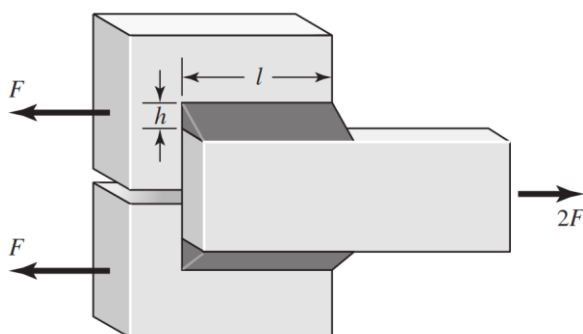
h = garganta de soldadura

l = longitud de soldadura

Para el caso de cargas cortantes se calcula con la siguiente relación (Budinas & Keith Nisbett, 2012):

Figura 17

Soldadura de Filete Paralelas



Fuente: *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*
(Budinas & Keith Nisbett, 2012)

$$\tau = \frac{F}{0.707hl} = \frac{1.414F}{hl} \quad (59)$$

Dónde:

F = carga

h = garganta de soldadura

l = longitud de soldadura

2.2.33. Recomendaciones de empernado

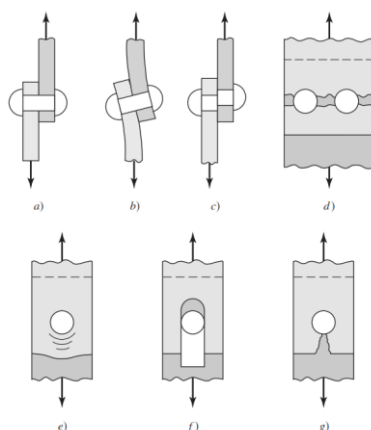
La norma CMAA especificación 74 en la sección 3 recomienda usar la norma ASTM A325 y 490 “Especificación para juntas estructurales usando pernos ASTM A325 o A490”.

Cuando se trabaja con el diseño de uniones empernadas se debe tener cuidado y analizar, en primer lugar, la condición en la trabajan los pernos. Una de las

condiciones más comunes es cuando está cargada en cortante. Como se observa en la siguiente imagen en a) es carga, en b) flexión del remache, c) es corte del remache, d) falla de tensión en las placas, e) falla por aplastamiento de las planchas o del remache, f) es desgarramiento por cortante y g) es desgarramiento por tensión (Budinas & Keith Nisbett, 2012).

Figura 18

Modos de falla por carga cortante con pernos o remaches



Fuente: *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley 9°* (Budinas & Keith Nisbett, 2012)

En la práctica el esfuerzo flexionante no se calcula porque se justifica mediante los otros cálculos añadiendo un factor de diseño.

Así, para calcular el cortante puro se parte de la forma general:

$$\tau = \frac{F}{NA} \quad (60)$$

Sin embargo, esta forma se puede modificar y encontrar su equivalencia dependiendo de la situación analizada.

Para una situación dónde las roscas de los pernos no se extienden en los planos de cortante:

$$\tau = \frac{4F}{N\pi d^2} = 0.577 \frac{S}{n_d} \quad (61)$$

Pero si las roscas de los pernos se extienden en uno de los planos de corte:

$$\tau = \frac{F}{NA_r} = 0.577 \frac{S}{n_d} \quad (62)$$

Dónde:

τ = esfuerzo de corte

F = carga

A = área según diámetro nominal del perno

N = cantidad de pernos en la unión

d = diámetro nominal del perno

F = carga

0.577 = factor de conversión por la teoría de Von Misses para conversión de tensión a cortante en materiales dúctiles

S = esfuerzo de fluencia del perno o del material (plancha)

n_d = factor de diseño (1.5)

A_r = área del diámetro menor (se puede ver en Anexo 29)

Si el análisis es para el material la ecuación cambia:

$$\tau = \frac{F}{Nat} = 0.577 \frac{S}{n_d} \quad (63)$$

Dónde, además de lo anterior:

a = menor distancia del agujero al borde de la plancha

t = espesor de la plancha más delgada

Como dato adicional, en la práctica del diseño estructural, el fallo por cortante al borde se evita considerando una distancia mínima del centro del agujero al borde la plancha igual a 1.5 veces el diámetro del agujero.

Cuando se trata de aplastamiento se debe tener cuidado porque el área a considerar debe ser la menor de las combinaciones de los agujeros. Esto dependerá de cada situación. Sin embargo, de forma fundamental:

$$\sigma = \frac{F}{NA} \quad (64)$$

Dónde, además de lo anterior y para este caso:

σ = esfuerzo de aplastamiento

N = menor combinación de agujeros

Además, tenemos la forma específica con su equivalencia:

$$\sigma = \frac{F}{Ntd} = \frac{S}{n_d} \quad (65)$$

De la forma fundamental también podemos obtener el esfuerzo de fluencia por tensión de los elementos a lo largo de los agujeros de los pernos:

$$\sigma = \frac{F}{(w-Nd)t} = \frac{S}{n_d} \quad (66)$$

Dónde, además de lo anterior:

σ = esfuerzo de fluencia

w = ancho total de la plancha

Y así también se puede calcular directamente el esfuerzo de fluencia de la plancha:

$$\sigma = \frac{F}{wt} = \frac{S}{n_d} \quad (67)$$

2.2.34. Autodesk Inventor

Autodesk Inventor es un software CAD 3D que cuenta con un gran repertorio de herramientas y opciones para realizar principalmente diseño mecánico (elementos y planchas), gestionar documentación (planos) y procesos de simulación. Es uno de los softwares más utilizados debido a su compatibilidad con el resto de programas de la misma compañía que también son masivamente utilizados como AutoCAD y Revit.

Inventor cuenta con una gran capacidad para diseñar distintos elementos como partes de maquinaria (ejes, engranajes, etc.), chapa metálica, redes de tuberías (piping), redes eléctricas y principalmente estructuras metálicas, para lo cual cuenta con un módulo completo, tanto para su diseño, como para análisis y simulación. (AUTODESK, 2024)

2.2.35. Diseño Mecánico y Eléctrico

Aunque anteriormente se tenían que diseñar o seleccionar los componentes mecánicos y eléctricos de un puente grúa, como ejes, rodamientos, ruedas, motores, tecles y trolley, entre otros, actualmente estos elementos se pueden adquirir de forma estandarizada de acuerdo a la carga nominal de izaje. Así, existen empresas dedicadas al abastecimiento, fabricación profesional y exportación de productos destinados al movimiento y manipulación de carga (Hoist, 2025).

De esta manera, los ingenieros enfrascados en la labor de diseñar un puente grúa a medida solo se tienen que enfocar en el diseño estructural, de tal manera que puedan satisfacer las exigencias del proyecto, y por ende del cliente, de una forma más eficiente y segura. Dentro de los componentes que se pueden comprar de forma estandarizada están los tecles, los trolley y los testeros. Los datos para los cálculos estructurales de los elementos mencionados que se necesitan pueden extraerse de los anexos 23, 24 y 25, así se pueden contrastar con los obtenidos de la norma y comprobar su coincidencia.

2.2.36. Dilatación térmica en aceros al carbono

Según la teoría, si tenemos un cuerpo no tiene restricciones y su temperatura se va aumentando de manera uniforme entonces este cuerpo sufre una dilatación de manera equitativa en todas las direcciones (Budinas & Keith Nisbett, 2012).

La deformación térmica lineal se calcula con la siguiente fórmula:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T \quad (68)$$

Dónde:

α = coeficiente de dilatación térmica lineal (10.8×10^{-6} para aceros al carbono para temperaturas entre 0° y 100°)

L = longitud del cuerpo

ΔT = variación de temperatura

Así también, si el cuerpo es similar a una barra recta y sus extremos son restringidos para evitar su dilatación longitudinal, como el caso de los perfiles estructurales, se genera un esfuerzo térmico de compresión. Entonces este se puede calcular como:

$$\sigma = -\alpha\Delta TE \quad (69)$$

Dónde:

α = coeficiente de dilatación térmica lineal

ΔT = variación de temperatura

E = módulo de elasticidad del material (200 GPa)

Entonces si tomamos el valor del coeficiente de dilatación térmica lineal como $\alpha = 10.8 \times 10^{-6}$ para aceros al carbono para temperaturas entre 0° y 100° (Budinas & Keith Nisbett, 2012), una longitud máxima de $L = 10 \text{ m}$ y una variación de temperatura máxima de $\Delta T = 10^\circ$ y se realiza un pequeño cálculo se obtiene una deformación térmica lineal de 1,08 mm, que es mucho menor el estándar general utilizado de 1mm/m, y un esfuerzo térmico de 21,6 MPa en compresión, que es mucho menor que el esfuerzo de fluencia del acero ASTM A36 (250 MPa) o de su esfuerzo último (450 MPa).

NULLIFIRE, una empresa europea dedicada a la protección pasiva contra incendios, señala en uno de sus artículos de asesoramiento que para que el acero estructural pierda una gran cantidad de capacidad de carga debe superar los 500°C . Adicionalmente, puntualiza que por encima de 550°C el acero ya no tiene la suficiente resistencia para que pueda sostener la estructura que soporta, siendo esta la temperatura límite o crítica (Nullifire, 2025). Del mismo modo, una investigación realizada en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de Ecuador, señala que los efectos de la termofluencia en el acero ASTM A36 se presentan a partir de los 550°C tanto a nivel microestructural como a nivel de su dureza (Caicedo Reyes, y otros, 2017).

En conclusión, las pequeñas variaciones de temperatura a nivel ambiental en aceros estructurales, como el ASTM A36, no generan variaciones dimensionales ni esfuerzos térmicos significativos.

2.2.37. Límite de resistencia a la fatiga

Para encontrar los límites de resistencia a la fatiga, en los tiempos modernos, los ensayos son más rutina que otra novedad, pero extensos. Para los aceros, se calculará de acuerdo a las siguientes relaciones (Budinas & Keith Nisbett, 2012):

$$S_e' \begin{cases} 0.5S_u & S_u \leq 200 \text{ kpsi} (1400 \text{ MPa}) \\ 100 \text{ kpsi} & S_u \geq 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_u \geq 1400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (70)$$

Dónde S_u es la resistencia última (esfuerzo último) del material (en el caso del acero ASTM A36 es 400 MPa) y S_e' es el límite de resistencia inicial.

2.2.38. Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga

Como en la vida real no se puede replicar o considerar los límites de resistencia a la fatiga de laboratorio por tener las condiciones ideales y controladas, ya que existen diferencias en el material, manufactura, entorno, diseño, etc., se utiliza la ecuación de Marin, el cuál identificó los efectos de diferentes factores para corregir el límite (Budinas & Keith Nisbett, 2012):

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e' \quad (71)$$

Dónde:

k_a = factor de modificación por la condición superficial

k_b = factor de modificación por el tamaño

k_c = factor de modificación por la carga

k_d = factor de modificación por la temperatura

k_e = factor de confiabilidad

k_f = factor de modificación por efectos varios

S_e' = límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

S_e = límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica

2.2.39. Factores de efectos varios k_f

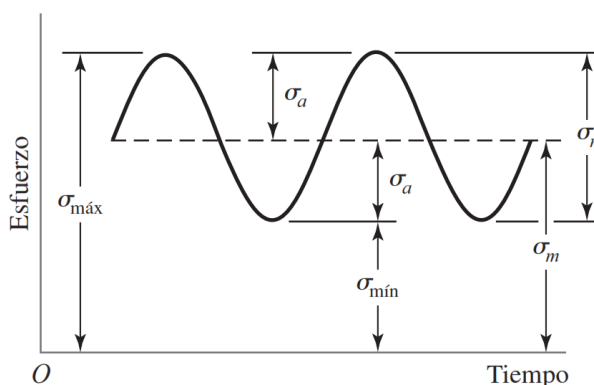
Como no siempre están disponibles los valores experimentales del factor, entonces se debe tener en cuenta los otros factores. Sin embargo, para casos particulares donde además de los otros factores, se presente corrosión, recubrimiento electrolítico, metalizado por aspersión, frecuencia cíclica o corrosión por frotamiento, el factor k_f varía entre 0.24 y 0.90 (Budinas & Keith Nisbett, 2012).

2.2.40. Caracterización de esfuerzos fluctuantes

En situaciones que suceden muy a menudo, existen esfuerzos fluctuantes que desarrollan una forma sinusoidal (como por ejemplo en máquinas que giran o en máquinas sometidas a cargas cíclicas). Aunque también se puede representar en función de las fuerzas actuales, es preferible expresarlo en base a los esfuerzos (Budinas & Keith Nisbett, 2012).

Figura 19

Relación de Esfuerzo-Tiempo de forma sinusoidal



Fuente: *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Budinas & Keith Nisbett, 2012)

De la figura anterior podemos extraer las siguientes relaciones:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (72)$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right| \quad (73)$$

Dónde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = esfuerzo máximo

$\sigma_{m\acute{i}n}$ = esfuerzo mínimo

σ_m = componente del esfuerzo medio

σ_a = componente de la amplitud

σ_r = intervalo de esfuerzo

σ_s = esfuerzo estático o constante (existe y no es igual a σ_m)

2.2.41. Criterios de falla por fatiga ante esfuerzos variables

Existen varios métodos para calcular la falla por fatiga ante esfuerzos variables, al menos cuatro. Sin embargo, el criterio que más se toma en cuenta es el criterio de falla de Goodman Modificado debido a que su gráfica consiste en una línea recta y por lo tanto su álgebra es fácil; se puede graficar de forma sencilla; permite apreciar detalles sutiles de entendimiento en los problemas y con las gráficas y el algebra se pueden comprobar las respuestas. De esta manera, un elemento se considera con vida infinita cuando satisface que (Budinas & Keith Nisbett, 2012):

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = \frac{1}{n} \quad (74)$$

Dónde:

σ_m = componente del esfuerzo medio

σ_a = componente de la amplitud

S_e = límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica

S_u = resistencia (esfuerzo) último del material

n = factor de diseño o de seguridad

2.2.42. Análisis modal

El análisis modal se puede definir como el análisis de las características dinámicas de un sistema mecánico (Yildirim & Esim, 2019). El análisis modal es generalmente utilizado para estudiar comportamientos dinámicos y encontrar coeficientes de amortiguamiento para facilitar el control de las vibraciones (PTC, 2025). Esto quiere decir que, en la práctica, todas las

máquinas (de construcción, de transporte, eléctricas, etc.) y edificaciones están sometidos a fuerzas, o por su naturaleza de funcionamiento, que provocan vibraciones. En este aspecto un puente grúa es un sistema complejo pues combina un sistema estructural con un sistema móvil y un sistema de carga.

En este sentido, los profesores Sahim Yildirim y Emir Esim de la Universidad Erciyes, publicaron una investigación muy interesante titulada “Análisis de vibración libre de sistemas de grúa de múltiples carros mediante el método de elementos finitos”. Ellos aplicaron el método de elementos finitos para hacer un análisis modal, en el programa ANSYS, de 3 sistemas de puente grúa donde las únicas variables eran la posición y la cantidad de carros (trolley). El resto de parámetros eran convencionales y material era acero estructural compatible con las características del acero ASTM A36. Las frecuencias naturales resultantes del análisis en sus 10 modos programados, varían entre 0.03 y 6.65 Hz. Las principales conclusiones son que las frecuencias naturales se reducen debido al incremento de carros (o del sistema en general) y que las frecuencias naturales no dependen de la posición del carro (trolley).

Un aspecto importante que se debe tener presente es el impacto de las vibraciones en las personas o, tratando del sector industrial, de los operarios y el entorno de trabajo. La investigación “Dinámica de la vibración en la operación de grúas: Un análisis modal y armónico” de la Universidad Federal de Pernambuco nos muestra las diferentes frecuencias de resonancia a la que el cuerpo humano es afectado (Alves Silva, y otros, 2025). Este rango se encuentra entre los 4 a 50 Hz para la mayoría de partes del cuerpo y se extiende hasta los 90 Hz para los ojos. Así mismo, debemos tener en cuenta el entorno, donde las máquinas que generan vibraciones son los motores eléctricos que operan en un promedio de 1800 RPM, (equivalente a 30 Hz) y los equipos rotativos de gran envergadura (como cocedores, secadores y prensas) que operan en un promedio de 5 a 30 RPM (equivalente a 0.08 a 0.5 Hz) (Sánchez Rivera, Torres Cuenca, & Alvarado Silva, 2021).

Esto demuestra la gran importancia de un estudio de frecuencias naturales tanto de un equipo que se está diseñando como del entorno donde trabajará

para evitar el fenómeno de resonancia y mantener un control eficiente de las vibraciones.

2.2.43. Carga exterior de viento

Para calcular la carga exterior de viento, primero se debe calcular la velocidad de diseño, siempre y cuando la altura máxima de la estructura o elemento sea de 10 m y la velocidad no menor a 75 km/h (INDECOPI, 2006). Además, según la NTP E.020, en el punto 12.2, la edificación debe ser de tipo 1. Esto significa que es una edificación poco sensible al viento, de poca altura (esbeltez) o cerrada con geometría que no variable. La ecuación para calcular la velocidad de diseño es la siguiente:

$$V_h = V \left(\frac{h}{10} \right)^{0.22} \quad (75)$$

Dónde:

V_h = velocidad de diseño a la altura h en km/h

V = velocidad de diseño hasta 10 m de altura en km/h (Ver Anexo 30)

h = altura sobre el terreno en m

Figura 20

*Factores de Forma C^**

CONSTRUCCIÓN	BARLOVENTO	SOTAVENTO
Superficies verticales de edificios	+0,8	-0,6
Anuncios, muros aislados, elementos con una dimensión corta en la dirección del viento	+1,5	
Tanques de agua, chimeneas y otros de sección circular o elíptica	+0,7	
Tanques de agua, chimeneas, y otros de sección cuadrada o rectangular	+2,0	
Arcos y cubiertas cilíndricas con un ángulo de inclinación que no exceda 45°	+0,8	-0,5
Superficies inclinadas a 15° o menos	+0,3-0,7	-0,6
Superficies inclinadas entre 15° y 60°	+0,7-0,3	-0,6
Superficies inclinadas entre 60° y la vertical	+0,8	-0,6
Superficies verticales ó inclinadas (planas ó curvas) paralelas a la dirección del viento	-0,7	-0,7

* El signo positivo indica presión y el negativo succión.

Fuente: NTP E.020 Cargas (INDECOPI, 2006)

Una vez que tenemos la velocidad de diseño, podemos calcular la carga exterior de viento con la siguiente ecuación:

$$P_h = 0.005C(V_h)^2 \quad (76)$$

Dónde:

P_h = presión o succión del viento a la altura h en kgf/m^2

C = factor de forma adimensional indicado en la figura 20

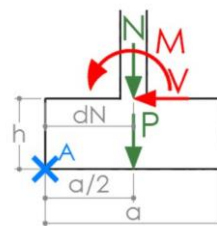
V_h = velocidad de diseño a la altura h en km/h

2.2.44. Estabilidad por vuelco

Primero se deben considerar todas las fuerzas actuantes en la columna y las medidas geométricas. Por ejemplo, en el caso de una columna que soporta un puente grúa, tenemos la carga por viento, el propio peso de la estructura y principalmente la fuerza por traslado de la carga (según la NTP E.020, es el 20% de la carga vertical).

Figura 21

Esquema general para calcular momento estabilizador y desestabilizador



Fuente: *Estado límite de vuelco en zapatas* (Coya, 2022)

Después de tener de tener todos los datos necesarios se procede a calcular los momentos estabilizadores y desestabilizadores (Coya, 2022). De forma general el momento desestabilizador se calcula de la siguiente manera, teniendo en cuenta la figura (00):

$$M_d = M + V \cdot h \quad (77)$$

Dónde:

M_d = momento desestabilizador

M = momento por cargas

V = fuerza cortante

h = altura de zapata

De la misma manera, de forma general se calcula el momento estabilizador cuando la columna es centrada, teniendo en cuenta la figura (21):

$$M_e = N \cdot dN + P \cdot \frac{a}{2} = (N + P) \cdot \frac{a}{2} \quad (78)$$

Dónde:

M_e = momento estabilizador

N = carga de la estructura

dN = distancia del centro al canto de la estructura

P = carga de la zapata

a = ancho/largo de la zapata

Finalmente, una vez calculados los momentos, se comprueba el factor de seguridad establecido por la norma NTP E.020 con un mínimo de 1.5, como sigue:

$$\frac{M_e}{M_d} \geq 1.5 \quad (79)$$

De esta manera se comprueba que la estructura, elemento o columna, es estable y sufrirá volcadura.

2.3. Marco conceptual

- a. **AISC:** (American Institute of Steel Construction / Instituto Americano de la Construcción con Acero) Es un instituto técnico americano sin fines de lucro que brinda normas y recomendaciones para diseñar y construir estructuras de acero. Entre los documentos más importantes se encuentran el “Manual de construcción con acero” y “Especificaciones para estructuras de acero estructural”.

- b. Carga:** Es una fuerza que puede provocar tensiones, deflexiones o desplazamientos en el elemento que se aplique.
- c. CMAA:** (Crane Manufacturers Association of America / Asociación de Fabricantes de Grúas de América) Es una asociación comercial independiente de USA que brinda normas y recomendaciones para diseñar y construir grúas. Para los tipos de grúas más comunes, las de viga única y doble viga, presenta las Especificaciones 74 y 70 respectivamente.
- d. Deflexión:** Es la deformación que se produce en un elemento al ser sometido a una o varias cargas.
- e. Esfuerzo:** Es la relación entre la fuerza aplicada a un elemento y el área de la sección transversal dónde está actuando. Entre lo más conocidos y analizados tenemos al esfuerzo normal y al esfuerzo cortante.
- f. Esfuerzos admisibles:** Son los esfuerzos máximos recomendados por las normas de fabricación.
- g. Límite elástico:** Es el esfuerzo máximo que puede soportar un material antes de sufrir deformaciones permanentes.
- h. Luz:** Distancia entre los ejes de la viga carrilera que soporta el puente grúa o distancia al eje de las columnas de un pórtico.
- i. Momento flexor:** Momentos resultante de aplicar una distribución de esfuerzos sobre una sección transversal respecto a un punto.
- j. Pandeo local:** Pandeo de la parte de un miembro que precipita la falla del miembro completo.
- k. Puente grúa:** Es un tipo particular de grúa que es comúnmente utilizada en talleres de fabricación o plantas industriales donde se requiere trasladar elementos o cargas de gran peso en espacios relativamente cortos.
- l. Viga:** Miembro estructural que soporta cargas transversales en su eje longitudinal.

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1. Método

3.1.1. Tipo de Investigación

Según Hernández Sampieri et al. (2014) y Carrasco Díaz (2017):

- De acuerdo a su enfoque : Cuantitativa. La investigación está sustentada en la recolección de datos basadas en mediciones numéricas y aplicación de análisis, teorías y normas de carácter técnico (físico y matemático).
- De acuerdo a su alcance : Explicativa. La investigación tuvo la finalidad de explicar mediante las normas, teorías y antecedentes el diseño de un puente grúa de 9 toneladas.
- De acuerdo a su tipo : Aplicada. La investigación se ejecutó con una finalidad práctica, es decir, solucionar un problema real de la necesidad de un puente grúa de 9 toneladas.
- De acuerdo a su diseño : Transeccional – Causal. Los datos fueron tomados en un solo momento, luego se procesaron para explicar el diseño de un puente grúa de 9 toneladas para la empresa COPEINCA Chicama.

3.1.2. Línea de Investigación

Ingeniería Mecánica

3.1.3. Variables

- **Determinación de las variables:**
 - a) Variable Independiente: Norma CMAA especificación 74-2020
 - b) Variable Dependiente: Puente grúa de viga única de 9 toneladas de capacidad

- **Definición conceptual de las variables:** Según Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio (2014) la definición conceptual de una variable, fenómeno u objeto es su determinación mediante el rasgo o característica más importante y que funcione para la investigación.

Tabla 1

Definición Conceptual de las Variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL
Independiente: Norma CMAA especificación 74- 2020	Conjunto de recomendaciones técnicas para el cálculo y diseño de elementos estructurales de un puente grúa y componentes que intervienen en su funcionamiento.
Dependiente: Puente grúa de viga única de 9 toneladas de capacidad	Descripción de las características y propiedades físicas (como dimensiones, materiales y esfuerzos) necesarios para la fabricación estructural de un puente grúa de viga única de 9 toneladas.

- **Definición operacional de las variables:** Según Hernández Sampieri et al. (2014) la definición operacional de una variable es determinar todas las actividades u operaciones que se realizan para medir una variable, fenómeno u objeto para subsiguientemente descifrar los datos obtenidos.

Tabla 2*Definición Operacional de las Variables*

VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL
Independiente: Norma CMAA especificación 74- 2020	Guías de entrevistas de apreciación, revisión bibliográfica, cuadros comparativos, pruebas de conocimiento, listas de cotejo y cuestionarios sobre estructuras metálicas, estática, mecánica de materiales.
Dependiente: Puente grúa de viga única de 9 toneladas de capacidad	Guías de observación y de entrevista de condiciones iniciales. Uso de catálogos de selección de perfiles y planchas estructurales. Cálculos de verificación de dimensiones, fuerzas, momentos, deflexión y esfuerzos máximos.

— **Indicadores de las variables:** Se siguen las recomendaciones utilizadas por Hernández Sampieri et al. (2014) y Carrasco Díaz (2017): Para facilitar el análisis las variables deben desagregarse en Dimensiones (Indicadores para Carrasco) y estas a su vez en Indicadores (Índices para Carrasco) hasta las unidades mínimas de análisis. De acuerdo a la explicación previa se presenta las dimensiones y los indicadores para cada variable.

a) Variable independiente

Tabla 3

Dimensiones e Indicadores de la Variable Independiente

VARIABLE	DIMENSION	INDICADORES
VI = V1 Norma CMAA especificación 74-2020	1.1.- Dimensiones y propiedades	1.1.1.- Formas W 1.1.2.- Formas Rectangular HSS
	1.2.- Requerimientos de diseño	1.2.1.- Propiedades de miembros
	1.3.- Diseño de miembros a Flexión	1.3.1.- Disposiciones generales 1.3.2.- Miembros doblemente simétricos y compactos doblados en su eje principal
	1.4.- Clasificación de grúas	1.4.1.- Disposiciones generales 1.4.2.- Grúas clase A
	1.5.- Diseño estructural de Grúas	1.5.1.- Material 1.5.2.- Soldadura 1.5.3.- Estructura 1.5.4.- Esfuerzos permisibles 1.5.5.- Empernado

b) Variable dependiente

Tabla 4*Dimensiones e Indicadores de la Variable Dependiente*

VARIABLE	DIMENSION		INDICADORES
VD = V2 Puente grúa de viga única de 9 toneladas de capacidad	2.1.- Condiciones iniciales		2.1.1.- Luz
			2.1.2.- Distancia entre columnas
			2.1.3.- Altura de columnas
			2.1.4.- Materiales disponibles
			2.1.5.- Requisitos de diseño
	2.2.- Estructural	Cálculo	2.2.1.- Viga principal
		2.2.2.- Viga testera	
		2.2.3.- Viga carrilera	
		2.2.4.- Columnas	
	2.3.- Soldadura	Cálculo de	2.3.1.- Viga principal
	2.4.- Empernado	Cálculo de	2.4.1.- Unión viga principal – viga testera
	2.5.-	Análisis Modal	2.4.1.- Estructura conjunta
	2.6.- Estabilidad por Vuelco	Cálculo de	2.4.1.- Columnas

3.1.4. Métodos de la investigación

Según Carrasco Díaz (2017):

- Método General: Método científico (dialéctico) - comparativo. El principio y fin de toda investigación es la teoría. Es decir, Esta investigación toma como referencia en investigaciones pasadas (antecedentes y marco teórico) para obtener nuevas teorías y conocimientos a raíz de la comparación con los resultados anteriores.

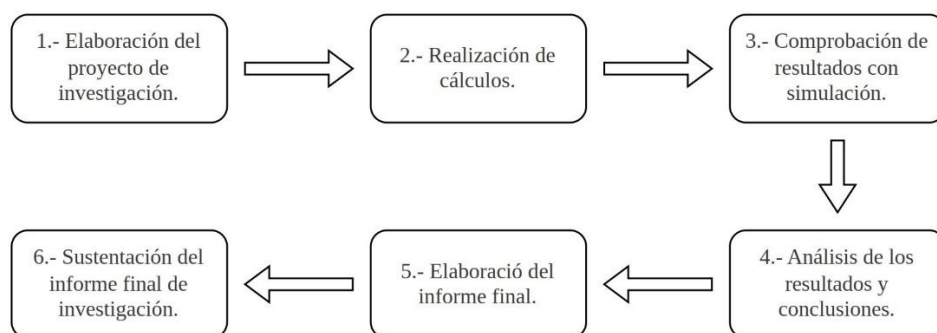
- Métodos Específicos: Método analógico, de modelación e inferencial. En esta investigación se necesitó analizar describir la unidad de estudio (puente grúa), así mismo, mediante la investigación teórica se construyó artificialmente (modelado 3D) un nuevo modelo en base a los objetivos planteados. Este modelado (diseño y 3D) se realizó después de las deducciones e inducciones realizadas mediante los cálculos.

3.1.5. Procedimiento de la investigación

El procedimiento de la investigación comprendió las siguientes actividades:

Figura 22

Diagrama de Flujo del Procedimiento de Investigación



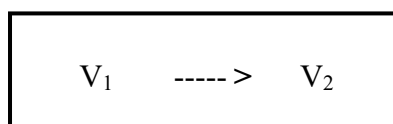
Fuente: Elaboración propia.

1. **Elaboración del Proyecto de Investigación:** En esta etapa inicial del proyecto, se revisó la bibliografía, se acopió un marco teórico que sustente la investigación, se revisaron antecedentes que proporcionaron una orientación general de la investigación y se plasmó, en un informe, todo el plan, estrategia y metodología que se siguió.
2. **Realización de cálculos:** Esta es la fase donde se reunieron todos los datos y se procesaron con las técnicas de análisis propuestas de acuerdo al marco teórico investigado.

3. Comprobación de resultados con simulación: Aquí se contrastaron los resultados de los cálculos con los resultados obtenidos con un programa de simulación estructural (Autodesk Inventor).
4. Análisis de los resultados y conclusiones: Los resultados de los cálculos y la simulación, se analizaron tomando como base las referencias, el marco teórico y los objetivos de la investigación para elaborar las conclusiones finales.
5. Elaboración del informe final: Todo el material utilizado para la investigación (marco teórico, metodología, cálculos, resultados y conclusiones) se organizó en el presente informe final.
6. Sustentación del informe final de investigación: Finalmente el informe y los resultados se expusieron y sustentaron ante un jurado evaluador para calificar el proceso y las conclusiones de la investigación llevada a cabo.

3.1.6. Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es de tipo transeccional-causal. Correspondiendo al siguiente esquema de diseño:



Dónde:

- V_1 : Norma CMAA especificación 74-2020 (Variable independiente)
- V_2 : Puente grúa de viga única de 9 toneladas de capacidad (Variable dependiente)
- -----> : Sentido de causalidad

3.1.7. Técnicas de procesamiento y análisis de los resultados

Al solo recabarse una cantidad pequeña de datos iniciales, no fue necesario procesarlos. Las técnicas de análisis que se utilizaron fueron:

- Cálculo de fuerzas cortantes: Se utilizaron métodos de estática y resistencia de materiales para analizar todas las fuerzas a las que están sometidos los diversos elementos que componen la estructura del puente grúa.
- Cálculo de momentos flectores: Una vez calculados las fuerzas intervinientes en los elementos se obtuvieron los momentos máximos provocados debido a la flexión.
- Cálculo de deflexiones: Identificadas las fuerzas y momentos se evaluaron las deflexiones máximas para compararse con los límites establecidos por la normativa.
- Cálculo de esfuerzos: Con las fuerzas y momentos, también se evaluaron los esfuerzos máximos y se compararán con los límites establecidos por la normativa.
- Comprobación de pandeo local torsional: Con todos los datos previamente calculados (fuerzas, momentos, esfuerzos y datos de las secciones) se evaluó si se presentan las condiciones para se produzca un fallo por pandeo local o no, según lo señalan las normativas internacionales.
- Simulación computacional con método de elementos finitos: Se generaron los perfiles de forma digital, en un programa CAD (Autodesk Inventor) y se evaluó mediante simulación.
- No fue necesaria una prueba de hipótesis debido a que los resultados de las técnicas de análisis son concluyentes.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

- a. En la siguiente tabla se muestra el resumen de las condiciones de operación para el diseño de un puente grúa de viga única de 9 toneladas de capacidad.

Tabla 5

Condiciones de Operación para el Diseño de un Puente Grúa de Viga Única de 9 toneladas

Nº	Datos	Medida	Unidad
Puente Grúa			
1	Clasificación	Clase A	
2	Carga nominal	9	ton
4	Luz ¹	9.6	m
5	Recorrido	16.2	m
6	Altura de columnas	6.6	m

Nota: 1.- Distancia entre eje de la viga carrilera.

- b. En las siguientes tablas se muestra los resultados de los cálculos y los perfiles estructurales seleccionados. Para ver el desarrollo completo de los cálculos revisar los anexos.

Tabla 6

Resultados de Cálculos y Perfil de Viga Principal

Generales		
Perfil	Personalizado (W18x71 lb/ft modificado)	
Momento de inercia	2.57x10 ⁻³ m ⁴	
Peso lineal real	2.54 kN/m	
Resistencia		
	Calculado	Restricción
Fuerza cortante máxima	66.53 kN	NA
Momento máximo	285.74 kN.m	NA
Esfuerzo máximo	48.955 MPa	< 200 MPa
Deflexión	4.442 mm	< 16 mm
Factor de seguridad	4.085	> 1.5
Pandeo local y pandeo lateral torsionante		
	Calculado	Restricción
Relación $b_f/2t_f$	2.38	< 10.748
Relación h/t_w	11.3	< 106.349
Momento crítico	285.74 kN.m	< 2253 kN.m
Flexión local en alas		
	Calculado	Restricción
Punto 0	54.581 MPa	< 150 MPa
Punto 1	51.368 MPa	< 150 MPa
Punto 2	54.581 MPa	< 150 MPa
Límite de resistencia a la fatiga		
Factor de diseño	4.101	> 1

Nota: NA = No Aplica.

Tabla 7*Resultados de Cálculos y Perfil de Viga Testera.*

Generales		
Perfil	HSS 12"x8"x1/4"	
Momento de inercia	7.659x10 ⁻⁵ m ⁴	
Peso lineal real	0.524 kN/m	
Resistencia		
	Calculado	Restricción
Fuerza cortante máxima	57.34 kN	NA
Momento máximo	57.08 kN.m	NA
Esfuerzo máximo	113.574 MPa	< 200 MPa
Deflexión	1.243 mm	< 3.33 mm
Factor de seguridad	1.761	> 1.5
Pandeo local y pandeo lateral torsionante		
	Calculado	Restricción
Relación b/t	31.3	< 34.79
Relación h/t	48.5	< 68.448
Longitud crítica	Lb = 2 m	< Lp = 4.212 m
Límite de resistencia a la fatiga		
Factor de diseño	1.768	> 1

Nota: NA = No Aplica.

Tabla 8*Resultados de Cálculos y Perfil de Viga Carrilera.*

Generales		
Perfil	W14x74 lb/ft	
Momento de inercia	3.309x10 ⁻⁴ m ⁴	
Peso lineal real	1.08 kN/m	
Resistencia		
	Calculado	Restricción
Fuerza cortante máxima	62.374 kN	NA
Momento máximo	121.82 kN.m	NA
Esfuerzo máximo	66.39 MPa	< 200 MPa
Deflexión	4.671 mm	< 14.123 mm
Factor de seguridad	3.01	> 1.5
Pandeo local y pandeo lateral torsionante		
	Calculado	Restricción
Relación $b_f/2t_f$	6.41	< 10.748
Relación h/t_w	25.4	< 106.349
Momento crítico	121.82 kN.m	< 361.94 kN.m
Límite de resistencia a la fatiga		
Factor de diseño	3.024	> 1

Nota: NA = No Aplica.

Tabla 9*Resultados de Cálculos y Perfil de Columna.*

Generales		
Perfil	W12x72 lb/ft	
Longitud real	6.6 m	
Resistencia		
	Calculado	Restricción
Relación de esbeltez	55.558	NA
Constante de columna	125.664	NA
Carga soportada	119.495 kN	< 1532 kN
Esfuerzo Máximo	8.778 MPa	< 150 MPa
Factor de seguridad	17.088	> 1.5
Límite de resistencia a la fatiga		
Factor de diseño	22.87	> 1

Nota: NA = No Aplica.

Tabla 10*Resultados de Cálculos de Pernos.*

Generales		
Perno	1" ASTM A325	
Tipo de carga	Cíclica	
Carga		
	Soportada Real	Restricción
Aplastamiento pernos	9.57 kN	< 408.162 kN
Aplastamiento planchas	9.57 kN	< 159.716 kN
Cortante roscas no extendidas	9.57 kN	< 741.822 kN
Cortante roscas extendidas	9.57 kN	< 590.323 kN
Cortante borde planchas	9.57 kN	< 478.921 kN
Fluencia tensión planchas	9.57 kN	< 1250 kN
Fluencia pura planchas	9.57 kN	< 1729 kN

Tabla 11*Resultados de Cálculos de Soldadura.*

Generales		
Electrodo	E-7018	
Resistencia		
	Calculado	Restricción
Viga principal		
Esfuerzo en ala	16.664 MPa	< 200 MPa
Esfuerzo en alma	12.342 MPa	< 200 MPa
Factor de seguridad en Ala	14.402	> 1.5
Factor de seguridad en Alma	19.446	> 1.5
Unión viga principal con testera		
Esfuerzo en cordones	14.709 MPa	< 200 MPa
Factor de seguridad	16.316	> 1.5

- c. En las siguientes tablas se muestra los resultados de simulación. Para ver el desarrollo completo de los cálculos revisar los anexos.

Tabla 12*Comparación entre Cálculos y Simulación de Viga Principal*

	Calculado	Simulado	%Variación
Fuerza cortante máxima	66.53 kN	65.45 kN	1.62
Momento máximo	285.74 kN.m	283.15 kN.m	0.906
Esfuerzo máximo	48.955 MPa	48.386 MPa	1.16
Deflexión	4.442 mm	4.402 mm	0.9
Factor de seguridad	4.085	4.133	-1.175

Tabla 13*Comparación entre Cálculos y Simulación de Viga Testera.*

	Calculado	Simulado	%Variación
Fuerza cortante máxima	57.34 kN	57.29 kN	0.09
Momento máximo	57.08 kN.m	57.05 kN.m	0.05
Esfuerzo máximo	113.574 MPa	106.713 MPa	6.04
Deflexión	1.243 mm	1.168 mm	6.03
Factor de seguridad	1.761	1.874	-6.42

Tabla 14*Comparación entre Cálculos y Simulación de Viga Carrilera.*

	Calculado	Simulado	%Variación
Fuerza cortante máxima	62.374 kN	61.939 kN	0.697
Momento máximo	121.82 kN.m	121.20 kN.m	0.509
Esfuerzo máximo	66.39 MPa	65.512 MPa	1.342
Deflexión	4.671 mm	4.899 mm	-4.91
Factor de seguridad	3.01	3.05	-1.33

Tabla 15*Comparación entre Cálculos y Simulación de Columna.*

	Calculado	Simulado	%Variación
Relación de esbeltez	55.558	NA	NA
Constante de columna	125.664	NA	NA
Carga soportada	119.495 kN	127.340 kN	-6.57
Esfuerzo Máximo	8.778 MPa	9.18 MPa	-4.58
Factor de seguridad	17.088	16.34	4.38

Tabla 16*Resultados de Análisis Modal - Frecuencias.*

Frecuencias	Valor (Hz)
Frecuencia 1	2.34
Frecuencia 2	2.41
Frecuencia 3	3.02
Frecuencia 4	3.43
Frecuencia 5	4.08
Frecuencia 6	5.09
Frecuencia 7	5.20
Frecuencia 8	5.76

- d. En la siguiente tabla se muestra los resultados del cálculo de estabilidad por vuelco. Para ver el desarrollo completo de los cálculos revisar los anexos.

Tabla 17*Resultados de Estabilidad por Vuelco.*

	Calculado	Restricción
Momento desestabilizador (M_d)	98.49 kN.m	$M_d < M_e$
Momento estabilizador (M_e)	180.987 kN.m	
Factor de seguridad	1.838	≥ 1.5

4.2. Discusión

4.2.1. Con los resultados:

- a. En las Tablas 6 y 12 y se observan los resultados obtenidos por el cálculo y simulación de la viga principal. Se advierte principalmente que el perfil seleccionado es uno personalizado, tomando un W18x71 lb/ft como base. Los resultados de la fuerza cortante máxima y el momento máximo, son muy consistentes entre lo calculado y lo simulado, con una variación porcentual de 1.62% y 0.906%, respectivamente. Del mismo modo, el esfuerzo máximo, la deflexión y el factor de seguridad, tienen una variación porcentual sobre la base de lo calculado de 1.16%, 0.9% y -1.175%, respectivamente, y no sobrepasan las restricciones normadas de 200 MPa, 16 mm y 1.5. Luego, el momento crítico (285.74 kN.m) para el pandeo local y pandeo lateral torsionante no sobrepasa el límite, siendo este mucho menor que 2253 kN.m. Así también, el esfuerzo debido a la flexión local en alas de la viga principal queda muy por debajo del límite normado de 150 MPa. Finalmente, el factor de diseño de resistencia a la fatiga es 4.101 lo que es mayor a 1 y satisface la restricción.
- b. En las Tablas 7 y 13 se observan los resultados obtenidos por el cálculo y simulación de la viga testera. Se advierte principalmente que el perfil seleccionado es el HSS 12"x8"x1/4". Los resultados de la fuerza cortante máxima y el momento máximo, son muy consistentes entre lo calculado y lo simulado, con una variación porcentual de 0.09% y 0.05%, respectivamente. Del mismo modo, el esfuerzo máximo, la deflexión y el factor de seguridad, tienen una variación porcentual del sobre la base de lo calculado de 6.04%, 6.03% y -6.42%, respectivamente, y no sobrepasan las restricciones normadas de 200 MPa, 3.33 mm y 1.5. Así también, la longitud usada (2 m) no sobrepasa la longitud mínima de arriostre (4.212 m). Finalmente, el factor de diseño de resistencia a la fatiga es 1.768 lo que es mayor a 1 y satisface la restricción.
- c. En las Tablas 8 y 14 se observan los resultados obtenidos por el cálculo y simulación de la viga carrilera. Se advierte principalmente que el perfil seleccionado es el W14x74 lb/ft. Los resultados de la fuerza cortante máxima y

el momento máximo, entre lo calculado y lo simulado, perciben una variación porcentual de 0.697% y 0.509%, respectivamente. Del mismo modo, el esfuerzo máximo, la deflexión y el factor de seguridad, tienen una variación porcentual sobre la base de lo calculado de 1.342%, -4.91% y -1.33%, respectivamente, y no sobrepasan las restricciones normadas de 200 MPa, 14.123 mm y 1.5. Así también, el momento crítico (121.82 kN.m) para el pandeo local y pandeo lateral torsionante no sobrepasa el límite, siendo este mucho menor que 361.94 kN.m. Finalmente, el factor de diseño de resistencia a la fatiga es 3.024 lo que es mayor a 1 y satisface la restricción.

- d. En las Tablas 9 y 15 se observan los resultados obtenidos por el cálculo y simulación de la columna. Se advierte principalmente que el perfil seleccionado es el W12x72 lb/ft. Los resultados de la carga soportada y el esfuerzo máximo, perciben una variación porcentual sobre la base de lo calculado de -6.57% y -4.58%, respectivamente. Del mismo modo, quedan muy por debajo y no sobrepasan las restricciones normadas, de 1532 kN y 150 MPa. Finalmente, el factor de diseño de resistencia a la fatiga es 22.87 lo que es mayor a 1 y satisface la restricción.
- e. En la Tabla 10 se observan los resultados obtenidos por el cálculo de pernos. Se advierte principalmente que se usaron pernos de 1" de la norma ASTM A325 y una resistencia considerando una carga cíclica. El resultado de la carga soportada por cada perno, 9.57 kN, queda muy por debajo y no sobrepasa la restricción normada de diseño, ni esfuerzos cortantes o normales aplicados en la unión en ninguno de los casos, siendo el de menor valor 159.716 kN, que es la carga de aplastamiento de las planchas con todos los pernos activos.
- f. En la Tabla 11 se observan los resultados obtenidos por el cálculo de soldadura. Se advierte principalmente que se usó el electrodo E-7018. El esfuerzo en alas (16.664 MPa) y alma (12.342 MPa) calculados no sobrepasaron la restricción normada de 200 MPa. De igual forma el factor de seguridad en alas (14.402) y alma (19.446) calculados quedaron muy por encima de la restricción normada mínima de 1.5. Así también, en la unión de la viga principal con la viga testera, los cordones en la plancha de refuerzo de la viga testera es de 14.709 MPa, que

queda por debajo de la restricción de 200 MPa, y su factor de seguridad de 16.316 mayor que el normado de 1.5.

- g. En la Tabla 16 se muestran los resultados del análisis modal. Los resultados de la simulación muestran valores muy cercanos entre sí, variando las 8 frecuencias entre 2.34 Hz y 5.76 Hz.
- h. En la Tabla 17 se muestran los resultados de la estabilidad por vuelco o volteo. El momento desestabilizador obtenido es de 98.49 kN.m, mientras que el momento estabilizador es de 180.987 kN.m, lo que satisface la principal restricción que es que el primero sea menor que el segundo. Además, con estos valores se obtiene el factor de seguridad que también satisface que sea mayor a 1.5.

4.2.2. Con los antecedentes:

- a. Muñoz (2013) con su tesis “Diseño de un procedimiento para el cálculo y selección de la viga principal de un puente grúa” y Rebollo (2013) con su tesis “Análisis y diseño de una grúa viajera tipo bipuente”, calculan puentes grúa con capacidades de 16 y 30 toneladas y con 12 y 25 metros de luz, respectivamente. Además, ambos diseños son para grúas birrail o bipuente, es decir, disponen de dos vigas principales y utilizan principalmente las recomendaciones de la CMAA especificación 70. Mientras que este trabajo cubre el cálculo de un puente grúa de 10 toneladas y 9.6 metros de luz; además de guiarse principalmente por la CMAA especificación 74, para puentes de viga única. Cabe destacar que Muñoz centra su trabajo en el cálculo de la viga principal, haciendo una comparativa entre usar un perfil W convencional y un perfil de alma doble, haciendo una simulación para convalidar sus datos utilizando el programa ANSYS. Por otro lado, Rebollo hace un cálculo que involucran más componentes estructurales y los simula con SolidWorks. Esta tesis, tomó las consideraciones de Muñoz para la elección del perfil y la metodología de Rebollo, pero usando un programa alternativo para la simulación, Autodesk Inventor, teniendo en común una pequeña variación en los esfuerzos, pero compartiendo resultados casi perfectos para las deflexiones.

- b. Jaramillo (2018) con su tesis “Diseño de puente grúa y sistema stand reel para mejorar el transporte de bobinas de papel en el proceso de rebobinado de la empresa Cartopel” y Marcelo (2017) con su tesis “Diseño de una grúa puente monorriel con capacidad de 02 toneladas aplicando las normas AISC y CMAA para la empresa Sedapal-Lima”, calculan puentes grúa con capacidades de 10 y 2 toneladas y con 7.25 y 7.195 metros de luz, respectivamente. Aunque Jaramillo diseña una grúa bipuente con base en la norma CMAA especificación 70, Marcelo también utiliza esa normativa para complementar su trabajo con la CMAA especificación 74 para su puente grúa de viga única. Este trabajo tomó ambas metodologías para unificar la interpretación de la normativa, corrigiendo además algunos cálculos estructurales de Jaramillo, como es la carga en columnas, y descartando el uso de normativa no vigente por parte de Marcelo, como es la DIN 120.
- c. Carlos (2022) con su tesis “Diseño de una grúa pórtico para la carga y descarga de materiales y equipos con una capacidad 10 toneladas en la empresa Smelting Ingenieros SAC, Arequipa-Perú 2021” y Huaroc (2018) con su tesis “Diseño de un puente grúa para el winche de servicios en mina Yauricocha”, calculan puentes grúa con capacidades de 10 toneladas y con 12 y 9.06 metros de luz, respectivamente. A pesar de diseñar modelos de grúa diferentes (pórtico y puente, respectivamente), comparten el uso de la metodología especificada por la normativa alemana VDI 2221-2225. Sin embargo, este trabajo descartó su uso debido a que el diseño ya se encontraba dirigido debido a los requerimientos iniciales (requiriendo la empresa COPEINCA sede Chicama con puente grúa existente de similares especificaciones). Al mismo tiempo, permitieron explorar y comparar resultados debido a la similitud de carga de diseño (9 toneladas) y luz (9.6 metros aproximadamente) resaltando ambos el apartado estructural.

4.2.3. Con el marco teórico:

- a. La presente investigación, de acuerdo con lo indicado por la empresa (ABUS, 2023), especialistas en el diseño y fabricación de grúas para talleres, desarrolla el cálculo estructural de 9 toneladas de capacidad, estando dentro del rango para el tipo, siendo este de entre 1 a 16 toneladas.

- b. La principal normativa guía de este trabajo es la CMAA especificación 74, que especifica el diseño general de un puente grúa de viga única. Según esta norma, el puente grúa diseñado se encuentra dentro de la Clase A, de su clasificación, debido principalmente a que opera a velocidades bajas y está sometida a periodos de inactividad largos entre levantamientos, pues solo se utilizará en tiempos de mantenimientos algunas veces al año.
- c. Siguiendo la misma recomendación del CMAA 74, se utilizó acero estructural de la norma ASTM A36, el cuál es el tipo de acero más común utilizado en el sector metalmecánico del país. De igual forma, por recomendación se utilizó la normativa ASTM A325 para el cálculo de pernos y la normativa AWS D14.1 donde se favorece el uso del electro E-7018 para el acero A36, clasificado como material de Clase II.
- d. Así mismo, el principal sustento estructural esta dado por la utilización de la normativa AISC, tanto la 360-10 como el Manual de Construcción con Acero, de los cuáles se extrajeron los principales de los perfiles usados, así como las recomendaciones de diseño para pernos, elementos a flexión y elementos a compresión, así como la verificación para el pandeo local y pandeo lateral torsionante. Esta normativa, a su vez, fue acompañada de los principales sustentos teóricos de obras reconocidos como, por ejemplo: Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley (Budinas & Keith Nisbett, 2012), Resistencia de Materiales (Mott, 2009) y Resistencia de Materiales (Pytel & Singer, 2004).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En la presente investigación titulada “Diseño estructural de puente grúa de viga única, para soportar cargas de 9 toneladas” se presentan las siguientes conclusiones:

- a. Se identificaron las condiciones de operación para el diseño de un puente grúa de viga única, las cuales son: la carga nominal (o capacidad) de 9 toneladas, la luz (distancia entre ejes de vigas carrileras) de 9.6 m, clasificado dentro de la Clase A. Adicionalmente, un recorrido (desplazamiento o longitud nominal de la viga carrilera) de 16.2 m y una altura de columnas de 6.6 m.
- b. Se realizaron los cálculos de fuerza cortante, momento y esfuerzo máximo, deflexión, factor de seguridad, pandeo y se obtuvieron los perfiles para el diseño estructural de un puente grúa de viga única de 9 toneladas. Para la viga principal: el perfil seleccionado es uno personalizado con W18x71 lb/ft de base, los pandeos resultaron en la relación $bf/2tf=2.38$, la relación $h/tw=11.3$ y un momento crítico de 285.74 kN.m; la fuerza cortante máxima de 66.53 kN; el momento máximo de 285.74 kN.m, el esfuerzo máximo de 48.955 MPa; la deflexión de 4.442 mm, un factor de seguridad de 4.085 y un factor de diseño de límite de resistencia a la fatiga de 4.101. Para la viga testera: el perfil seleccionado es un HSS 12"x8"x1/4", los pandeos resultaron en la relación $bf/2tf=31.3$, la relación $h/tw=48.5$ y una longitud crítica de 2 m; la fuerza cortante máxima de 57.34 kN; el momento máximo de 57.08 kN.m, el esfuerzo máximo de 113.574 MPa; la deflexión de 1.243 mm, un factor de seguridad de 1.761 y un factor de diseño de límite de resistencia a la fatiga de 1.768. Para la viga carrilera: el perfil seleccionado es un W14x74 lb/ft, los pandeos resultaron en la relación $bf/2tf=6.41$, la relación $h/tw=25.4$ y un momento crítico de 121.82 kN.m; la fuerza cortante máxima de 62.374 kN; el momento máximo de 121.82 kN.m, el esfuerzo máximo de 66.39 MPa; la deflexión de 4.671 mm, un factor de seguridad de 3.01 y un factor de diseño de límite de resistencia a la fatiga de 3.024. Para la columna: el perfil seleccionado es un W12x72 lb/ft, la fuerza soportada de 119.495 kN, el esfuerzo

máximo de 8.778 MPa, un factor de seguridad de 17.088 y un factor de diseño de límite de resistencia a la fatiga de 22.87.

- c. Se comparó con simulación los cálculos de para el diseño estructural de un puente grúa de viga única de 9 toneladas. Para la viga principal: la fuerza cortante máxima de 65.45 kN con variación de 1.62; el momento máximo de 285.15 kN.m con variación de 0.906, el esfuerzo máximo de 48.386 MPa con variación de 1.16; la deflexión de 4.402 mm con variación de 0.9 y un factor de seguridad de 4.133 con variación de -1.175. Para la viga testera: la fuerza cortante máxima de 57.29 kN con variación de 0.09; el momento máximo de 57.05 kN.m con variación de 0.05, el esfuerzo máximo de 106.713 MPa con variación de 6.04; la deflexión de 1.168 mm con variación de 6.03 y un factor de seguridad de 1.874 con variación de -6.42. Para la viga carrilera: la fuerza cortante máxima de 61.939 kN con variación de 0.697; el momento máximo de 121.2 kN.m con variación de 0.509, el esfuerzo máximo de 65.512 MPa con variación de 1.342; la deflexión de 4.899 mm con variación de -4.91 y un factor de seguridad de 3.05 con variación de -1.33. Para la columna: la fuerza soportada de 127.340 kN con variación de -6.57, el esfuerzo máximo de 9.18 MPa con variación de -4.58 y un factor de seguridad de 16.34 con variación de 4.38.
- d. Se realizaron los cálculos de análisis modal, verificación de la resistencia de la unión empernada, la soldadura, y la estabilidad por vuelco. El análisis modal se realizó con simulación y las 8 frecuencias resultantes fueron: 2.34, 2.41, 3.02, 3.43, 4.08, 5.09, 5.20 y 5.76. En la verificación de la unión empernada se utilizó pernos de 1" con carga cíclica, con una carga por perno de 9.57 kN, la que satisface todos los casos de comprobación de carga por esfuerzo cortante o tensión, siendo el caso más crítico de 159.716 kN. En la verificación de la soldadura, para la viga principal el esfuerzo en el ala y el alma de 16.664 y 12.342 MPa, respectivamente, cumplen con ser menores que la restricción normativa de 200 MPa y por consiguiente satisfacen que sus factores de seguridad sean mayores 1.5, con valores de 14.402 y 19.446, también respectivamente. Para la unión de la viga principal con la viga testera, los cordones presentaron un esfuerzo de 14.709 MPa y un factor de seguridad de 16.316, cumpliendo las restricciones de ser menor a 200 MPa y mayor 1.5 para cada caso. Para la estabilidad por vuelco se cumplió

que el momento estabilizador, con un valor de 180.987 kN.m, sea mayor que el momento desestabilizador, con un valor de 98.49, generando un factor de seguridad de 1.838, siendo este mayor a 1.5, cumpliendo la normativa.

5.2. Recomendaciones

Después de haberse desarrollado todo el proceso investigativo y haber llegado a las conclusiones de la investigación, se presentan las siguientes recomendaciones:

- a. Que el puente grúa, aunque fue diseñado para una capacidad nominal de 9 toneladas, no sobrepase ese límite a pesar de contar con un factor de seguridad de 4.085 en la viga principal y 1.761 en la viga testera, ya que ese margen está contemplado para sucesos imprevistos, como paros de emergencia, paros por fallo eléctrico o circunstancias fortuitas como movimientos telúricos, donde la carga de impacto aumenta debido a la aceleración/desaceleración repentina o a la cualidad pendular de la carga suspendida.
- b. Que, aunque exista bibliografía, normativa y antecedentes confiables pero antiguos, se opte por utilizar lo más actual, debido a que estas cuentan con actualización dependiendo del desarrollo tecnológico, de la legislación de seguridad y calidad vigente, así como las consideraciones para el cuidado del medio ambiente, para garantizar un diseño más económico, confiable y ajustado a los estándares actuales.
- c. Que, al replicarse esta investigación, se considere la participación de un segundo investigador experimentado en otras áreas, para poder profundizar y ampliar los demás aspectos de diseño como el eléctrico y mecánico, así como el modelo por simulación y el apartado económico. De esta forma poder desarrollar el diseño integral del equipo.
- d. Que, aunque esta investigación no utiliza una metodología de diseño por tener unas condiciones iniciales de diseño dirigidas (o preaprobadas), sería lo ideal emplear alguna normativa directriz, como la VDI 2221-2225 o similar, cuando no

se tienen restricciones de diseño, se cuenta con una mayor libertad de desarrollo o se busque nuevas alternativas funcionales.

- e. Que se sigan empleando modelos computacionales CAD/CAE para pre-dimensionar, visualizar, simular y calcular los proyectos en ingeniería, porque cada vez las herramientas digitales son más potentes y confiables, dado que ahora hasta los softwares de gama intermedia y algunos de gama básica ofrecen resultados muy confiables, facilitando así el diseño y principalmente ahorrando tiempo y dinero, pero sin dejar de lado la experiencia.
- f. Que la presente investigación sea considerada para ampliar la bibliografía universal sobre el tema principal y sea empleada como referencia para futuros trabajos o investigaciones de alumnos de ingeniería mecánica y ramas afines, especialmente de la Universidad Nacional del Santa y que el uso de normas sea un llamado a una mejor implementación de los cursos para el crecimiento profesional de los estudiantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABUS. (21 de Marzo de 2023). *Grúas*. Obtenido de <https://www.abusgruas.es/gruas>
- AISC 360-10. (2010). *Specification for Structural Steel Buildings*. Técnico, Chicago. Recuperado el 10 de Febrero de 2023
- AISC SCM. (2011). *Steel Construction Manual*. Técnico. Recuperado el 10 de Febrero de 2023
- Alves Silva, R. L., Bezerra Alves, K. G., Peixoto da Costa, J. Á., Villa Ochoa, A. Á., Arruda Michima, P. S., Pires Leite, G. d., & Araújo Caldas, A. M. (21 de Febrero de 2025). Dynamics of Vibration in Crane Operation: An Elementary Modal and Harmonic Analysis. *Dynamics of Vibration in Crane Operation: An Elementary Modal and Harmonic Analysis*. Brasil. doi:<https://doi.org/10.3390/pr13030610>
- ASTM. (2004). *Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts*. Illinois, USA. Recuperado el 10 de Febrero de 2023
- AUTODESK. (25 de Noviembre de 2024). *Autodesk Inventor: software de modelado 3D para diseñadores e ingenieros*. Obtenido de <https://www.autodesk.com/latam/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- AUTODESK. (8 de Octubre de 2025). *Help Autodesk*. Recuperado el 8 de Octubre de 2025, de AUTODESK INVENTOR NASTRAN: <https://help.autodesk.com/view/NINCAD/2024/ENU/?guid=GUID-978425AB-D2FA-491B-8D39-BD1A757F3BBD>
- AWS D14.1. (2005). *Specification for Welding of Industrial and Mill Cranes and Other Material Handling Equipment*. Técnico, Florida, USA. Recuperado el 10 de Febrero de 2023
- Briceño, B. G. (9 de Abril de 2024). *ECOMMERCE NEWS*. Recuperado el 21 de Septiembre de 2025, de ECOMMERCE NEWS: <https://www.ecommercenews.pe/ecosistema-ecommerce/2024/mpresas-pesqueras-en-peru.html/>
- Budinas, R. G., & Keith Nisbett, J. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* (9na ed.). México D.F., México: McGraw Hill. Recuperado el 10 de Febrero de 2023

- Caicedo Reyes, J. I., Orna Chávez, J. E., Balseca Sampedro, O. F., Mayorga Pérez, D. F., Viteri Nuñez, E. F., & Verdugo Bernal, C. M. (2017). *Resistencia De Materiales-Ingeniería Mecánica Estudio De Caso: Degradación Del Acero Astm A36 Sometido Al Fenómeno De Termofluencia*. Chimborazo: European Scientific Journal. doi:<https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n6p173>
- Carlos Merma, E. J. (2022). *Diseño de una grúa pórtico para la carga y descarga de materiales y equipos con una capacidad de 10 toneladas en la empresa Smelting Ingenieros SAC, Arequipa-Perú 2021*. Tesis, Universidad Continental, Arequipa, Perú. Recuperado el 27 de Marzo de 2023
- Carrasco Díaz, S. (2017). *Metodología de la Investigación Científica: Pauta Metodológicas Para Diseñar y Elaborar el Proyecto de Investigación* (2da ed.). Lima, Perú: San Marcos.
- CMAA. (2020). *Especificación 74*. Informe Técnico, Crane Manufacturers Association of America. Recuperado el 10 de Febrero de 2023
- COPEINCA. (21 de Septiembre de 2025). *COPEINCA*. Recuperado el 21 de Septiembre de 2025, de COPEINCA: <https://www.copeinca.com/nosotros/>
- Coya, J. C. (07 de Febrero de 2022). *ZIGURAT*. Recuperado el 19 de Octubre de 2025, de ZIGURAT: <https://www.e-zigurat.com/es/blog/verificacion-estados-limite-vuelco-zapatatas/>
- Grúas Corcan. (2021). *Puente grúa*. Recuperado el 29 de Marzo de 2023, de <https://gruascorcan.tawk.help/article/puente-gr%C3%BAa>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6ta ed.). Distrito Federal, México: Mc Graw Hill.
- Hoist, R. (21 de Septiembre de 2025). *Rhino Hoist Perú*. Recuperado el 21 de Septiembre de 2025, de Rhino Hoist Perú: <https://rhinohoistperu.com/index.html>
- Huaroc Espinoza, E. (2018). *Diseño de un puente grúa para el winche de servicios en mina Yuricocha*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú. Recuperado el 27 de Marzo de 2023
- INDECOPI. (2006). *Norma E.020 Cargas*. Técnico, Lima. Recuperado el 10 de Febrero de 2023

- Instituto Peruano de Economía. (23 de Julio de 2020). *PESCA APORTARÁ MÁS DE US\$ 1,000 MILLONES AL PBI*. Recuperado el 21 de Marzo de 2023, de <https://www.ipe.org.pe/portal/pesca-aportara-mas-de-us-1000-millones-al-pbi/#:~:text=%E2%80%9CEn%20cuanto%20a%20la%20generaci%C3%B3n,la%20extracci%C3%B3n%20e%20industria%20pesquera.>
- Jaramillo Calle, G. F. (2018). *Diseño de puente grúa y sistema stand reel para mejorar el transporte de bobinas de papel en el proceso de rebobinado de la empresa Cartopel*. Tesis, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. Recuperado el 27 de Marzo de 2023
- Marcelo Machay, B. (2017). *Diseño de una grúa puente monorriel con capacidad de 02 toneladas aplicando las normas AISC y CMAA para la empresa Sedapal-Lima*. Tesis, Universidad Nacional del Santa, Nuevo Chimbote, Perú. Recuperado el 27 de Marzo de 2023
- Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo de Perú. (28 de Noviembre de 2008). Resolución Ministerial N.º 375-2008-TR. *Anexo 1: NORMA BÁSICA DE ERGONOMÍA Y DE PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE RIESGO DISERGONÓMICO*. Recuperado el 21 de 03 de 2023, de <https://www.gob.pe/institucion/mtpe/normas-legales/394457-375-2008-tr>
- Mott, R. L. (2009). *Resistencia de Materiales* (5ta ed.). México D.F., México: Pearson. Recuperado el 10 de Febrero de 2023
- Muñoz Yunda, D. (2019). *Diseño de un procedimiento para el cálculo y selección de la viga principal*. Tesis, Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia. Recuperado el 27 de Marzo de 2023
- Nullifire. (21 de Septiembre de 2025). *Nullifire*. Recuperado el 21 de Septiembre de 2025, de Nullifire: <https://www.nullifire.com/es-es/asesoramiento-de-expertos/blog/la-proteccion-pasiva-contraincendios-y-la-importancia-de-la-temperatura-limite-para-la-estructura-de-acero/#:~:text=Esto%20significa%20que%20por%20encima,la%20temperatura%201%C3%ADmite%20o%20>
- PERU21. (28 de Marzo de 2021). *Colección del Bicentenario 200 años de la Economía en el Perú: 'El boom pesquero'*. Recuperado el 21 de Marzo de 2023, de

<https://peru21.pe/peru/coleccion-del-bicentenario-coleccion-del-bicentenario-200-anos-de-la-economia-en-el-peru-el-boom-pesquero-noticia/>

- PTC. (8 de Octubre de 2025). *Análisis Modal en Creo*. Recuperado el 8 de Octubre de 2025, de Análisis Modal en Creo: <https://www.ptc.com/en/technologies/cad/simulation-and-analysis/modal-analysis#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20el%20an%C3%A1lisis%20modal,la%20aeroespacial%20y%20la%20automotriz>
- Pytel, A., & Singer, F. (2004). *Resistencia de Materiales* (4ta ed.). México D.F., México: OXFORD University Press. Recuperado el febrero de 2023
- Real Academia Española. (2023). Diccionario de la Lengua Española [versión electrónica]. (Real Academia Española, Ed.) Madrid, España. Recuperado el 29 de Marzo de 2023, de <https://dle.rae.es/>
- Rebollo Perdomo, A. (2013). *Análisis y diseño de una grúa viajera tipo bipunte*. Tesis, Instituto Politécnico Nacional, México D.F. Recuperado el 27 de Marzo de 2023
- Sánchez Rivera, I. W., Torres Cuenca, D. E., & Alvarado Silva, C. A. (31 de Julio de 2021). Rediseño de un cocinador indirecto con capacidad de 60 t/h de pescado utilizando un software de programación en la industria pesquera. *Rediseño de un cocinador indirecto con capacidad de 60 t/h de pescado utilizando un software de programación en la industria pesquera*. Pimentel, Chiclayo, Perú: Universidad Señor de Sipán. Recuperado el 8 de Octubre de 2025, de <https://revistas.uss.edu.pe/index.php/ING/article/view/1358>
- SOLDEXA. (2014). *Manual de soldadura y catálogo de productos* (7ma ed.). Perú. Recuperado el 10 de Febrero de 2023
- Yildirim, S., & Esim, E. (Octubre de 2019). Free Vibration Analysis of Multi-Carriages Crane Systems with Finite Element Method. *Free Vibration Analysis of Multi-Carriages Crane Systems with Finite Element Method*. Praga, Turquía: ResearchGate. Recuperado el 8 de Octubre de 2025, de <https://www.researchgate.net/institution/Erciyes-University>

ANEXOS

Anexo 1: Resumen de condiciones de operación para cálculos

De acuerdo a las consultas realizadas, teoría, equipos utilizados y medidas tomadas en la zona de prensas de planta COPEINCA sede Chicama. Se presentan en la siguiente tabla las condiciones de operación para cálculos.

Datos recopilados en condiciones iniciales

N°	Datos	Medida	Unidad
Puente Grúa			
1	Clasificación	Clase A	
Viga Principal			
2	Carga nominal	9	ton
3	Perfil de viga	Personalizado	
4	Luz ¹	9.6	m
5	Peso de trolley con tecele	450	kg
6	Distancia entre ejes de ruedas de trolley	160	mm
7	Distancia mínima entre ruedas de trolley y eje de viga carrilera	560	mm
8	Velocidad de desplazamiento de grúa	34	ft/min
9	Aceleración de desplazamiento de grúa ²	0.25	ft/s ²
10	Velocidad de desplazamiento de trolley	36	ft/min
11	Aceleración de desplazamiento de trolley ²	0.25	ft/s ²
12	Velocidad de izaje	8.8583	ft/min
Viga Testera			
13	Perfil de viga testera	HSS 12"x8"x1/4"	
14	Distancia entre ejes de ruedas	2	m
Viga Carrilera			
15	Perfil de viga carrilera	W14x74 lb/pie	
16	Distancia entre columnas	$\frac{8474}{7752}$	mm
Columnas			
17	Perfil de columna	W12x72 lb/pie	
18	Longitud real de columna	6.6	m

1.- Distancia entre ejes de viga carrilera.

2.- Obtenida de norma CMAA especificación 74.

Anexo 2: Cálculo de viga principal

Paso 1: Análisis de cargas principales

Se obtienen las cargas principales según la CMAA especificación 74 y los datos iniciales del Anexo 1:

1. Carga muerta (DL): Se considerará en un paso posterior ya que depende del perfil.

$$DL = \dots$$

2. Carga de Trolley (TL)

$$TL = 450 \text{ kg}$$

3. Carga Izada (LL)

$$LL = 90\,000 \text{ kg}$$

4. Fuerzas de Inercia Vertical (VIF)

4.1. Factor de carga Muerta (DLF)

— Velocidad de desplazamiento de grúa: $TS_g = 34 \text{ ft/min}$

— Velocidad de desplazamiento de trolley: $TS_t = 36 \text{ ft/min}$

— Utilizamos ecuación (1):

$$DLF = 1.1 \leq 1.05 + \frac{TS}{2000} \leq 1.2$$

— DLF de grúa:

$$DLF_g = 1.1 \leq 1.067 \leq 1.2$$

Como el resultado no se encuentra en el rango estimado se selecciona el menor valor: $DLF_g = 1.1$

— DLF de trolley:

$$DLF_t = 1.1 \leq 1.068 \leq 1.2$$

Como el resultado no se encuentra en el rango estimado se selecciona el menor valor: $DLF_t = 1.1$

— Como los valores son iguales y mínimos se simplifica el factor a uno general:

$$DLF = 1.1$$

4.2. Factor de carga Izada (HLF)

— Velocidad de izaje: = 8.8583 *ft/min*

— Utilizamos ecuación (2):

$$HLF = 0.15 \leq 1.05 \times \text{Velocidad de Izaje (FPM)} \leq 0.5$$

$$HLF = 0.15 \leq 0.044 \leq 0.5$$

Como el resultado no se encuentra en el rango estimado se selecciona el menor valor:

$$HLF = 0.15$$

5. Fuerzas de Inercia de Transmisión (IFD)

— Como la aceleración de desplazamiento de la grúa y trolley es menor a 60 *ft/min* se toma el menor valor de aceleración 0.25 *ft/s²*. Ver figura 5. Luego se aplica la ecuación (3):

$$IDF_{factor} = 0.078 \times \text{Aceleración o desaceleración} \left(\frac{ft}{s^2}\right) \geq 0.025$$

$$IDF_{factor} = 0.0195 \geq 0.025$$

Como el resultado no se encuentra en el rango estimado se selecciona el menor valor:

$$IDF_{factor} = 0.025$$

— Luego se aplica la ecuación (4):

$$IFD = IDF_{factor} \times (TL + LL)$$

— La fuerza de inercia de transmisión será:

$$IFD = 236.25 \text{ kg}$$

Paso 2: Combinación de cargas

Se considera la combinación de cargas según ecuación (5):

$$\text{Carga} = DL(DLF_B) + TL(DLF_T) + LL(1 + HLF) + IFD$$

Considerando que la carga muerta (DL) aún no está definida se obtiene la carga:

$$P_i = 450 \text{ kg}(1.1) + 9\,000 \text{ kg}(1 + 0.15) + 236.25 \text{ kg}$$

$$P_i = 11\,080 \text{ kg}$$

Esta carga se divide entre los dos pares de ruedas separadas longitudinalmente en la viga principal. La carga puntual sobre la viga quedará:

$$P = \frac{P_i}{2} = \frac{11\,080 \text{ kg}}{2} = 5541 \text{ kg} = 54.335 \text{ kN}$$

Paso 3: Deflexión máxima permisible

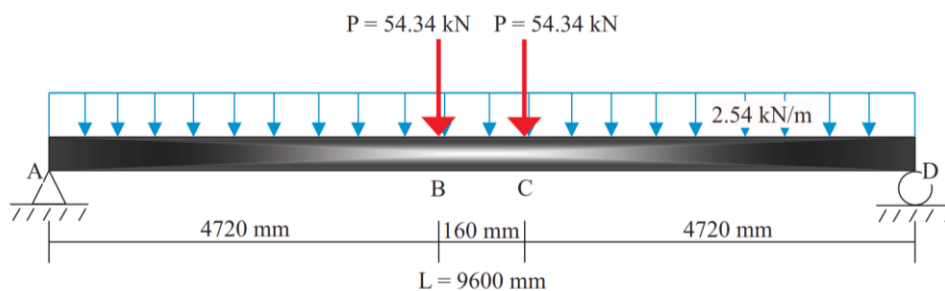
Se utiliza la ecuación (18) y los datos iniciales del Anexo 1, dónde L es la Luz:

$$y_{max} = \frac{L}{600}$$

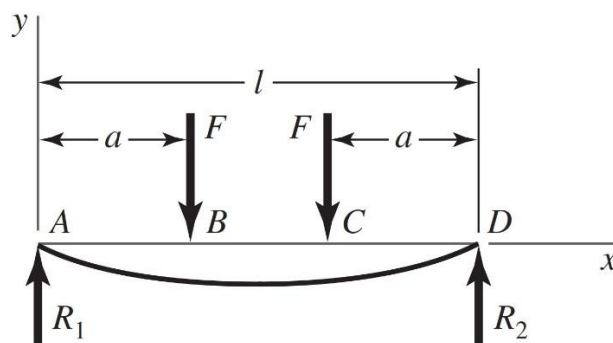
$$y_{max} = \frac{9.6 \text{ m}}{600} = 0.016 \text{ m} = 16 \text{ mm}$$

Paso 4: Cálculo de momento de inercia referencial

Se realiza un esquema previo con los datos:



Se utiliza la ecuación (25) y la figura 10:



$$y_{max} = \frac{Fa}{24EI} (4a^2 - 3l^2)$$

De la ecuación (25) se despeja el momento de inercia y se modifica el signo de forma conveniente para que el resultado no resulte negativo:

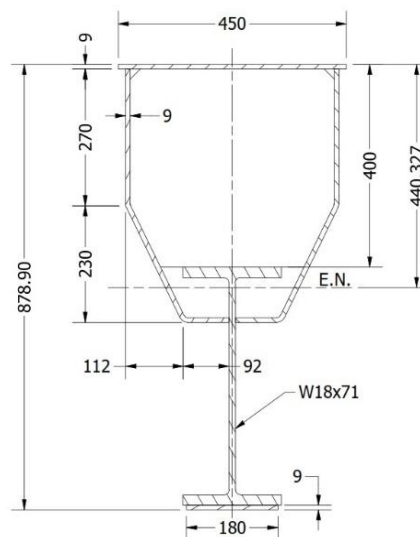
$$I_{ref} = -\frac{Fa}{24Ey_{max}}(4a^2 - 3l^2)$$

$$I_{ref} = -\frac{(54.335kN) \cdot (4.72m)}{24(200GPa) \cdot (0.016m)}(4(4.72m)^2 - 3(9.6m)^2)$$

$$I_{ref} = 6.26 \times 10^{-4} m^4$$

Paso 5: Selección de la sección transversal

La CMAA da libertad de elegir o diseñar un perfil de viga. Del mismo modo por recomendación de COPEINCA se utilizó un modelo similar al que ya cuentan.



Se obtienen las propiedades de la sección:

Momento de inercia: $I_s = 2.57 \times 10^{-3} m^4$

Área de sección: $A_s = 0.03 m^2$

Se calcula la masa lineal real del perfil de viga:

$$m_{lr} = \rho_a A_s$$

$$m_{lr} = \left(7850 \frac{kg}{m^3}\right) (0.03 m^2) = 235.5 \frac{kg}{m} = 2.309 \frac{kN}{m}$$

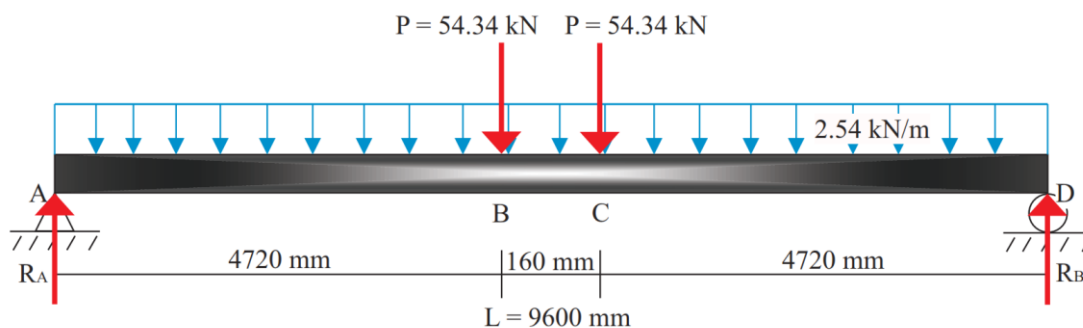
Se multiplica por el factor de carga muerta y obtenemos la masa lineal de diseño:

$$m_l = m_{lr}(DLF_B)$$

$$m_l = \left(2.309 \frac{kN}{m}\right) (1.1) = 2.54 \frac{kN}{m}$$

Paso 6: Análisis estático

Se procede con el cálculo estático mediante sumatoria de momentos en el punto A y debido a la simetría ambas reacciones tendrán el mismo valor, según el esquema completo.



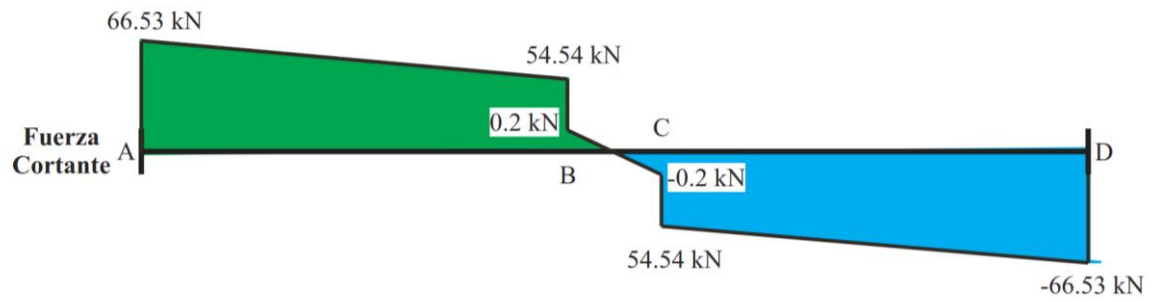
$$\sum M_A = 0$$

$$54.34kN(4.72m) + 2.54 \frac{kN}{m} (9.6m)(4.8m) + 54.34kN(4.88m) - R_B(9.6m) = 0$$

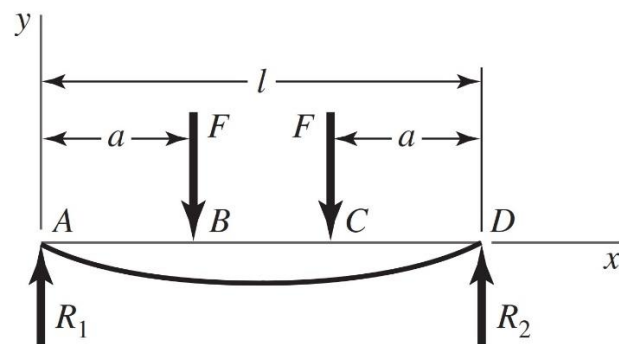
$$R_B = R_A = 66.53 \text{ kN}$$

Paso 7: Cálculo de diagramas de fuerza cortante y momento flector

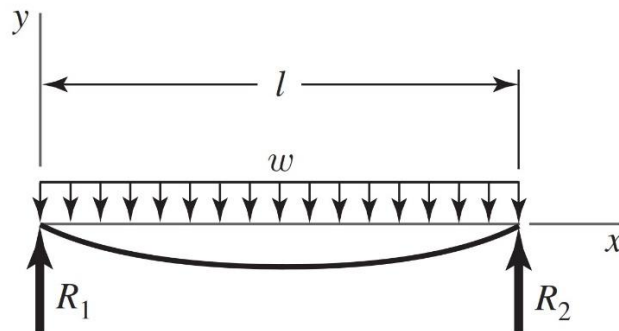
Según el cálculo del punto anterior (análisis estático) se gráfica el diagrama de fuerza cortante.



Los momentos se calculan utilizando el método de superposición. Para ello se utilizan las figuras 10 y 11 y las ecuaciones (24) y (27), respectivamente:



$$M_F = Fa$$



$$M_W = \frac{wl^2}{8}$$

Para calcular el momento flector máximo se suman ambos valores:

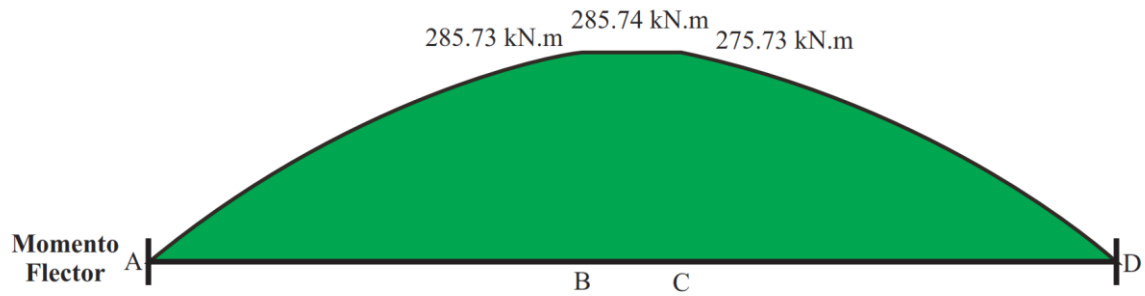
$$M_{max} = M_F + M_W$$

$$M_{max} = Fa + \frac{wl^2}{8}$$

$$M_{max} = 54.34 \text{ kN}(4.72\text{m}) + \frac{2.54 \frac{\text{kN}}{\text{m}} (9.6\text{m})^2}{8}$$

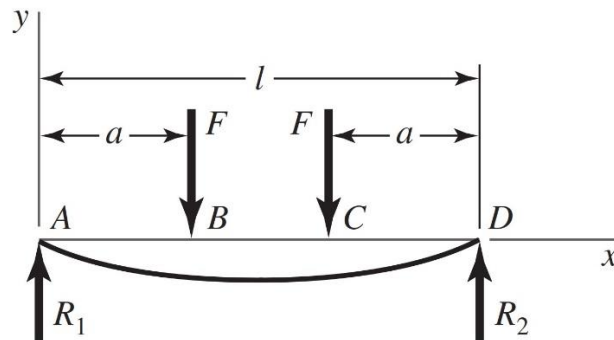
$$M_{max} = 285.73 \text{ kN.m}$$

El diagrama de momento flector queda como la figura siguiente:



Paso 8: Cálculo de la deflexión de la viga

La deflexión se calcula utilizando el método de superposición. Para ello primero se utiliza la figura 10 y la ecuación (25):

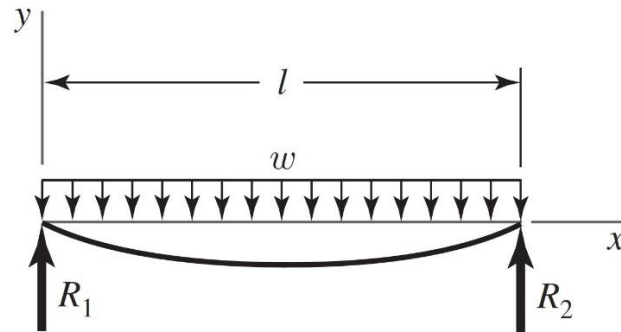


$$y_F = \frac{Fa}{24EI} (4a^2 - 3l^2)$$

$$y_F = \frac{54.34\text{kN}(4.72\text{m})}{24(200\text{GPa})(2.57 \times 10^{-3}\text{m}^4)} [4(4.72\text{m})^2 - 3(9.6\text{m})^2]$$

$$y_F = -0.003895 \text{ m} = -3.895 \text{ mm}$$

Luego se utiliza la figura 11 y la ecuación (28):



$$y_w = -\frac{5wl^4}{384EI}$$

$$y_w = -\frac{5(2.54 \frac{kN}{m})(9.6m)^4}{384(200GPa)(2.57 \times 10^{-3}m^4)}$$

$$y_w = -0.000547m = -0.547mm$$

La deflexión se obtiene sumando ambos valores:

$$y_v = y_F + y_w$$

$$y_v = -3.895 \text{ mm} - 0.547 \text{ mm}$$

$$y_v = -4.442 \text{ mm}$$

Tiene que cumplirse que la deflexión de la viga sea menor que la deflexión máxima (consideramos valores absolutos para la comparación):

$$y_v < y_{max}$$

$$4.442 \text{ mm} < 16 \text{ mm} \quad (\text{Correcto})$$

Paso 9: Cálculo del esfuerzo máximo de flexión

El esfuerzo de flexión máxima se calcula utilizando la ecuación (38). El momento se obtiene del paso 7 y los datos de la sección del paso 5:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}c}{I_x}$$

$$\sigma_{max} = \frac{285.73kN \cdot m(0.440327m)}{2.57 \times 10^{-3}m^4}$$

$$\sigma_{max} = 48.955 MPa$$

Tiene que cumplirse que el esfuerzo máximo sea menor que el esfuerzo permisible en el caso 1 de la CMAA:

$$\sigma_{max} < 0.8\sigma_y$$

$$48.955 MPa < 0.8(250MPa)$$

$$48.955 MPa < 200MPa \quad \text{(Correcto)}$$

Paso 10: Cálculo del factor de seguridad

El factor de seguridad se obtiene con la relación del esfuerzo máximo con el esfuerzo permisible (tiene que ser superior al rango 1.3-1.5), según la ecuación (39):

$$n = \frac{0.8\sigma_y}{\sigma_{max}}$$

$$n = \frac{200MPa}{48.955 MPa}$$

$$n = 4.085 \quad \text{(Correcto)}$$

Paso 11: Comprobación de pandeo local

Se elige un perfil con momento de inercia similar a la sección usada. Se selecciona de las tablas AISC (ver Anexo 16):

Se elige el perfil: W18x283 lb/ft

Su momento de inercia es: $I_s = 6.17 \times 10^3 in^4$

Sus relaciones ancho espesor: $\frac{b_f}{2t_f} = 2.38$ y $\frac{h}{t_w} = 11.3$

Se comprueba que la sección sea compacta con la ecuación (46). Para ello utilizamos primero la ecuación (47):

$$\frac{b_f}{2t_f} < 0.38 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = \lambda_p$$

$$2.38 < 0.38 \sqrt{\frac{200GPa}{250MPa}} = \lambda_p$$

$$2.38 < 10.748 \quad \text{(Cumple)}$$

Luego utilizamos la ecuación (48):

$$\frac{h}{t_w} < 3.76 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = \lambda_p$$

$$11.3 < 3.76 \sqrt{\frac{200GPa}{250MPa}} = \lambda_p$$

$$11.3 < 106.349 \quad \text{(Cumple)}$$

Por lo tanto, la sección es compacta y no sufre pandeo local. Pero si podría sufrir pandeo lateral torsionante.

Paso 12: Comprobación de pandeo lateral torsionante

Se toman los demás datos de la sección W18x283 lb/ft de las tablas y teoría de la AISC (ver Anexo 16):

$$I_y = 704 \text{ in}^4 \quad S_x = 565 \text{ in}^3 \quad h_o = 19.4 \text{ in} \quad C_w = 65900 \text{ in}^6$$

$$r_y = 2.91 \text{ in} \quad Z_x = 676 \text{ in}^3 \quad J = 134 \text{ in}^4$$

$$\text{Luz de la grúa (9.6 m):} \quad L_b = 377.95 \text{ in}$$

$$\text{Coeficiente "c" para perfiles W:} \quad c = 1$$

$$\text{Coeficiente para vigas sin carga transversal:} \quad C_b = 1$$

Se calcula la longitud del límite plástico con la ecuación (51):

$$L_p = 1.76r_y \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}$$

$$L_p = 1.76(2.91 \text{ in}) \sqrt{\frac{200\text{GPa}}{250\text{MPa}}}$$

$$L_p = 145.363 \text{ in}$$

Se calcula la longitud del límite elástico con la ecuación (52), previamente se calcula el calor de “ r_{ts} ” con la ecuación (53):

$$r_{ts} = \sqrt{\frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x}}$$

$$r_{ts} = \sqrt{\frac{\sqrt{(704 \text{ in}^4)(65900 \text{ in}^6)}}{565 \text{ in}^3}}$$

$$r_{ts} = 3.472 \text{ in}$$

Luego se aplica en la ecuación (52):

$$L_r = 1.95r_{ts} \frac{E}{0.7\sigma_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{S_x h_o}\right)^2 + 6.76\left(\frac{0.7\sigma_y}{E}\right)^2}}$$

$$L_r = 1.95(3.472 \text{ in}) \frac{200\text{GPa}}{0.7(250\text{MPa})} \sqrt{\frac{(134 \text{ in}^4)(1)}{(565 \text{ in}^3)(19.4 \text{ in})} + \sqrt{\left[\frac{(134 \text{ in}^4)(1)}{(565 \text{ in}^3)(19.4 \text{ in})}\right]^2 + 6.76 \left[\frac{0.7(250\text{MPa})}{200\text{GPa}}\right]^2}}$$

$$L_r = 1223 \text{ in}$$

Se analizan los valores y se comprueba el caso:

$$L_p < L_b \leq L_r$$

$$145.363 \text{ in} < 377.95 \text{ in} \leq 1223 \text{ in}$$

Se calculan los momentos por flexión según ecuación (54):

$$M_{n1} = M_p = \sigma_y Z_x$$

$$M_{n1} = M_p = 36\text{ksi}(676 \text{ in}^3)$$

$$M_{n1} = M_p = 2.434 \times 10^4 \text{ kpi. in}$$

Se calcula el momento “ M_{n2} ” por pandeo lateral torsionante según ecuación (55):

$$M_{n2} = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7\sigma_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p$$

$$M_{n2} = (1) \left\{ 2.434 \times 10^4 \text{ kpi. in} - [2.434 \times 10^4 \text{ kpi. in} - 0.7(36 \text{ ksi})(565 \text{ in}^3)] \left(\frac{377.95 \text{ in} - 245.363 \text{ in}}{1223 \text{ in} - 245.363 \text{ in}} \right) \right\} \leq M_p$$

$$M_{n2} = 2.216 \times 10^4 \text{ kpi. in} \leq 2.434 \times 10^4 \text{ kpi. in} \quad \text{(Cumple)}$$

Luego se elige al menor “ M_n ”:

$$M_n = 2.216 \times 10^4 \text{ kpi. in} = 2503 \text{ kN.m}$$

Luego se calcula el momento crítico “ M_r ” y debe cumplirse la ecuación (57):

$$M_r = \phi_b M_n \gg M_{max}$$

$$M_r = (0.9)(2503 \text{ kN.m}) \gg 285.73 \text{ kN.m}$$

$$M_r = 2253 \text{ kN.m} \gg 285.73 \text{ kN.m} \quad \text{(Correcto)}$$

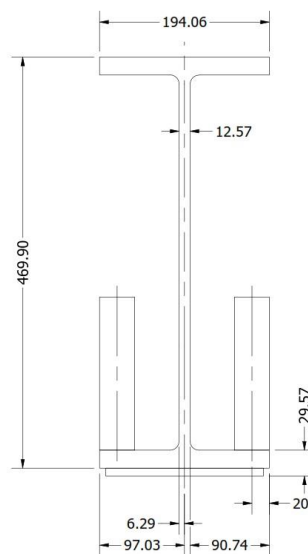
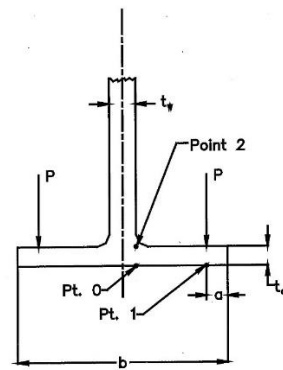
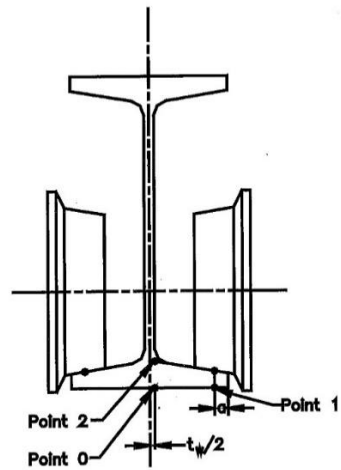
Como el momento crítico es mucho mayor que el momento máximo entonces no existe pandeo lateral torsional.

Paso 13: Flexión local en alas debido a la carga en las ruedas

En primer lugar, se obtiene la carga en cada rueda:

$$P_r = \frac{P}{2} = \frac{54.335 \text{ kN}}{2} = 27.1678 \text{ kN}$$

Se toman los datos del perfil usado en la viga principal según figuras 6 y 7:



$$b = 194.06 \text{ mm} = 7.64 \text{ in}$$

$$t_w = 12.57 \text{ mm} = 0.495 \text{ in}$$

$$t_a = 29.57 \text{ mm} = 1.1642 \text{ in}$$

$$a = 20 \text{ mm} = 0.787 \text{ in}$$

Luego utilizamos la ecuación (6) para secciones simétricas de una sola alma:

$$\lambda = \frac{2a}{b - t_w}$$

$$\lambda = \frac{2(0.787 \text{ in})}{7.64 \text{ in} - 0.495 \text{ in}}$$

$$\lambda = 0.22$$

Luego utilizamos las ecuaciones (7), (8), (9) y (10) para secciones de ala paralela:

$$C_{X0} = -2.110 + 1.977\lambda + 0.0076e^{6.53\lambda}$$

$$C_{X0} = -2.110 + 1.977(0.22) + 0.0076e^{6.53(0.22)}$$

$$C_{X0} = -1.642$$

$$C_{X1} = 10.108 - 7.408\lambda - 10.108e^{-1.364\lambda}$$

$$C_{X1} = 10.108 - 7.408(0.22) - 10.108e^{-1.364(0.22)}$$

$$C_{X1} = 0.991$$

$$C_{Y0} = 0.050 - 0.580\lambda + 0.148e^{3.015\lambda}$$

$$C_{Y0} = 0.050 - 0.580(0.22) + 0.148e^{3.015(0.22)}$$

$$C_{Y0} = 0.21$$

$$C_{Y1} = 2.230 - 1.490\lambda + 1.390e^{-18.33\lambda}$$

$$C_{Y1} = 2.230 - 1.490(0.22) + 1.390e^{-18.33(0.22)}$$

$$C_{Y1} = 1.909$$

Se calculan los esfuerzos en el Punto 0 con las ecuaciones (11) y (12):

$$\sigma_{X0} = C_{X0} \frac{P}{(t_a)^2}$$

$$\sigma_{X0} = (-1.642) \frac{(27.167 \text{ kN})}{(1.1642 \text{ in})^2}$$

$$\sigma_{X0} = -51.029 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Y0} = C_{Y0} \frac{P}{(t_a)^2}$$

$$\sigma_{Y0} = (0.21) \frac{(30.048 \text{ kN})}{(1.1642 \text{ in})^2}$$

$$\sigma_{Y0} = 6.518 \text{ MPa}$$

Se calculan los esfuerzos en el Punto 1 con las ecuaciones (13) y (14):

$$\sigma_{X1} = C_{X1} \frac{P}{(t_a)^2}$$

$$\sigma_{X1} = (0.991) \frac{(27.167 \text{ kN})}{(1.1642 \text{ in})^2}$$

$$\sigma_{X1} = 30.804 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Y1} = C_{Y1} \frac{P}{(t_a)^2}$$

$$\sigma_{Y1} = (1.909) \frac{(27.167 \text{ kN})}{(1.1642 \text{ in})^2}$$

$$\sigma_{Y1} = 59.299 \text{ MPa}$$

Se calculan los esfuerzos en el Punto 2 con las ecuaciones (15) y (16):

$$\sigma_{X2} = -\sigma_{X0}$$

$$\sigma_{X2} = 51.029 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{Y2} = -\sigma_{Y0}$$

$$\sigma_{Y2} = -6.518 \text{ MPa}$$

Se define el esfuerzo admisible de comparación según el esfuerzo permisible en el caso 1 de la CMAA:

$$\sigma_{all} = 0.6\sigma_y$$

$$\sigma_{all} = 0.6(250 \text{ MPa})$$

$$\sigma_{all} = 150 \text{ MPa}$$

Se obtiene el esfuerzo combinado en el Punto 0, tomando el esfuerzo cortante " τ_{XY} " despreciable (0) y utilizando la ecuación (17):

$$\sigma_{comb} = \sqrt{(\sigma_X)^2 + (\sigma_Y)^2 - \sigma_X\sigma_Y + 3(\tau_{XY})^2} \leq \sigma_{all}$$

$$\sigma_{comb} = \sqrt{(-51.029 \text{ MPa})^2 + (6.518 \text{ MPa})^2 - (-51.029 \text{ MPa})(6.518 \text{ MPa})} \leq 150 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{comb} = 54.581 \text{ MPa} \leq 150 \text{ MPa} \quad \text{(Cumple)}$$

Se obtiene el esfuerzo combinado en el Punto 1, tomando el esfuerzo cortante " τ_{XY} " despreciable (0) y utilizando la ecuación (17):

$$\sigma_{comb} = \sqrt{(\sigma_X)^2 + (\sigma_Y)^2 - \sigma_X\sigma_Y + 3(\tau_{XY})^2} \leq \sigma_{all}$$

$$\sigma_{comb} = \sqrt{(30.804 \text{ MPa})^2 + (59.299 \text{ MPa})^2 - (30.804 \text{ MPa})(59.299 \text{ MPa})} \leq 150 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{comb} = 51.368 \text{ MPa} \leq 150 \text{ MPa} \quad \text{(Cumple)}$$

Se obtiene el esfuerzo combinado en el Punto 2, tomando el esfuerzo cortante " τ_{XY} " despreciable (0) y utilizando la ecuación (17):

$$\sigma_{comb} = \sqrt{(\sigma_X)^2 + (\sigma_Y)^2 - \sigma_X\sigma_Y + 3(\tau_{XY})^2} \leq \sigma_{all}$$

$$\sigma_{comb} = \sqrt{(51.029 \text{ MPa})^2 + (-6.518 \text{ MPa})^2 - (51.029 \text{ MPa})(-6.518 \text{ MPa})} \leq 150 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{comb} = 54.581 \text{ MPa} \leq 150 \text{ MPa} \quad \text{(Cumple)}$$

Paso 14: Límite de resistencia a la fatiga

En primer lugar, identificamos la resistencia (esfuerzo) última del material:

$$S_u = 400 \text{ MPa} \leq 1\,400 \text{ MPa}$$

Así, con esa condición y de la ecuación (70) obtenemos el límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica:

$$S'_e = 0.5S_u = 0.5 \times 400 \text{ MPa} = 200 \text{ MPa}$$

Luego identificamos el factor k_f que varía entre 0.24 y 0.90. Tomamos el promedio:

$$k_f = 0.67$$

Con el factor hallado encontramos el límite de resistencia modificado según ecuación (71):

$$S_e = k_f S'_e = 0.67 \times 200 \text{ MPa} = 134 \text{ MPa}$$

Identificamos el esfuerzo máximo y el esfuerzo mínimo. Como es un puente grúa el esfuerzo máximo se produce cuando se aplica la carga máxima y el mínimo cuando el puente no tiene carga (ver Figura 19). Por lo tanto:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 48.955 \text{ MPa} \text{ y } \sigma_{m\acute{i}n} = 0 \text{ MPa}$$

Ahora obtenemos los esfuerzos medio y amplitud con las ecuaciones (72) y (73):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{48.955 + 0}{2} = 24.478 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right| = \left| \frac{48.955 - 0}{2} \right| = 24.478 \text{ MPa}$$

Luego, con la ecuación (74) obtenemos el factor de diseño (seguridad):

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = \frac{24.478}{134} + \frac{24.478}{400}$$

$$n = 4.101$$

Como $n \geq 1$ y $\sigma_a \ll S_e$, la viga se encuentra en la zona de vida infinita y no es necesario calcular el número finito de ciclos donde terminaría su vida útil.

Anexo 3: Resultados de simulación de viga principal

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos de la simulación de la viga principal del puente grúa de 9 toneladas obtenidos con el programa Autodesk Inventor.

Objetivo general y configuración

Tipo de simulación	Análisis estático
Fecha de la última modificación	02/04/2025, 21:18
Estado de modelo	[Principal]
Vista de diseño	Por defecto
Posicional	[Principal]

Material(es)

Nombre	Acero ASTM A36	
General	Densidad de masa	7.850 g/cm ³
	Límite de elasticidad	248.225 MPa
	Resistencia máxima a tracción	399.900 MPa
Tensión	Módulo de Young	199.959 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.300 ul
Nombre(s) de pieza	- 9600	

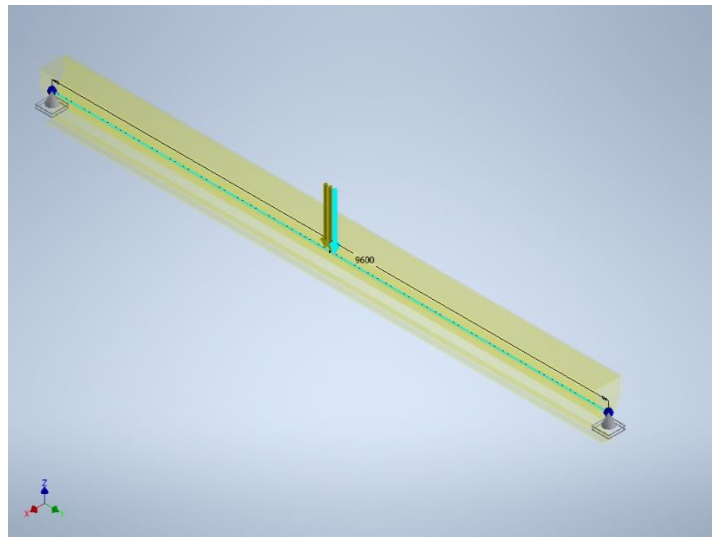
Sección o secciones transversales

Propiedades de geometría	Área de sección (a)	30079.934 mm ²
	Anchura de sección	450.000 mm
	Altura de sección	878.720 mm
	Centroide de sección (x)	225.000 mm
	Centroide de sección (y)	438.457 mm
Propiedades mecánicas	Momento de inercia (I _x)	2.565754086851E+09 mm ⁴
	Momento de inercia (I _y)	415292225.140 mm ⁴
	Módulo de rigidez de torsión (J)	607172353.797 mm ⁴
	Módulo de sección (W _x)	5827781.754 mm ³
	Módulo de sección (W _y)	1845743.223 mm ³
	Módulo de sección de torsión (W _z)	0.000 mm ³
	Área de esfuerzo cortante reducida (A _x)	3120.946 mm ²
	Área de esfuerzo cortante reducida (A _y)	9493.505 mm ²
Nombre(s) de pieza	Personalizado	

Condiciones de funcionamiento

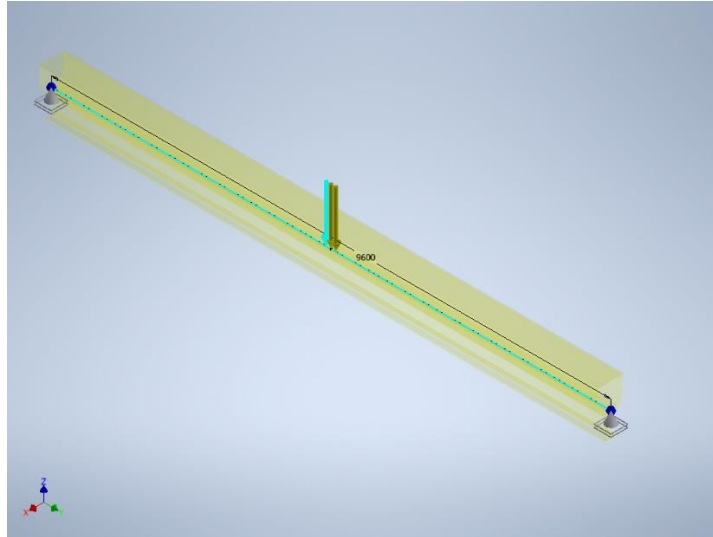
— Fuerza:1

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	54335.000 N
Sistema de coordenadas de vigas	No
Ángulo de plano	0.00 deg
Ángulo en plano	180.00 deg
Fx	0.000 N
Fy	0.000 N
Fz	-54335.000 N
Desfase	4720.000 mm



— Fuerza:2

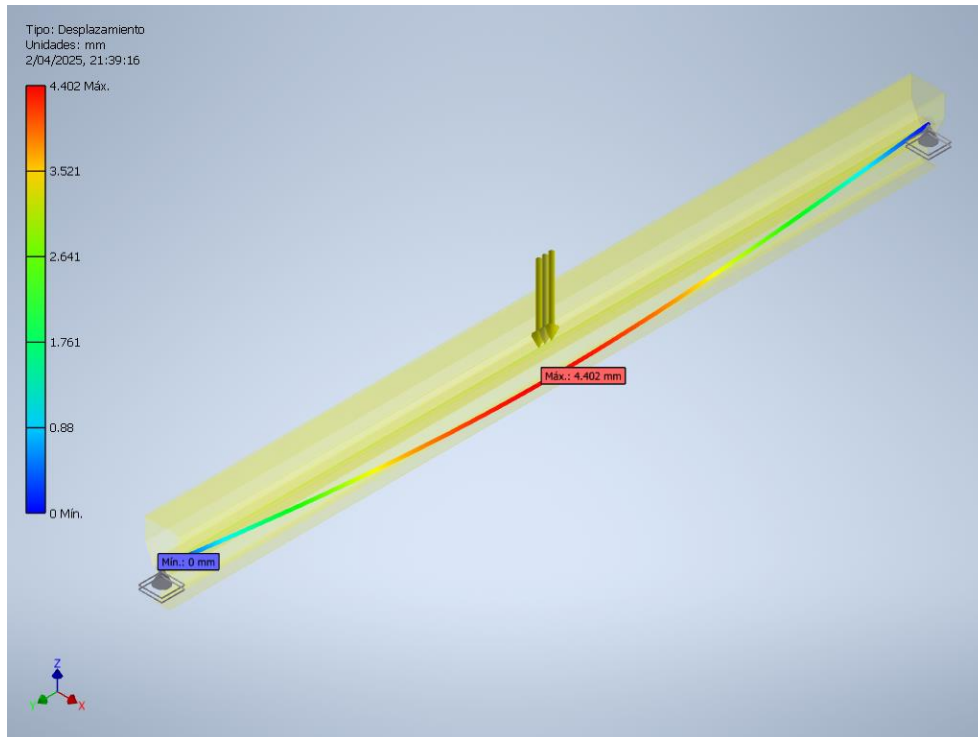
Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	54335.000 N
Sistema de coordenadas de vigas	No
Ángulo de plano	0.00 deg
Ángulo en plano	180.00 deg
Fx	0.000 N
Fy	0.000 N
Fz	-54335.000 N
Desfase	4880.000 mm



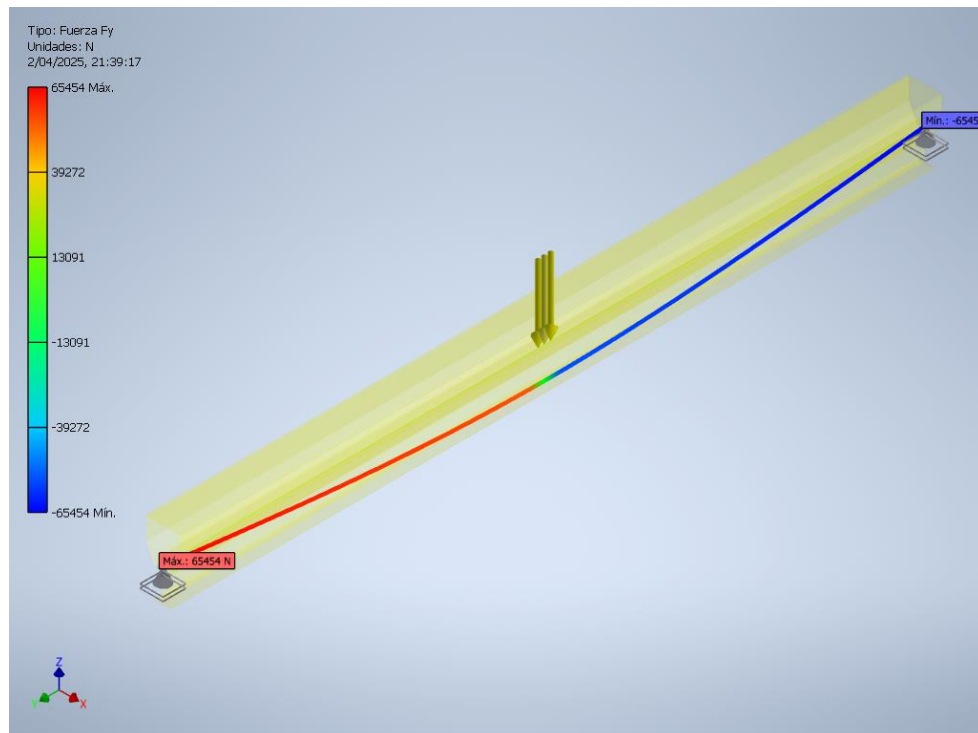
Resultados

Nombre		Mínimo	Máximo
Desplazamiento		0.000 mm	4.402 mm
Fuerzas	Fx	0.000 N	0.000 N
	Fy	-65453.771 N	65453.771 N
	Fz	0.000 N	0.000 N
Momentos	Mx	-0.000 N mm	283146250.214 N mm
	My	0.000 N mm	0.000 N mm
	Mz	0.000 N mm	0.000 N mm
Tensiones normales	Smax	0.000 MPa	48.386 MPa
	Smin	-48.568 MPa	-0.000 MPa
	Smax(Mx)	0.000 MPa	48.386 MPa
	Smin(Mx)	-48.586 MPa	-0.000 MPa
	Smax(My)	0.000 MPa	0.000 MPa
	Smin(My)	0.000 MPa	0.000 MPa
Tensión de corte	Saxial	0.000 MPa	0.000 MPa
	Tx	0.000 MPa	0.000 MPa
Tensiones de torsión	Ty	-6.895 MPa	6.895 MPa
	T	0.000 MPa	0.000 MPa

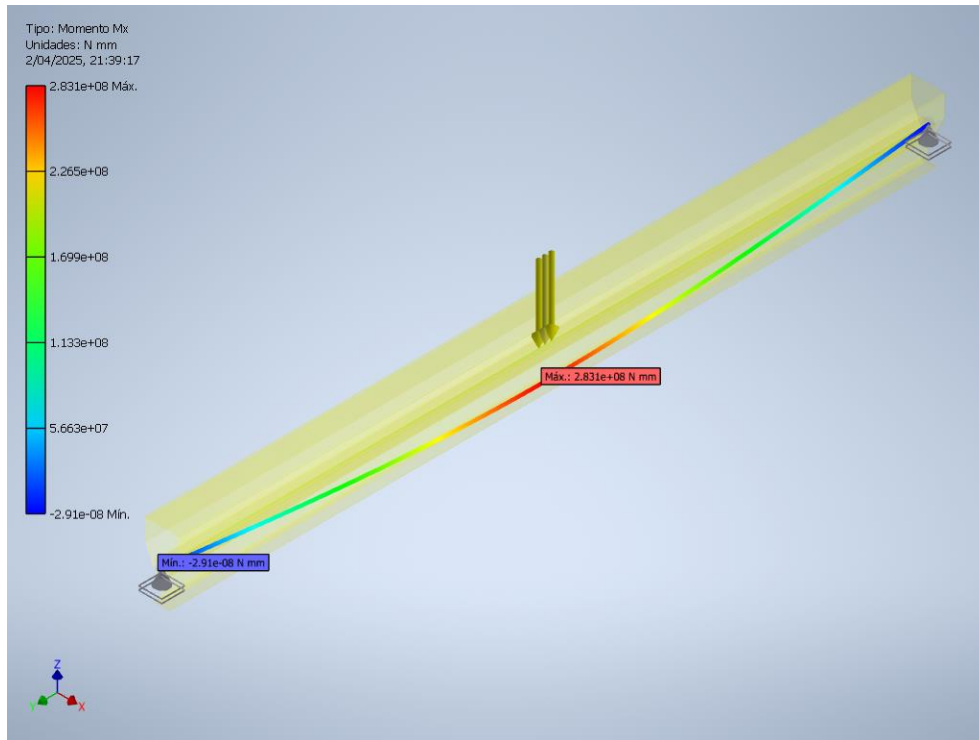
— Desplazamiento



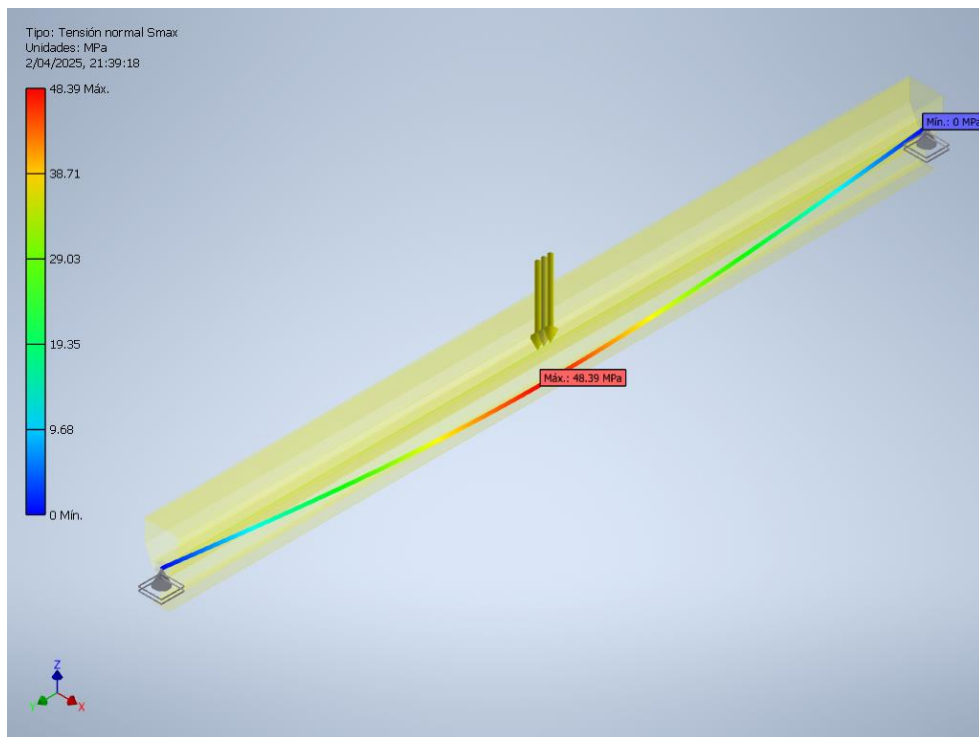
— Fuerza Cortante



— Momento máximo



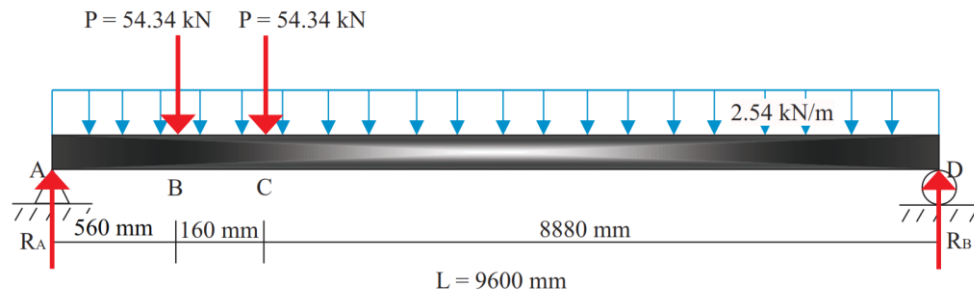
— Esfuerzo máximo



Anexo 4: Cálculo de viga testera

Paso 1: Análisis estático de cargas

Se procede con un nuevo análisis estático de la viga principal considerando la carga lo más cercana posible de la viga testera según el esquema completo:



$$\sum M_A = 0$$

$$54.34kN(0.56m) + 2.54 \frac{kN}{m} (9.6m)(4.8m) + 54.34kN(0.72m) - R_B(9.6m) = 0$$

$$R_B = 19.44 kN$$

$$\sum F_y = 0$$

$$-54.34kN - 2.54 \frac{kN}{m} (9.6m) - 54.34kN + 19.44kN + R_A = 0$$

$$R_A = 113.627 kN$$

Por lo tanto, se elige la reacción en “A” para el diseño:

$$P = 113.627 kN$$

Paso 2: Características de la sección:

El perfil de la viga testera se elige de acuerdo a los estándares convencionales y comerciales: HSS 12x8x1/4”. Se obtienen las propiedades de la sección:

Momento de inercia: $I_s = 7.659 \times 10^{-5} m^4$

Área de sección: $A_s = 0.00618647 m^2$

Se calcula la masa lineal real del perfil de viga:

$$m_{lr} = \rho_a A_s$$

$$m_{lr} = \left(7850 \frac{kg}{m^3}\right) (0.00618647 m^2) = 48.564 \frac{kg}{m} = 0.476 \frac{kN}{m}$$

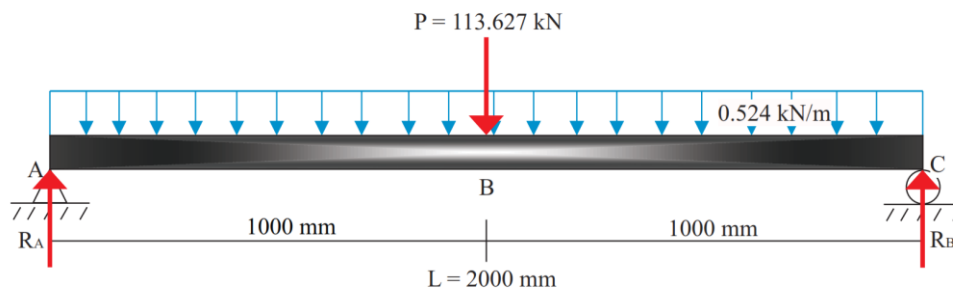
Se multiplica por el factor de carga muerta y obtenemos la masa lineal de diseño:

$$m_l = m_{lr}(DLF_B)$$

$$m_l = \left(0.476 \frac{kN}{m}\right) (1.1) = 0.524 \frac{kN}{m}$$

Paso 3: Análisis estático

Se procede con el cálculo estático mediante sumatoria de momentos en el punto A y debido a la simetría ambas reacciones tendrán el mismo valor, según el esquema completo:



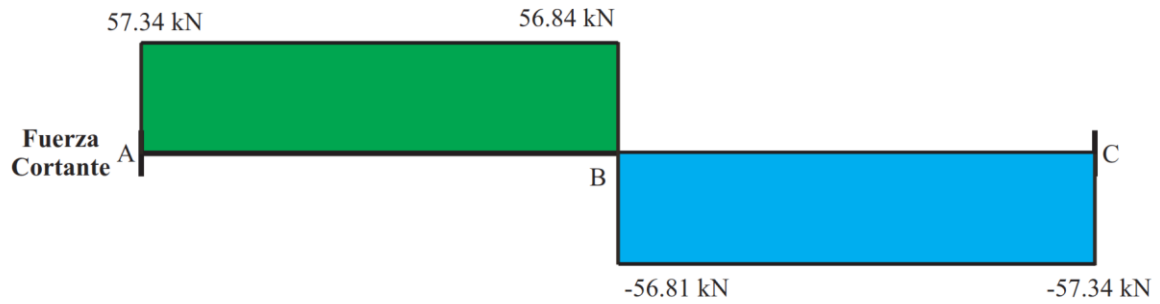
$$\sum M_A = 0$$

$$113.627kN(1m) + 0.524 \frac{kN}{m} (2m)(1m) - R_B(2m) = 0$$

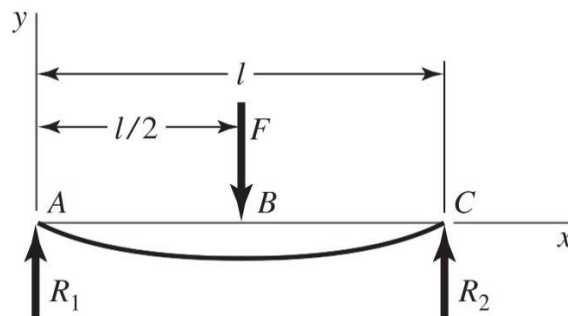
$$R_B = R_A = 57.34 kN$$

Paso 4: Cálculo de diagramas de fuerza cortante y momento flector

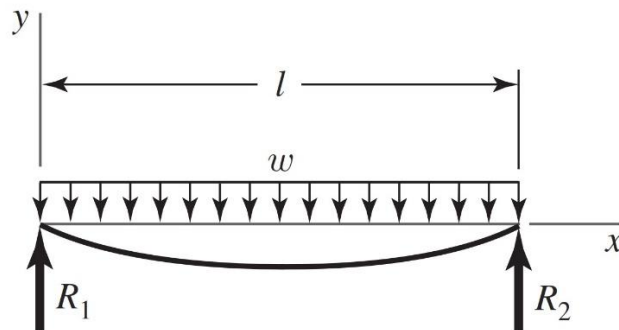
Según el cálculo del punto anterior (análisis estático) se gráfica el diagrama de fuerza cortante.



Los momentos se calculan utilizando el método de superposición. Para ello se utilizan las figuras 9 y 11 y las ecuaciones (21) y (27), respectivamente:



$$M_F = \frac{Fl}{4}$$



$$M_W = \frac{wl^2}{8}$$

Para calcular el momento flector máximo se suman ambos valores:

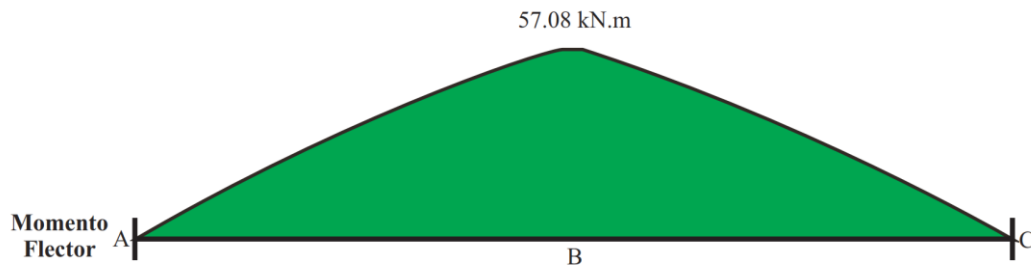
$$M_{max} = M_F + M_W$$

$$M_{max} = \frac{Fl}{4} + \frac{wl^2}{8}$$

$$M_{max} = \frac{113.627 \text{ kN}(2\text{m})}{4} + \frac{0.524 \frac{\text{kN}}{\text{m}} (2\text{m})^2}{8}$$

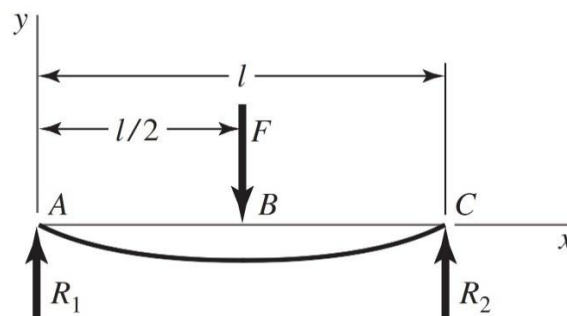
$$M_{max} = 57.08 \text{ kN.m}$$

El diagrama de momento flector queda como la figura siguiente:



Paso 5: Cálculo de la deflexión de la viga

La deflexión se calcula utilizando el método de superposición. Para ello primero se utiliza la figura 9 y la ecuación (22):

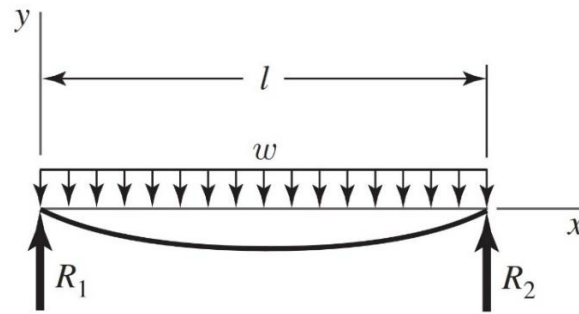


$$y_F = -\frac{Fl^3}{48EI}$$

$$y_F = -\frac{113.627 \text{ kN}(2\text{m})^3}{48(200\text{GPa})(7.659 \times 10^{-5} \text{m}^4)}$$

$$y_F = -0.001236 \text{ m} = -1.236 \text{ mm}$$

Luego se utiliza la figura 11 y la ecuación (28):



$$y_W = -\frac{5wl^4}{384EI}$$

$$y_W = -\frac{5(0.524 \frac{kN}{m})(2m)^4}{384(200GPa)(7.659 \times 10^{-5}m^4)}$$

$$y_W = -0.000007 \text{ m} = -0.007 \text{ mm}$$

La deflexión se obtiene sumando ambos valores:

$$y_v = y_F + y_W$$

$$y_v = -1.236 \text{ mm} - 0.007 \text{ mm}$$

$$y_v = -1.243 \text{ mm}$$

Se utiliza la ecuación (18) y los datos iniciales para calcular la deflexión máxima:

$$y_{max} = \frac{L}{600}$$

$$y_{max} = \frac{2 \text{ m}}{600} = 0.00333 \text{ m} = 3.333 \text{ mm}$$

Tiene que cumplirse que la deflexión de la viga sea menor que la deflexión máxima (consideramos valores absolutos para la comparación):

$$y_v < y_{max}$$

$$1.243 \text{ mm} < 3.333 \text{ mm} \quad \text{(Correcto)}$$

Paso 6: Cálculo del esfuerzo máximo de flexión

El esfuerzo de flexión máxima se calcula utilizando la ecuación (38). El momento se obtiene del paso 4 y los datos de la sección del paso 2:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}c}{I_x}$$

$$\sigma_{max} = \frac{57.08 \text{ kN.m}(0.1524\text{m})}{7.659 \times 10^{-5} \text{m}^4}$$

$$\sigma_{max} = 113.574 \text{ MPa}$$

Tiene que cumplirse que el esfuerzo máximo sea menor que el esfuerzo permisible en el caso 1 de la CMAA:

$$\sigma_{max} < 0.8\sigma_y$$

$$113.574 \text{ MPa} < 0.8(250\text{MPa})$$

$$113.574 \text{ MPa} < 200\text{MPa} \quad (\text{Correcto})$$

Paso 7: Cálculo del factor de seguridad

El factor de seguridad se obtiene con la relación del esfuerzo máximo con el esfuerzo permisible (tiene que ser superior al rango 1.3-1.5), según la ecuación (39):

$$n = \frac{0.8\sigma_y}{\sigma_{max}}$$

$$n = \frac{200\text{MPa}}{113.574\text{MPa}}$$

$$n = 1.761 \quad (\text{Correcto})$$

Paso 8: Comprobación de pandeo local

Se selecciona de las tablas AISC las características del perfil (ver Anexo 17):

Se elige el perfil: HSS 12x8x1/4"

Su momento de inercia es: $I_s = 184 \text{ in}^4$

Sus relaciones ancho espesor: $\frac{b}{t} = 31.3$ y $\frac{h}{t} = 48.5$

Se comprueba que la sección sea compacta con la ecuación (46). Para ello utilizamos primero la ecuación (49):

$$\frac{b}{t} < 1.23 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = \lambda_p$$

$$31.3 < 1.23 \sqrt{\frac{200GPa}{250MPa}} = \lambda_p$$

$$31.3 < 34.79 \quad \text{(Cumple)}$$

Luego utilizamos la ecuación (50):

$$\frac{h}{t} < 2.42 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = \lambda_p$$

$$48.5 < 2.42 \sqrt{\frac{200GPa}{250MPa}} = \lambda_p$$

$$48.5 < 68.448 \quad \text{(Cumple)}$$

Por lo tanto, la sección es compacta y no sufre pandeo local. Pero si podría sufrir pandeo lateral torsionante.

Paso 9: Comprobación de pandeo lateral torsionante

Se toman los demás datos de la sección HSS 12x8x1/4" de las tablas y teoría de la AISC (ver Anexo 15):

$$\text{Radio de giro en y:} \quad r_y = 3.32 \text{ in}$$

$$\text{Largo de la viga (2 m):} \quad L_b = 78.74 \text{ in}$$

Se calcula la longitud del límite plástico con la ecuación (51):

$$L_p = 1.76 r_y \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}$$

$$L_p = 1.76(3.32 \text{ in}) \sqrt{\frac{200GPa}{250MPa}}$$

$$L_p = 165.844 \text{ in}$$

Como $L_b \leq L_p$ no se presenta pandeo lateral torsional.

Paso 10: Límite de resistencia a la fatiga

En primer lugar, identificamos la resistencia (esfuerzo) última del material:

$$S_u = 400 \text{ MPa} \leq 1\,400 \text{ MPa}$$

Así, con esa condición y de la ecuación (70) obtenemos el límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica:

$$S'_e = 0.5S_u = 0.5 \times 400 \text{ MPa} = 200 \text{ MPa}$$

Luego identificamos el factor k_f que varía entre 0.24 y 0.90. Tomamos el promedio:

$$k_f = 0.67$$

Con el factor hallado encontramos el límite de resistencia modificado según ecuación (71):

$$S_e = k_f S'_e = 0.67 \times 200 \text{ MPa} = 134 \text{ MPa}$$

Identificamos el esfuerzo máximo y el esfuerzo mínimo. Como es un puente grúa el esfuerzo máximo se produce cuando se aplica la carga máxima y el mínimo cuando el puente no tiene carga (ver Figura 19). Por lo tanto:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 113.574 \text{ MPa} \text{ y } \sigma_{m\acute{i}n} = 0 \text{ MPa}$$

Ahora obtenemos los esfuerzos medio y amplitud con las ecuaciones (72) y (73):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{113.574 + 0}{2} = 56.787 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right| = \left| \frac{113.574 - 0}{2} \right| = 56.787 \text{ MPa}$$

Luego, con la ecuación (74) obtenemos el factor de diseño (seguridad):

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = \frac{56.787}{134} + \frac{56.787}{400}$$

$$n = 1.768$$

Como $n \geq 1$ y $\sigma_a \ll S_e$, la viga se encuentra en la zona de vida infinita y no es necesario calcular el número finito de ciclos donde terminaría su vida útil.

Anexo 5: Resultados de simulación de viga testera

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos de la simulación de la viga testera del puente grúa de 9 toneladas obtenidos con el programa Autodesk Inventor.

Objetivo general y configuración

Tipo de simulación	Análisis estático
Fecha de la última modificación	02/04/2025, 22:04
Estado de modelo	[Principal]
Vista de diseño	Por defecto
Posicional	[Principal]

Material(es)

Nombre	Acero ASTM A36	
General	Densidad de masa	7.850 g/cm ³
	Límite de elasticidad	248.225 MPa
	Resistencia máxima a tracción	399.900 MPa
Tensión	Módulo de Young	199.959 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.300 ul
Nombre(s) de pieza	AISC 12 x 8 x 1/4 - 78.74	

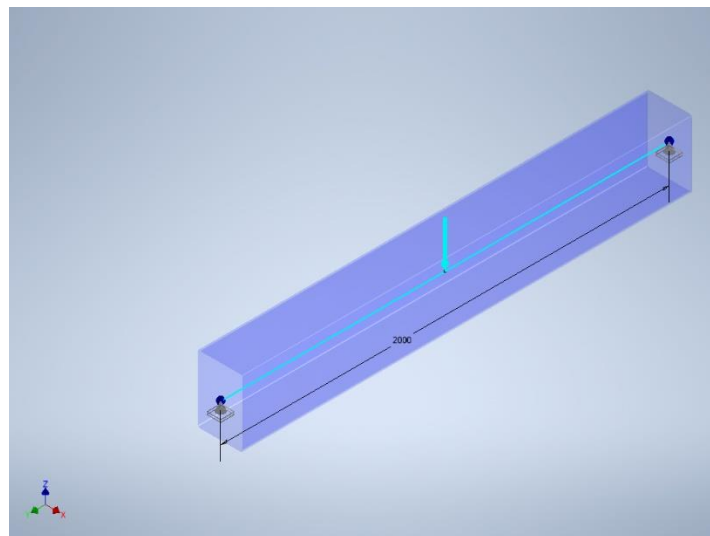
Sección o secciones transversales

Propiedades de geometría	Área de sección (a)	6186.471 mm²
	Anchura de sección	203.200 mm
	Altura de sección	304.800 mm
	Centroide de sección (x)	101.600 mm
	Centroide de sección (y)	152.400 mm
Propiedades mecánicas	Momento de inercia (I _x)	81477366.877 mm ⁴
	Momento de inercia (I _y)	43782945.943 mm ⁴
	Módulo de rigidez de torsión (J)	76586269.720 mm ⁴
	Módulo de sección (W _x)	534628.392 mm ³
	Módulo de sección (W _y)	430934.507 mm ³
	Módulo de sección de torsión (W _z)	43198.588 mm ³
	Área de esfuerzo cortante reducida (A _x)	2289.212 mm ²
	Área de esfuerzo cortante reducida (A _y)	3232.151 mm ²
Nombre(s) de pieza	AISC 12 x 8 x 1/4 - 78.74	

Condiciones de funcionamiento

— Fuerza:1

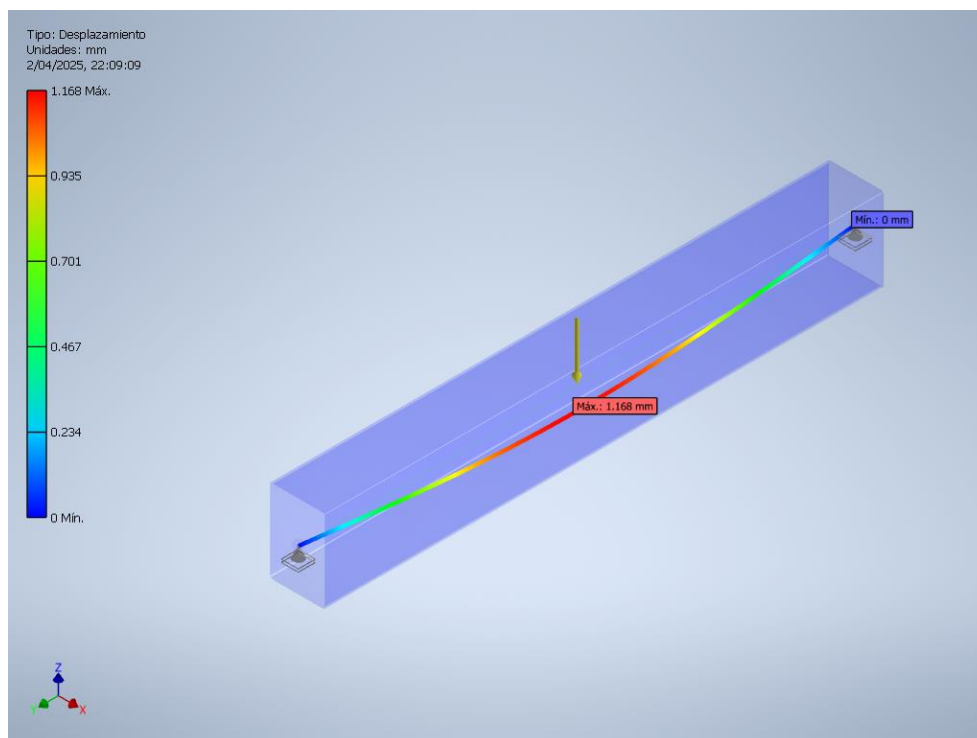
Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	113627.000 N
Sistema de coordenadas de vigas	No
Ángulo de plano	0.00 deg
Ángulo en plano	180.00 deg
Fx	0.000 N
Fy	0.000 N
Fz	-113627.000 N
Desfase	1000.000 mm



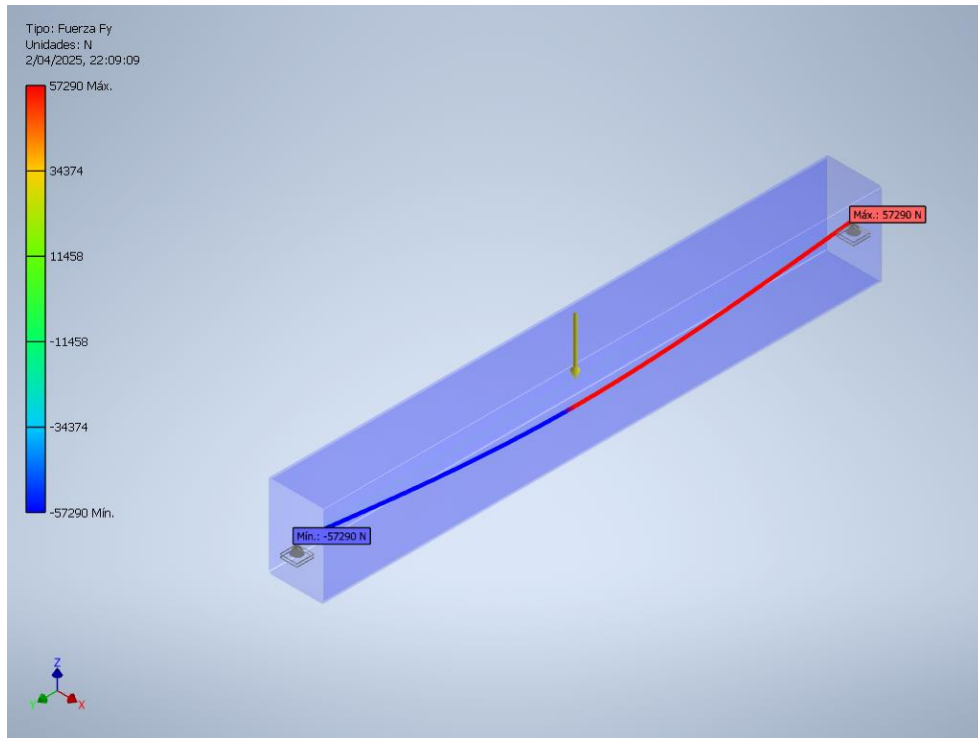
Resultados

Nombre		Mínimo	Máximo
Desplazamiento		0.000 mm	1.168 mm
Fuerzas	Fx	-0.000 N	0.000 N
	Fy	-57289.911 N	57289.911 N
	Fz	-0.000 N	-0.000 N
Momentos	Mx	-57051705.411 N mm	0.000 N mm
	My	-0.000 N mm	-0.000 N mm
	Mz	-0.000 N mm	-0.000 N mm
Tensiones normales	Smax	0.000 MPa	106.713 MPa
	Smin	-106.713 MPa	-0.000 MPa
	Smax(Mx)	0.000 MPa	106.713 MPa
	Smin(Mx)	-106.713 MPa	0.000 MPa
	Smax(My)	0.000 MPa	0.000 MPa
	Smin(My)	-0.000 MPa	-0.000 MPa
	Saxial	0.000 MPa	0.000 MPa
	Tensión de corte	Tx	-0.000 MPa
	Ty	-17.725 MPa	17.725 MPa
Tensiones de torsión	T	0.000 MPa	0.000 MPa

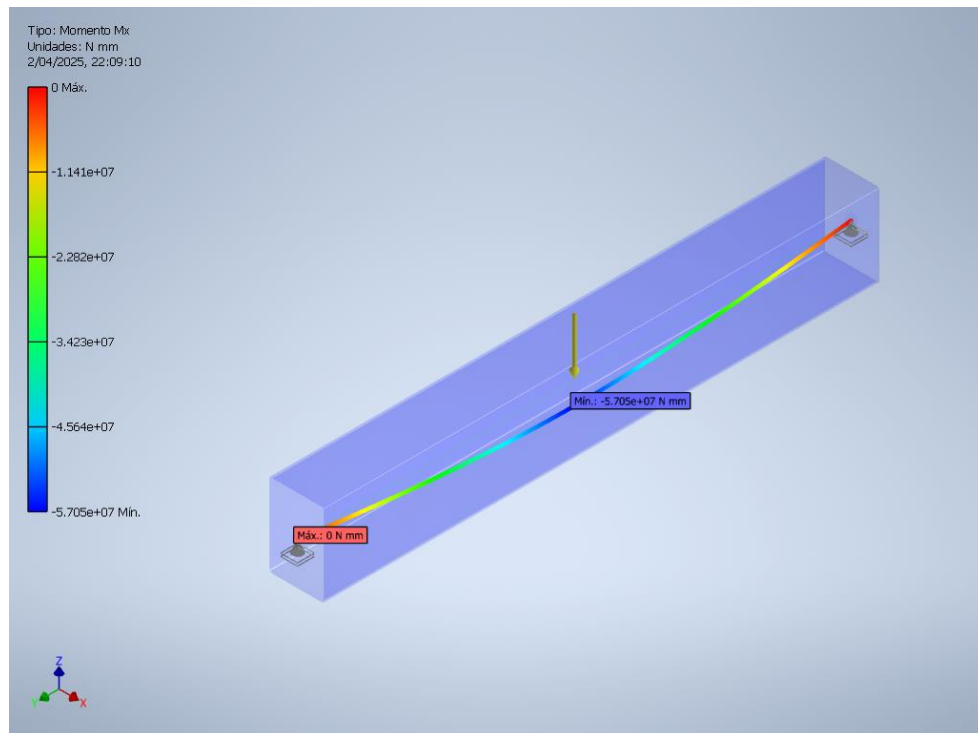
— Desplazamiento



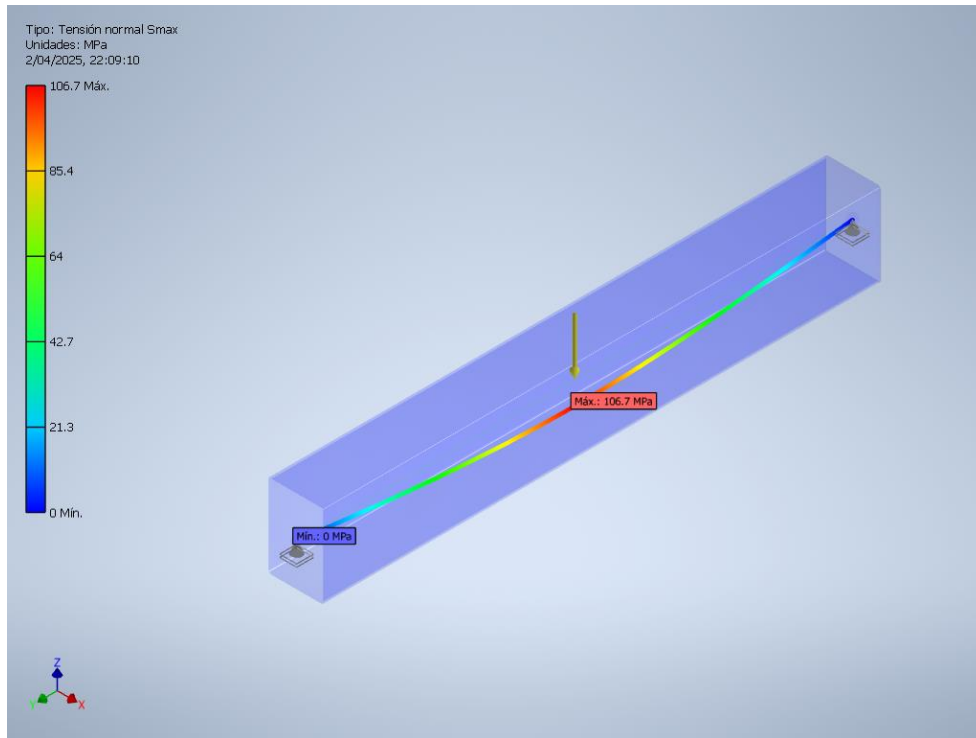
— Fuerza Cortante



— Momento máximo



— Esfuerzo máximo



Anexo 6: Cálculo de viga carrilera

Paso 1: Datos del perfil y cargas

El perfil de la viga carrilera elegido es el W14x74 lb/ft. Se toman algunos datos necesarios de las tablas de la AISC y la carga del Anexo 4 paso 3:

Momento de inercia en "x": $I_x = 795 \text{ in}^4 = 3.309 \times 10^{-4} \text{ m}^4$

Distancia del borde al eje neutro: $c = 7.1 \text{ in} = 0.18 \text{ m}$

Carga: $P = 57.34 \text{ kN}$

Se verifica la masa lineal del perfil de la viga:

$$m_{lr} = 74 \frac{\text{lb}}{\text{ft}} = 110.124 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 1.08 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

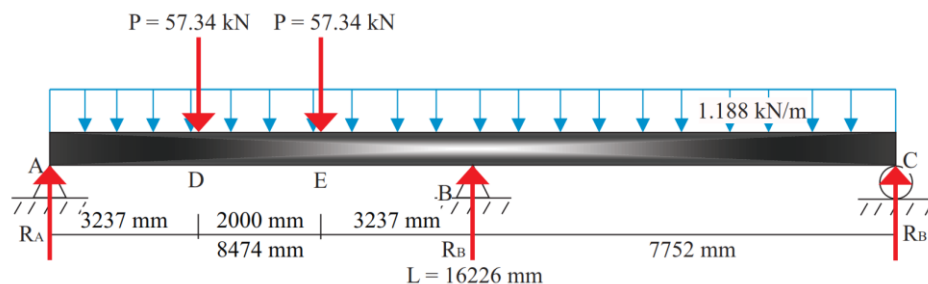
Se multiplica por el factor de carga muerta y obtenemos la masa lineal de diseño:

$$m_l = m_{lr}(DLF_B)$$

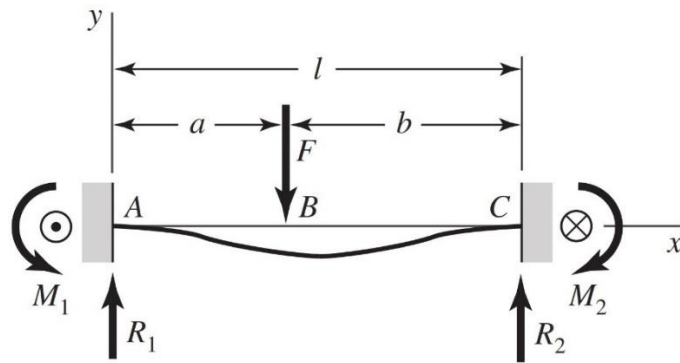
$$m_l = \left(1.08 \frac{\text{kN}}{\text{m}}\right)(1.1) = 1.188 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Paso 2: Cálculo de reacciones y momentos en tramos:

La viga carrilera se considera una viga hiperestática y continua. Se utiliza el método de superposición. Para ello se analiza la sección tramo por tramo teniendo en cuenta el esquema general:



Para el análisis se utilizarán las figuras 12 y 13 y las ecuaciones de la (29) a la (32), (35) y (36):

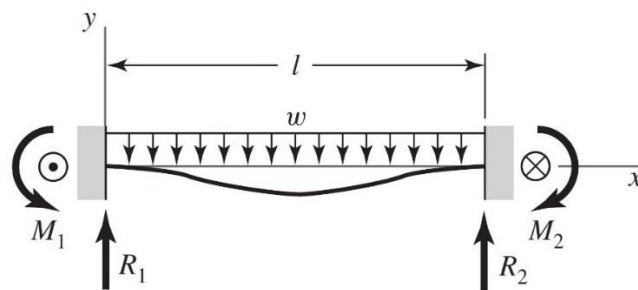


$$R_1 = \frac{Fb^2}{l^3}(3a + b)$$

$$R_2 = \frac{Fa^2}{l^3}(3b + a)$$

$$M_1 = \frac{Fab^2}{l^2}$$

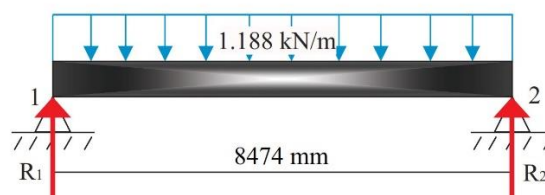
$$M_2 = \frac{Fa^2b}{l^2}$$

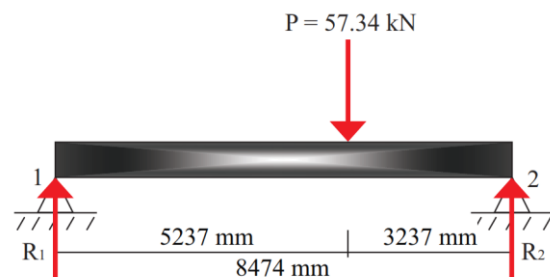
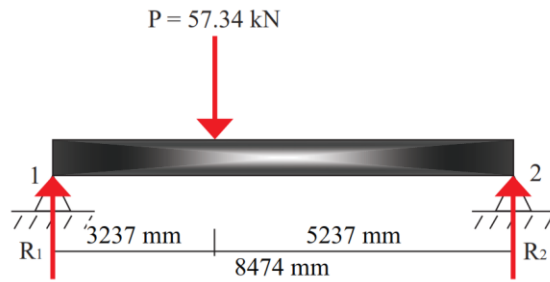


$$R_1 = R_2 = \frac{wl}{2}$$

$$M_1 = M_2 = \frac{wl^2}{12}$$

Se analiza el tramo AB, para ello se separan todos los casos de carga:





Se calculan las reacciones en el tramo AB sumando los resultados para cada caso:

$$R_1 = \frac{wl}{2} + \frac{F_1 b_1^2}{l^3} (3a_1 + b_1) + \frac{F_2 b_2^2}{l^3} (3a_2 + b_2)$$

$$R_1 = \frac{1.188 \frac{kN}{m} (8.474m)}{2} + \frac{57.34kN(5.237m)^2}{(8.474m)^3} [3(3.237m) + 5.237m] \\ + \frac{57.34kN(3.237m)^2}{(8.474m)^3} [3(5.237m) + 3.237m]$$

$$R_1 = 62.374 \text{ kN}$$

$$R_2 = \frac{wl}{2} + \frac{F_1 a_1^2}{l^3} (3b_1 + a_1) + \frac{F_2 a_2^2}{l^3} (3b_2 + a_2)$$

$$R_2 = \frac{1.188 \frac{kN}{m} (8.474m)}{2} + \frac{57.34kN(3.237m)^2}{(8.474m)^3} [3(5.237m) + 3.237m] \\ + \frac{57.34kN(5.237m)^2}{(8.474m)^3} [3(3.237m) + 5.237m]$$

$$R_2 = 62.374 \text{ kN}$$

Se calculan los momentos en el tramo AB sumando los resultados para cada caso:

$$M_1 = \frac{wl^2}{12} + \frac{F_1 a_1 b_1^2}{l^2} + \frac{F_2 a_2 b_2^2}{l^2}$$

$$M_1 = \frac{1.188 \frac{kN}{m} (8.474m)^2}{12} + \frac{57.34kN(3.237m)(5.237m)^2}{(8.474m)^2} + \frac{57.34kN(5.237m)(3.237m)^2}{(8.474m)^2}$$

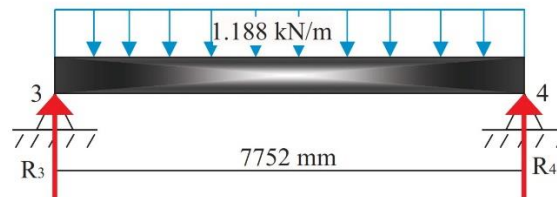
$$M_1 = 121.818 \text{ kN.m}$$

$$M_2 = \frac{wl^2}{12} + \frac{F_1 b_1 a_1^2}{l^2} + \frac{F_2 b_2 a_2^2}{l^2}$$

$$M_2 = \frac{1.188 \frac{kN}{m} (8.474m)^2}{12} + \frac{57.34kN(5.237m)(3.237m)^2}{(8.474m)^2} + \frac{57.34kN(3.237m)(5.237m)^2}{(8.474m)^2}$$

$$M_2 = 121.8189 \text{ kN.m}$$

Se analiza el tramo BC, donde solo existe un caso de carga:



Se calculan las reacciones en el tramo BC:

$$R_3 = R_4 = \frac{wl}{2}$$

$$R_3 = R_4 = \frac{1.188 \frac{kN}{m} (7.752m)}{2}$$

$$R_3 = R_4 = 4.604 \text{ kN}$$

Se calculan los momentos en el tramo BC:

$$M_3 = M_4 = \frac{wl^2}{12}$$

$$M_3 = M_4 = \frac{1.188 \frac{kN}{m} (7.752m)^2}{12}$$

$$M_3 = M_4 = 5.949 \text{ kN.m}$$

Paso 3: Cálculo de reacciones y momentos en empotramientos:

Se calculan las reacciones y momentos según los resultados del punto anterior:

Reacciones: $R_A = R_1 = 62.374 \text{ kN}$

$$R_B = R_2 + R_3 = 62.374 \text{ kN} + 4.604 \text{ kN} = 66.978 \text{ kN}$$

$$R_C = R_4 = 4.604 \text{ kN}$$

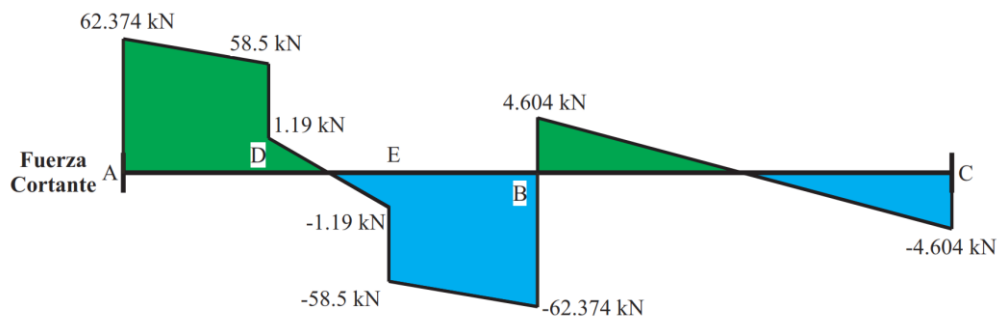
Momentos: $M_A = M_1 = 121.818 \text{ kN.m}$

$$M_B = M_2 - M_3 = 121.818 \text{ kN.m} - 5.949 \text{ kN.m} = 115.859 \text{ kN.m}$$

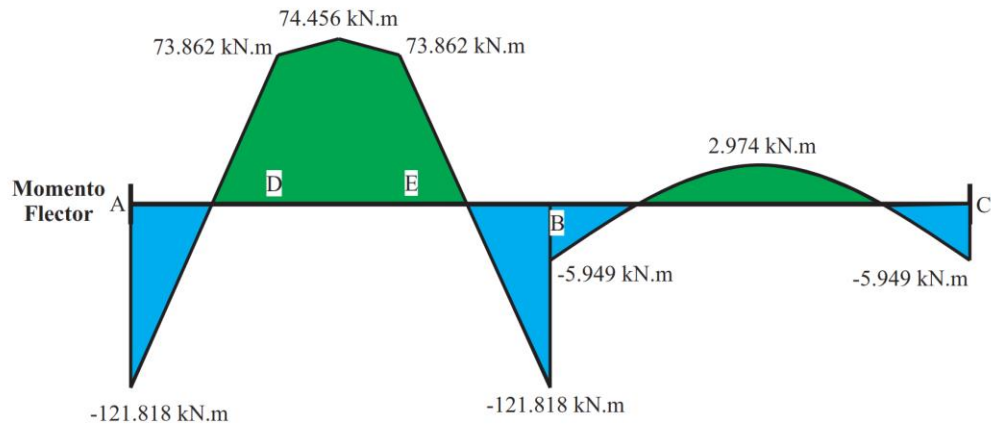
$$M_C = M_4 = 5.949 \text{ kN.m}$$

Paso 4: Cálculo de diagramas de fuerza cortante y momento flector

Según el cálculo del punto anterior (análisis estático) se gráfica el diagrama de fuerza cortante:

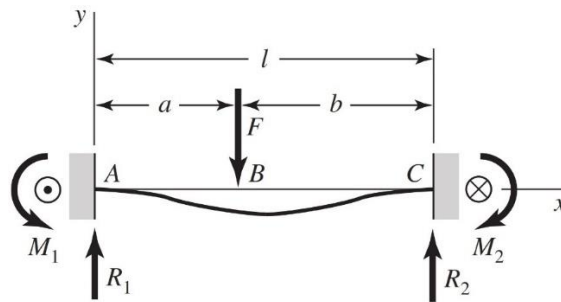


Según el cálculo del punto anterior, el diagrama de momento flector queda como la figura siguiente:



Paso 5: Cálculo de la deflexión de la viga

La deflexión se calcula utilizando el método de superposición. Para ello primero se utiliza la figura 12 y la ecuación (33): (como hay dos casos de cargas puntuales iguales entonces $y_{F1} = y_{F2}$)

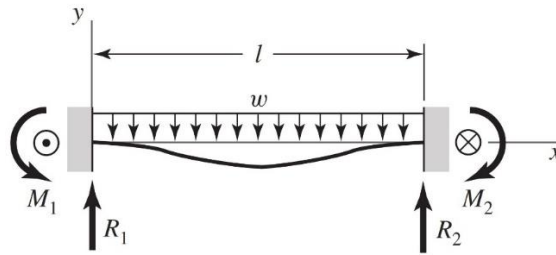


$$y_{F1} = \frac{Fb^2x^2}{6EI l^3} [x(3a + b) - 3al]$$

$$y_{F1} = \frac{57.34kN(5.237m)^2(3.237m)^2}{6(200GPa)(3.309 \times 10^{-4}m^4)(8.774m)^3} \{ (3.237m)[3(3.237m) + 5.237m] - 3(3.237m)(8.774m) \}$$

$$y_{F1} = -0.002215 \text{ m} = -2.2215 \text{ mm}$$

Luego se utiliza la figura 13 y la ecuación (37):



$$y_W = -\frac{wl^4}{384EI}$$

$$y_W = -\frac{1.188 \frac{kN}{m} (8.774m)^4}{384(200GPa)(3.309 \times 10^{-4}m^4)}$$

$$y_W = -0.000241m = -0.241mm$$

La deflexión se obtiene sumando todos los valores:

$$y_v = y_{F1} + y_{F2} + y_W$$

$$y_v = -2.215mm + -2.215mm + -0.241mm$$

$$y_v = -4.671 mm$$

Se utiliza la ecuación (18) y los datos iniciales para calcular la deflexión máxima:

$$y_{max} = \frac{L}{600}$$

$$y_{max} = \frac{8.474 m}{600} = 0.014123 m = 14.123 mm$$

Tiene que cumplirse que la deflexión de la viga sea menor que la deflexión máxima (consideramos valores absolutos para la comparación):

$$y_v < y_{max}$$

$$4.671 mm < 14.123 mm \quad (\text{Correcto})$$

Paso 6: Cálculo del esfuerzo máximo de flexión

El esfuerzo de flexión máxima se calcula utilizando la ecuación (38). El momento se obtiene del paso 3 y los datos de la sección del paso 1:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}c}{I_x}$$

$$\sigma_{max} = \frac{121.818 \text{ kN} \cdot \text{m}(0.18\text{m})}{3.309 \times 10^{-4} \text{ m}^4}$$

$$\sigma_{max} = 66.39 \text{ MPa}$$

Tiene que cumplirse que el esfuerzo máximo sea menor que el esfuerzo permisible en el caso 1 de la CMAA:

$$\sigma_{max} < 0.8\sigma_y$$

$$66.39 \text{ MPa} < 0.8(250\text{MPa})$$

$$66.39 \text{ MPa} < 200\text{MPa} \quad \text{(Correcto)}$$

Paso 7: Cálculo del factor de seguridad

El factor de seguridad se obtiene con la relación del esfuerzo máximo con el esfuerzo permisible (tiene que ser superior al rango 1.3-1.5), según la ecuación (39):

$$n = \frac{0.8\sigma_y}{\sigma_{max}}$$

$$n = \frac{200\text{MPa}}{66.339 \text{ MPa}}$$

$$n = 3.01 \quad \text{(Correcto)}$$

Paso 8: Comprobación de pandeo local

Se elige un perfil con momento de inercia similar a la sección usada. Se selecciona de las tablas AISC (ver Anexo 16):

Se elige el perfil: W14x74 lb/ft

Su momento de inercia es: $I_s = 795 \text{ in}^4$

Sus relaciones ancho espesor: $\frac{b_f}{2t_f} = 6.41$ y $\frac{h}{t_w} = 25.4$

Se comprueba que la sección sea compacta con la ecuación (46). Para ello utilizamos primero la ecuación (47):

$$\frac{b_f}{2t_f} < 0.38 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = \lambda_p$$

$$6.41 < 0.38 \sqrt{\frac{200GPa}{250MPa}} = \lambda_p$$

$$6.41 < 10.748 \quad \text{(Cumple)}$$

Luego utilizamos la ecuación (48):

$$\frac{h}{t_w} < 3.76 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} = \lambda_p$$

$$25.4 < 3.76 \sqrt{\frac{200GPa}{250MPa}} = \lambda_p$$

$$25.4 < 106.349 \quad \text{(Cumple)}$$

Por lo tanto, la sección es compacta y no sufre pandeo local. Pero si podría sufrir pandeo lateral torsionante.

Paso 9: Comprobación de pandeo lateral torsionante

Se toman los demás datos de la sección W14x74 lb/ft de las tablas y teoría de la AISC (ver Anexo 16):

$$I_y = 134 \text{ in}^4 \quad S_x = 112 \text{ in}^3 \quad h_o = 13.4 \text{ in} \quad C_w = 5990 \text{ in}^6$$

$$r_y = 2.41 \text{ in} \quad Z_x = 126 \text{ in}^3 \quad J = 3.87 \text{ in}^4$$

Largo de la viga (8.474 m):

$$L_b = 333.62 \text{ in}$$

Coefficiente “c” para perfiles W:

$$c = 1$$

Coefficiente para vigas sin carga transversal:

$$C_b = 1$$

Se calcula la longitud del límite plástico con la ecuación (51):

$$L_p = 1.76r_y \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}}$$

$$L_p = 1.76(2.41 \text{ in}) \sqrt{\frac{200\text{GPa}}{250\text{MPa}}}$$

$$L_p = 123.883 \text{ in}$$

Se calcula la longitud del límite elástico con la ecuación (52), previamente se calcula el valor de “ r_{ts} ” con la ecuación (53):

$$r_{ts} = \sqrt{\frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x}}$$

$$r_{ts} = \sqrt{\frac{\sqrt{(134 \text{ in}^4)(5990 \text{ in}^6)}}{112 \text{ in}^3}}$$

$$r_{ts} = 2.828 \text{ in}$$

Luego se aplica en la ecuación (52):

$$L_r = 1.95r_{ts} \frac{E}{0.7\sigma_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{S_x h_o}\right)^2 + 6.76\left(\frac{0.7\sigma_y}{E}\right)^2}}$$

$$L_r = 1.95(2.878 \text{ in}) \frac{200\text{GPa}}{0.7(250\text{MPa})} \sqrt{\frac{(3.87 \text{ in}^4)(1)}{(112 \text{ in}^3)(13.4 \text{ in})} + \sqrt{\left[\frac{(3.87 \text{ in}^4)(1)}{(112 \text{ in}^3)(13.4 \text{ in})}\right]^2 + 6.76 \left[\frac{0.7(250\text{MPa})}{200\text{GPa}}\right]^2}}$$

$$L_r = 491.909 \text{ in}$$

Se analizan los valores y se comprueba el caso:

$$L_p < L_b \leq L_r$$

$$123.883 \text{ in} < 333.62 \text{ in} \leq 491.909 \text{ in}$$

Se calculan los momentos por flexión según ecuación (54):

$$M_{n1} = M_p = \sigma_y Z_x$$

$$M_{n1} = M_p = 36 \text{ksi}(126 \text{ in}^3)$$

$$M_{n1} = M_p = 4.536 \times 10^3 \text{ kpi. in}$$

Se calcula el momento “ M_{n2} ” por pandeo lateral torsionante según ecuación (55):

$$M_{n2} = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7\sigma_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p$$

$$M_{n2} = (1) \left\{ 4.536 \times 10^3 \text{ kpi. in} - [4.536 \times 10^4 \text{ kpi. in} - 0.7(36 \text{ksi})(112 \text{ in}^3)] \left(\frac{333.62 \text{ in} - 123.883 \text{ in}}{491.909 \text{ in} - 123.883 \text{ in}} \right) \right\} \leq M_p$$

$$M_{n2} = 3.559 \times 10^3 \text{ kpi. in} \leq 4.536 \times 10^4 \text{ kpi. in} \quad \text{(Cumple)}$$

Luego se elige al menor “ M_n ”:

$$M_n = 3.559 \times 10^3 \text{ kpi. in} = 402.161 \text{ kN.m}$$

Luego se calcula el momento crítico “ M_r ” y debe cumplirse la ecuación (57):

$$M_r = \phi_b M_n \gg M_{max}$$

$$M_r = (0.9)(402.161 \text{ kN.m}) \gg 121.808 \text{ kN.m}$$

$$M_r = 361.945 \text{ kN.m} \gg 121.808 \text{ kN.m} \quad \text{(Correcto)}$$

Como el momento crítico es mucho mayor que el momento máximo entonces no existe pandeo lateral torsional.

Paso 10: Límite de resistencia a la fatiga

En primer lugar, identificamos la resistencia (esfuerzo) última del material:

$$S_u = 400 \text{ MPa} \leq 1400 \text{ MPa}$$

Así, con esa condición y de la ecuación (70) obtenemos el límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica:

$$S'_e = 0.5S_u = 0.5 \times 400 \text{ MPa} = 200 \text{ MPa}$$

Luego identificamos el factor k_f que varía entre 0.24 y 0.90. Tomamos el promedio:

$$k_f = 0.67$$

Con el factor hallado encontramos el límite de resistencia modificado según ecuación (71):

$$S_e = k_f S'_e = 0.67 \times 200 \text{ MPa} = 134 \text{ MPa}$$

Identificamos el esfuerzo máximo y el esfuerzo mínimo. Como es un puente grúa el esfuerzo máximo se produce cuando se aplica la carga máxima y el mínimo cuando el puente no tiene carga (ver Figura 19). Por lo tanto:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 66.39 \text{ MPa} \text{ y } \sigma_{m\acute{i}n} = 0 \text{ MPa}$$

Ahora obtenemos los esfuerzos medio y amplitud con las ecuaciones (72) y (73):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{66.39 + 0}{2} = 33.195 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right| = \left| \frac{66.39 - 0}{2} \right| = 33.195 \text{ MPa}$$

Luego, con la ecuación (74) obtenemos el factor de diseño (seguridad):

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = \frac{33.195}{134} + \frac{33.195}{400}$$

$$n = 3.024$$

Como $n \geq 1$ y $\sigma_a \ll S_e$, la viga se encuentra en la zona de vida infinita y no es necesario calcular el número finito de ciclos donde terminaría su vida útil.

Anexo 7: Resultados de simulación de viga carrilera

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos de la simulación de la viga carrilera del puente grúa de 9 toneladas obtenidos con el programa Autodesk Inventor.

Objetivo general y configuración

Tipo de simulación	Análisis estático
Fecha de la última modificación	02/04/2025, 22:21
Estado de modelo	[Principal]
Vista de diseño	Por defecto
Posicional	[Principal]

Material(es)

Nombre	Acero ASTM A36	
General	Densidad de masa	7.850 g/cm ³
	Límite de elasticidad	248.225 MPa
	Resistencia máxima a tracción	399.900 MPa
Tensión	Módulo de Young	199.959 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.300 ul
Nombre(s) de pieza	AISC W 14x74 - 638.819	
	AISC W 12x72 - 259.843	
	AISC W 12x72 - 259.843	
	AISC W 12x72 - 259.843	

Sección o secciones transversales

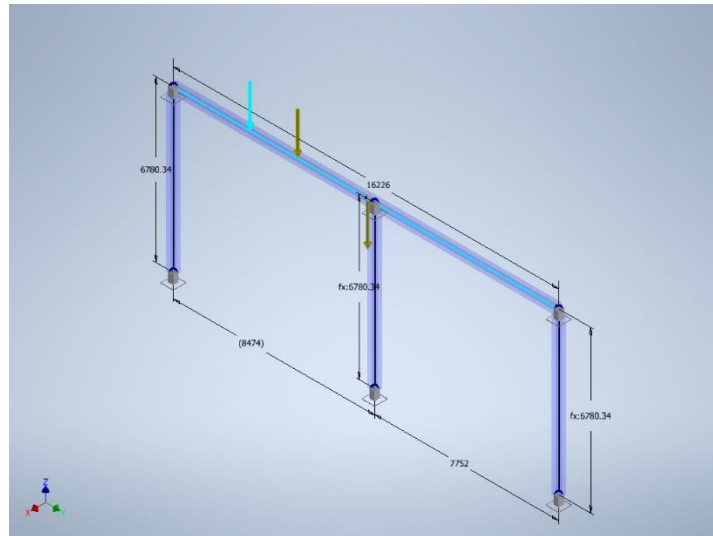
Propiedades de geometría	Área de sección (a)	14096.441 mm²
	Anchura de sección	256.540 mm
	Altura de sección	360.680 mm
	Centroide de sección (x)	128.270 mm
	Centroide de sección (y)	180.340 mm
Propiedades mecánicas	Momento de inercia (I _x)	333647303.649 mm ⁴
	Momento de inercia (I _y)	56165172.586 mm ⁴
	Módulo de rigidez de torsión (J)	1620214.477 mm ⁴
	Módulo de sección (W _x)	1850101.495 mm ³
	Módulo de sección (W _y)	437866.786 mm ³
	Módulo de sección de torsión (W _z)	56844.240 mm ³
	Área de esfuerzo cortante reducida (A _x)	7018.259 mm ²
	Área de esfuerzo cortante reducida (A _y)	3687.621 mm ²
	Nombre(s) de pieza	AISC W 14x74 - 638.819

Propiedades de geometría	Área de sección (a)	13614.054 mm²
	Anchura de sección	304.800 mm
	Altura de sección	312.420 mm
	Centroide de sección (x)	152.400 mm
	Centroide de sección (y)	156.210 mm
Propiedades mecánicas	Momento de inercia (I _x)	249882770.247 mm ⁴
	Momento de inercia (I _y)	80363537.864 mm ⁴
	Módulo de rigidez de torsión (J)	1216244.571 mm ⁴
	Módulo de sección (W _x)	1599659.242 mm ³
	Módulo de sección (W _y)	527319.802 mm ³
	Módulo de sección de torsión (W _z)	48305.186 mm ³
	Área de esfuerzo cortante reducida (A _x)	7079.496 mm ²
	Área de esfuerzo cortante reducida (A _y)	3082.200 mm ²
Nombre(s) de pieza	AISC W 12x72 - 259.843	
	AISC W 12x72 - 259.843	
	AISC W 12x72 - 259.843	

Condiciones de funcionamiento

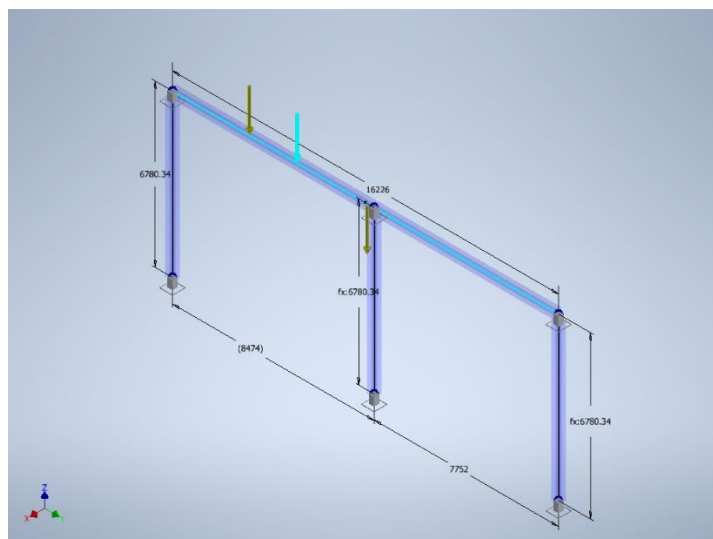
— Fuerza:1

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	57340.000 N
Sistema de coordenadas de vigas	No
Ángulo de plano	270.00 deg
Ángulo en plano	180.00 deg
F_x	0.000 N
F_y	0.000 N
F_z	-57340.000 N
Desfase	12989.000 mm



— Fuerza:2

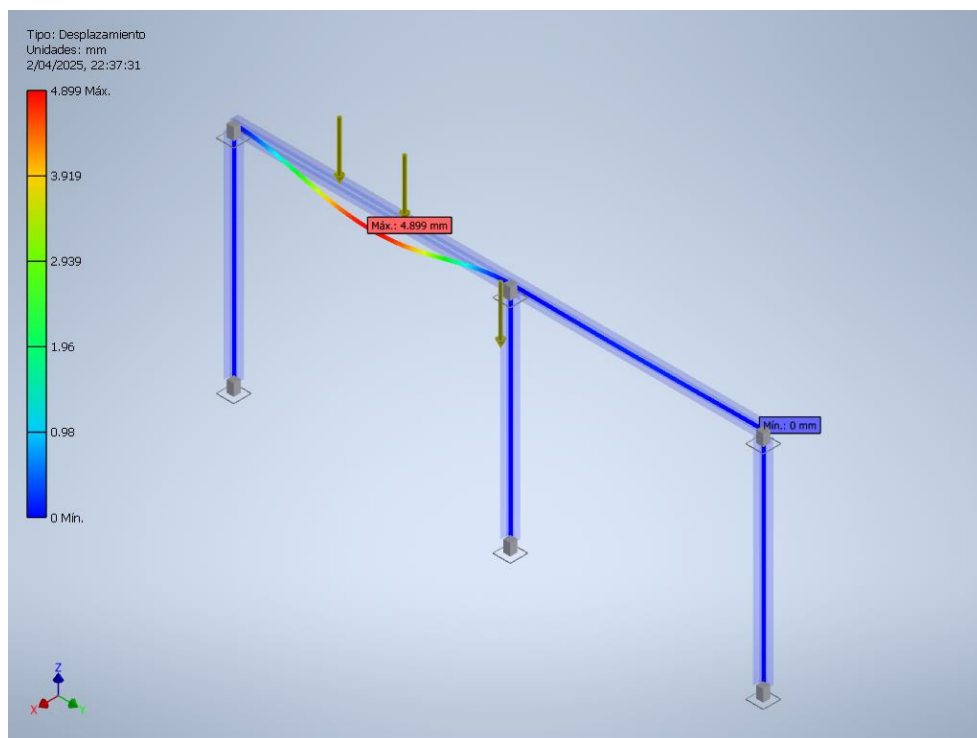
Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	57340.000 N
Sistema de coordenadas de vigas	No
Ángulo de plano	270.00 deg
Ángulo en plano	180.00 deg
Fx	0.000 N
Fy	0.000 N
Fz	-57340.000 N
Desfase	10989.000 mm



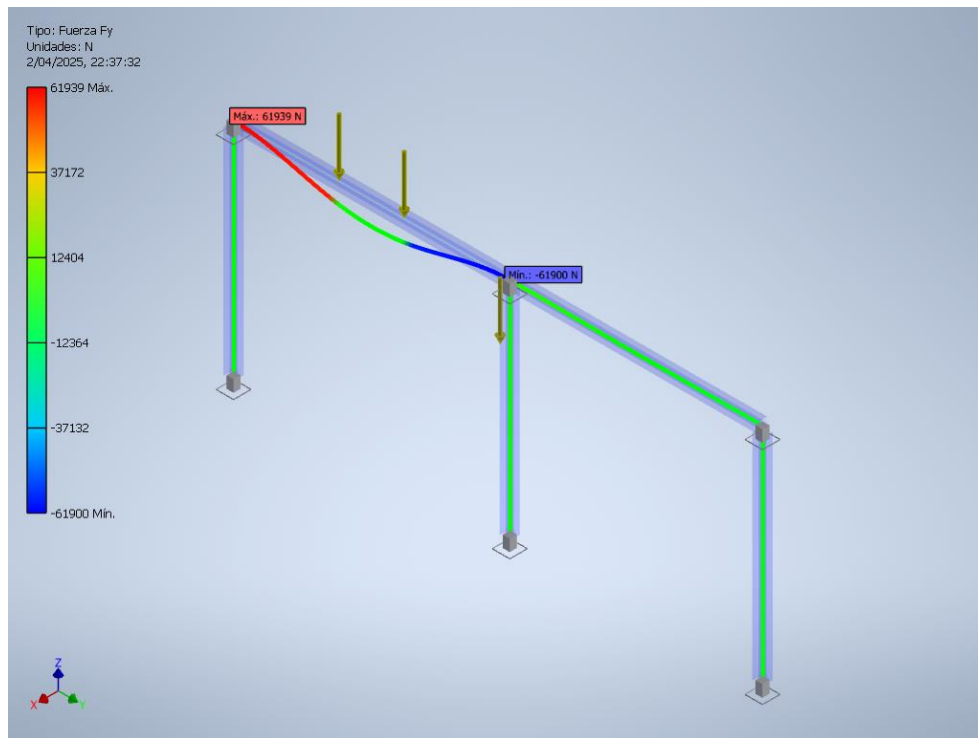
Resultados

Nombre		Mínimo	Máximo
Desplazamiento		0.000 mm	4.899 mm
Fuerzas	Fx	-0.000 N	0.000 N
	Fy	-61899.857 N	61939.457 N
	Fz	-3459.713 N	3459.713 N
Momentos	Mx	-74149172.999 N mm	121204176.773 N mm
	My	-0.000 N mm	0.000 N mm
	Mz	0.000 N mm	0.000 N mm
	Tensiones normales	Smax	-0.254 MPa
	Smin	-65.512 MPa	0.254 MPa
	Smax(Mx)	0.000 MPa	65.512 MPa
	Smin(Mx)	-65.512 MPa	0.000 MPa
	Smax(My)	0.000 MPa	0.000 MPa
	Smin(My)	-0.000 MPa	0.000 MPa
	Saxial	-0.254 MPa	0.254 MPa
Tensión de corte	Tx	-0.000 MPa	0.000 MPa
	Ty	-16.797 MPa	16.786 MPa
Tensiones de torsión	T	0.000 MPa	0.000 MPa

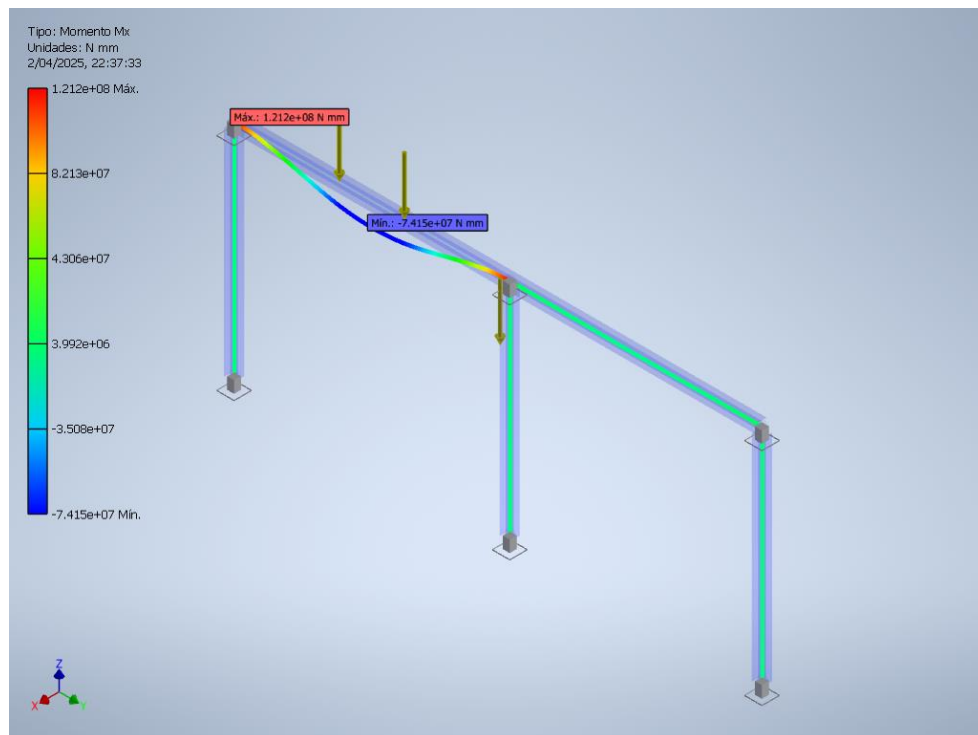
— Desplazamiento



— Fuerza Cortante



— Momento máximo



— Esfuerzo máximo



Anexo 8: Cálculo de columnas

Paso 1: Datos del perfil

El perfil de la viga carrilera elegido es el W12x72 lb/ft. Se toman algunos datos necesarios de las tablas de la AISC, de diseño, así como de los Anexos 1 y 16:

$$\text{Radio de giro en "x": } r_x = 5.31 \text{ in} = 0.135 \text{ m}$$

$$\text{Radio de giro en "y": } r_y = 3.04 \text{ in} = 0.077 \text{ m}$$

$$\text{Área de la sección: } A = 3.87 \text{ in}^2 = 0.014 \text{ m}^2$$

$$\text{Longitud real de columna: } L = 6.6 \text{ m}$$

Paso 2: Longitud efectiva

Para calcular la longitud efectiva primero se selecciona el factor de fijación "K". Según el caso en la figura 14, se elige el siguiente para ambos extremos fijos:

$$K = 0.65$$

Con el factor de fijación se calcula la longitud efectiva usando la ecuación (40):

$$L_e = KL$$

$$L_e = 0.65(6.6 \text{ m}) = 4.29 \text{ m}$$

Paso 3: Selección del radio de giro

Se comparan los valores del radio de giro en "x" y en "y" para diseño:

$$r_y = 0.077 \text{ m} < r_x = 0.135 \text{ m}$$

Por lo tanto, se elige el radio de giro en "y" para el diseño.

Paso 4: Relación de esbeltez

Se calcula la relación de esbeltez con la ecuación (41), donde "r" es el radio de giro menor seleccionado en el paso anterior:

$$SR = \frac{L_e}{r}$$

$$SR = \frac{4.29 \text{ m}}{0.077 \text{ m}} = 55.558$$

Paso 5: Constante de columna

Se calcula la constante de columna con la ecuación (42), donde “ σ_y ” y “ E ” son datos del material. Esfuerzo de fluencia y módulo de elasticidad, respectivamente:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_y}}$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2(200GPa)}{(250MPa)}} = 125.664$$

Paso 6: Clasificación de columna

Se comparan los valores de la relación de esbeltez y la constante de columna:

$$SR = 55.558 < C_c = 125.664$$

Por lo tanto, se trata de una columna de clasificación “Intermedia”.

Paso 7: Esfuerzo admisible (crítico)

Se calcula el esfuerzo según CMAA 74, que es la fórmula parabólica de Euler según la AISC, pero añadido un factor de diseño. Utilizando un factor de diseño de $N=1.1$ para el caso 1. Se utiliza la ecuación (44):

$$\sigma_A = \frac{\left[1 - \frac{(SR)^2}{2(C_c)^2}\right] \sigma_y}{\left[\frac{5}{3} + \frac{3(SR)}{8(C_c)} - \frac{(SR)^3}{8(C_c)^3}\right] N}$$

$$\sigma_A = \frac{\left[1 - \frac{(55.558)^2}{2(125.664)^2}\right] (250MPa)}{\left[\frac{5}{3} + \frac{3(55.558)}{8(125.664)} - \frac{(55.558)^3}{8(125.664)^3}\right]} \quad (1.1)$$

$$\sigma_A = 112.568 MPa$$

Se compara con el esfuerzo permitido según CMAA 74 para el caso 1 para no encontrar contradicciones. Donde el esfuerzo permisible es $0.6\sigma_y$.

$$\sigma_A < 0.6\sigma_y$$

$$112.568 \text{ MPa} < 0.6(250 \text{ MPa})$$

$$112.568 \text{ MPa} < 150 \text{ MPa} \quad (\text{Correcto})$$

Paso 8: Carga crítica

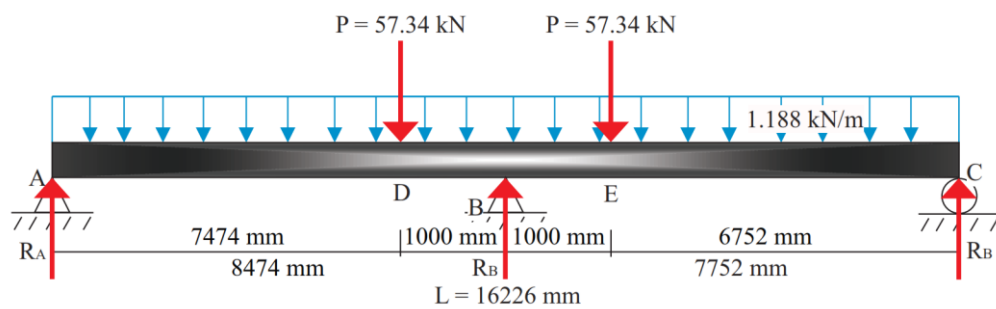
Utilizando el esfuerzo admisible (crítico), del paso anterior se calcula la carga crítica con la ecuación:

$$P_{cr} = \sigma_A \cdot A$$

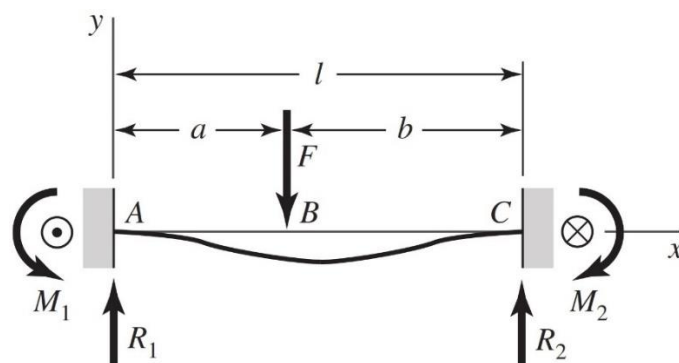
$$P_a = 112.568 \text{ MPa}(0.014 \text{ m}^2) = 1532 \text{ kN}$$

Paso 9: Carga máxima

Se calculan las reacciones considerando el puente grúa sobre una columna según el siguiente esquema:

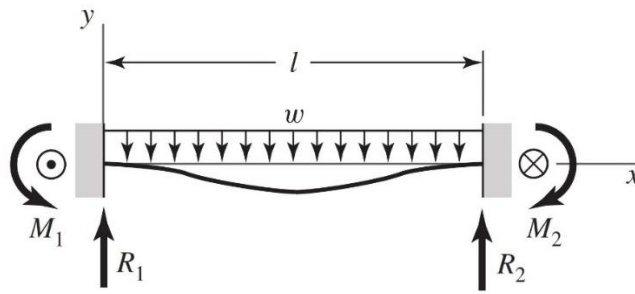


Para el análisis se utilizarán las figuras 12 y 13 y las ecuaciones de la (29), (30) y (35):



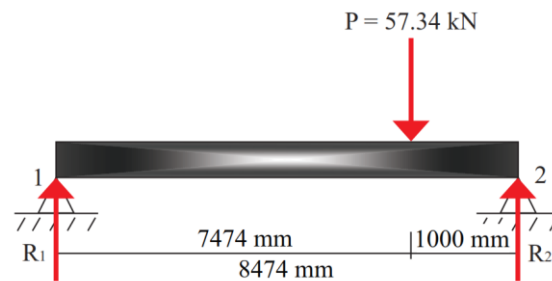
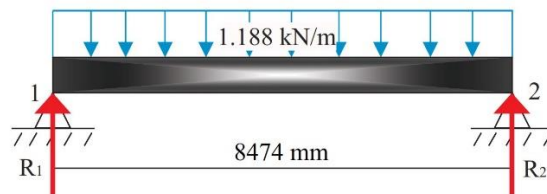
$$R_1 = \frac{Fb^2}{l^3}(3a + b)$$

$$R_2 = \frac{Fa^2}{l^3}(3b + a)$$



$$R_1 = R_2 = \frac{wl}{2}$$

Se analiza el tramo AB, para ello se separan todos los casos de carga:



Se calculan las reacciones en el tramo AB sumando los resultados para cada caso:

$$R_1 = \frac{wl}{2} + \frac{Fb^2}{l^3}(3a + b)$$

$$R_1 = \frac{1.188 \frac{kN}{m} (8.474m)}{2} + \frac{57.34kN(1m)^2}{(8.474m)^3} [3(7.474m) + 1m]$$

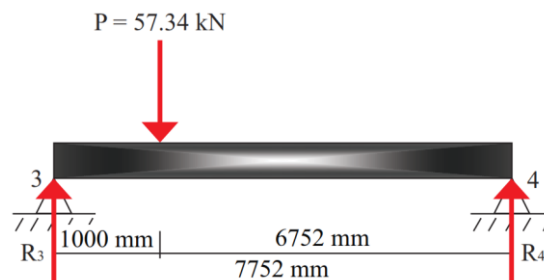
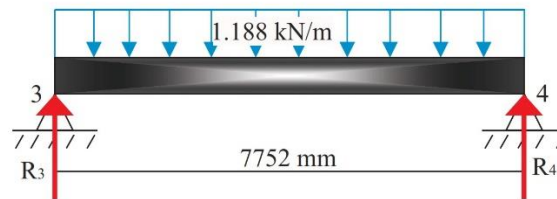
$$R_1 = 7.24 \text{ kN}$$

$$R_2 = \frac{wl}{2} + \frac{Fa^2}{l^3} (3b + a)$$

$$R_2 = \frac{1.188 \frac{kN}{m} (8.474m)}{2} + \frac{57.34kN(7.474m)^2}{(8.474m)^3} [3(1m) + 7.474m]$$

$$R_2 = 60.167 kN$$

Se analiza el tramo BC, para ello se separan todos los casos de carga:



Se calculan las reacciones en el tramo BC sumando los resultados para cada caso:

$$R_3 = \frac{wl}{2} + \frac{Fb^2}{l^3} (3a + b)$$

$$R_3 = \frac{1.188 \frac{kN}{m} (7.752m)}{2} + \frac{57.34kN(6.752m)^2}{(7.752m)^3} [3(1m) + 6.752m]$$

$$R_3 = 59.329 kN$$

$$R_4 = \frac{wl}{2} + \frac{Fa^2}{l^3} (3b + a)$$

$$R_4 = \frac{1.188 \frac{kN}{m} (7.752m)}{2} + \frac{57.34kN(1m)^2}{(7.752m)^3} [3(6.752m) + 1m]$$

$$R_4 = 7.221 \text{ kN}$$

Se calculan las reacciones según los resultados del punto anterior:

$$\text{Reacciones: } R_A = R_1 = 7.24 \text{ kN}$$

$$R_B = R_2 + R_3 = 60.167 \text{ kN} + 59.329 \text{ kN} = 119.495 \text{ kN}$$

$$R_C = R_4 = 7.221 \text{ kN}$$

Se selecciona la carga máxima:

$$P_m = 119.495 \text{ kN}$$

Paso 10: Verificación de cargas

Se comparan la carga crítica y la carga de trabajo que soporta la columna:

$$P_m < P_{cr}$$

$$119.495 \text{ kN} \ll 1532 \text{ kN} \quad (\text{Correcto})$$

Paso 11: Verificación del esfuerzo

Utilizando la carga máxima se calcula el esfuerzo de trabajo soportado con la siguiente fórmula:

$$\sigma_t = \frac{P_m}{A}$$

$$\sigma_t = \frac{119.495 \text{ kN}}{0.014 \text{ m}^2} = 8.778 \text{ MPa}$$

Se comparan la el esfuerzo de trabajo con el esfuerzo admisible (crítico) que soporta la columna:

$$\sigma_t < \sigma_A$$

$$8.778 \text{ MPa} \ll 112.568 \text{ MPa} \quad (\text{Correcto})$$

Paso 12: Cálculo del factor de seguridad

El factor de seguridad se obtiene con la relación del esfuerzo máximo con el esfuerzo de trabajo (tiene que ser superior al rango 1.3-1.5), según la ecuación (39):

$$n = \frac{0.6\sigma_y}{\sigma_{max}}$$

$$n = \frac{150MPa}{8.778MPa}$$

$$n = 17.088 \quad \text{(Correcto)}$$

Paso 13: Límite de resistencia a la fatiga

En primer lugar, identificamos la resistencia (esfuerzo) última del material:

$$S_u = 400 MPa \leq 1\,400 MPa$$

Así, con esa condición y de la ecuación (70) obtenemos el límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica:

$$S'_e = 0.5S_u = 0.5 \times 400 MPa = 200 MPa$$

Luego identificamos el factor k_f que varía entre 0.24 y 0.90. Tomamos el promedio:

$$k_f = 0.67$$

Con el factor hallado encontramos el límite de resistencia modificado según ecuación (71):

$$S_e = k_f S'_e = 0.67 \times 200 MPa = 134 MPa$$

Identificamos el esfuerzo máximo y el esfuerzo mínimo. Como es un puente grúa el esfuerzo máximo se produce cuando se aplica la carga máxima y el mínimo cuando el puente no tiene carga (ver Figura 19). Por lo tanto:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 8.778 MPa \text{ y } \sigma_{m\acute{i}n} = 0 MPa$$

Ahora obtenemos los esfuerzos medio y amplitud con las ecuaciones (72) y (73):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} = \frac{8.778 + 0}{2} = 4.389 MPa$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \right| = \left| \frac{8.778 - 0}{2} \right| = 4.389 \text{ MPa}$$

Luego, con la ecuaci3n (74) obtenemos el factor de dise1o (seguridad):

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = \frac{4.389}{134} + \frac{4.389}{400}$$

$$n = 22.87$$

Como $n \geq 1$ y $\sigma_a \ll S_e$, la viga se encuentra en la zona de vida infinita y no es necesario calcular el n1mero finito de ciclos donde terminaría su vida 1til.

Anexo 9: Resultados de simulación de columna

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos de la simulación de columna del puente grúa de 9 toneladas obtenidos con el programa Autodesk Inventor.

Objetivo general y configuración

Tipo de simulación	Análisis estático
Fecha de la última modificación	02/04/2025, 22:17
Estado de modelo	[Principal]
Vista de diseño	Por defecto
Posicional	[Principal]

Material(es)

Nombre	Acero ASTM A36	
General	Densidad de masa	7.850 g/cm ³
	Límite de elasticidad	248.225 MPa
	Resistencia máxima a tracción	399.900 MPa
Tensión	Módulo de Young	199.959 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.300 ul
Nombre(s) de pieza	AISC W 14x74 - 638.819	
	AISC W 12x72 - 259.843	
	AISC W 12x72 - 259.843	
	AISC W 12x72 - 259.843	

Sección o secciones transversales

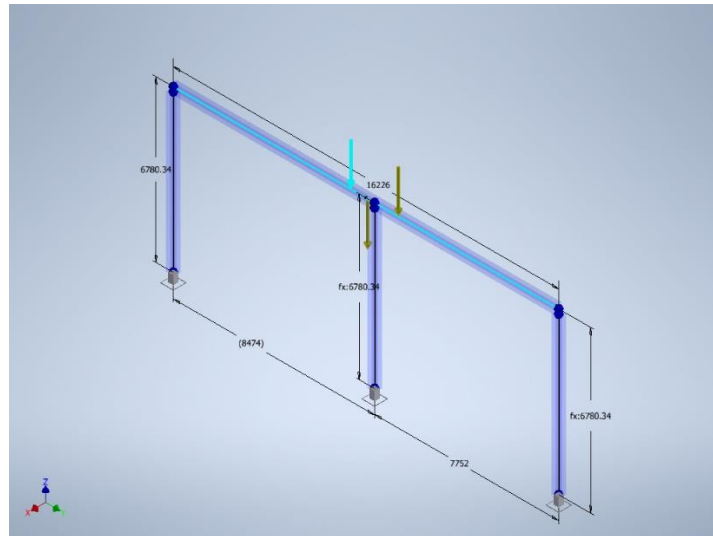
Propiedades de geometría	Área de sección (a)	14096.441 mm ²
	Anchura de sección	256.540 mm
	Altura de sección	360.680 mm
	Centroide de sección (x)	128.270 mm
	Centroide de sección (y)	180.340 mm
Propiedades mecánicas	Momento de inercia (I _x)	333647303.649 mm ⁴
	Momento de inercia (I _y)	56165172.586 mm ⁴
	Módulo de rigidez de torsión (J)	1620214.477 mm ⁴
	Módulo de sección (W _x)	1850101.495 mm ³
	Módulo de sección (W _y)	437866.786 mm ³
	Módulo de sección de torsión (W _z)	56844.240 mm ³
	Área de esfuerzo cortante reducida (A _x)	7018.259 mm ²
	Área de esfuerzo cortante reducida (A _y)	3687.621 mm ²
Nombre(s) de pieza	AISC W 14x74 - 638.819	

Propiedades de geometría	Área de sección (a)	13614.054 mm²
	Anchura de sección	304.800 mm
	Altura de sección	312.420 mm
	Centroide de sección (x)	152.400 mm
	Centroide de sección (y)	156.210 mm
Propiedades mecánicas	Momento de inercia (I _x)	249882770.247 mm ⁴
	Momento de inercia (I _y)	80363537.864 mm ⁴
	Módulo de rigidez de torsión (J)	1216244.571 mm ⁴
	Módulo de sección (W _x)	1599659.242 mm ³
	Módulo de sección (W _y)	527319.802 mm ³
	Módulo de sección de torsión (W _z)	48305.186 mm ³
	Área de esfuerzo cortante reducida (A _x)	7079.496 mm ²
	Área de esfuerzo cortante reducida (A _y)	3082.200 mm ²
Nombre(s) de pieza	AISC W 12x72 - 259.843	
	AISC W 12x72 - 259.843	
	AISC W 12x72 - 259.843	

Condiciones de funcionamiento

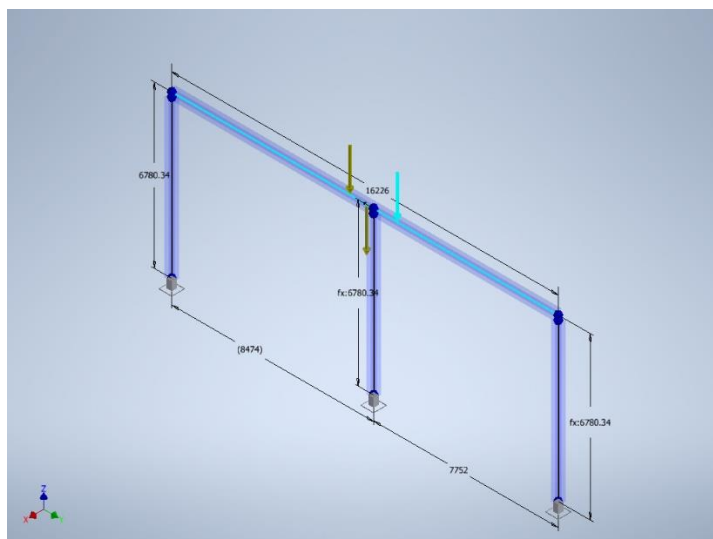
— Fuerza:1

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	57340.000 N
Sistema de coordenadas de vigas	No
Ángulo de plano	0.00 deg
Ángulo en plano	180.00 deg
F_x	0.000 N
F_y	0.000 N
F_z	-57340.000 N
Desfase	8752.000 mm



— Fuerza:2

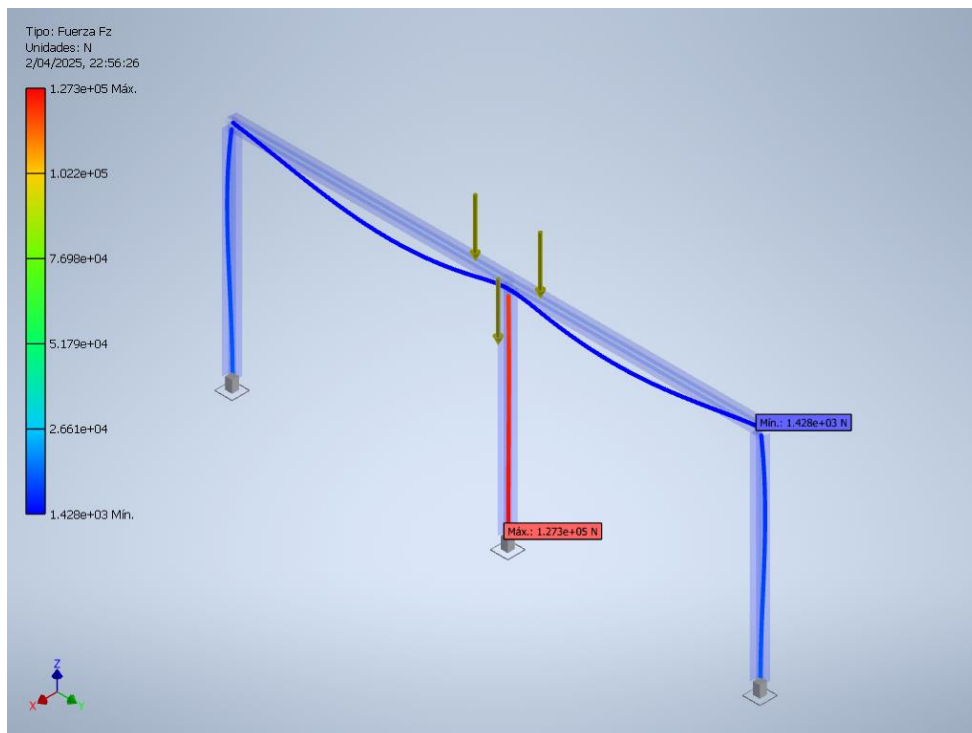
Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	57340.000 N
Sistema de coordenadas de vigas	No
Ángulo de plano	0.00 deg
Ángulo en plano	180.00 deg
Fx	0.000 N
Fy	0.000 N
Fz	-57340.000 N
Desfase	6752.000 mm



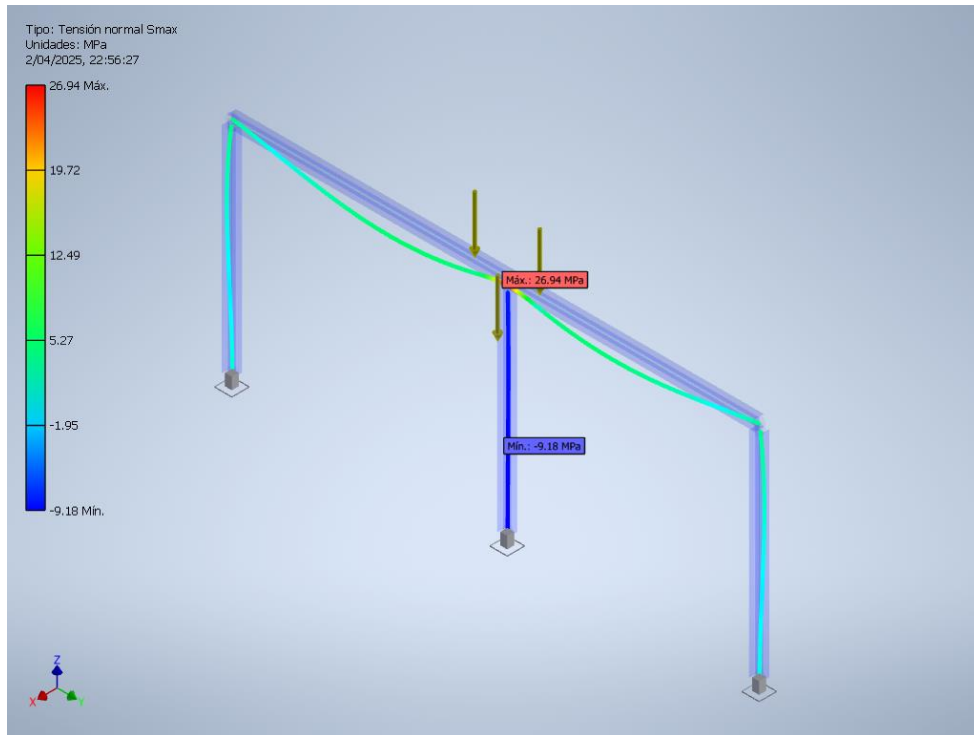
Resultados

Nombre		Mínimo	Máximo
Desplazamiento		0.000 mm	1.055 mm
Fuerzas	Fx	-0.000 N	0.000 N
	Fy	-60434.553 N	59633.845 N
	Fz	1428.369 N	127340.106 N
Momentos	Mx	-9595384.115 N mm	50060998.164 N mm
	My	-0.000 N mm	0.000 N mm
	Mz	-0.000 N mm	0.000 N mm
Tensiones normales	Smax	-9.178 MPa	26.944 MPa
	Smin	-27.173 MPa	-0.186 MPa
	Smax(Mx)	0.002 MPa	27.059 MPa
	Smin(Mx)	-27.059 MPa	-0.002 MPa
	Smax(My)	-0.000 MPa	0.000 MPa
	Smin(My)	-0.000 MPa	0.000 MPa
Tensión de corte	Saxial	-9.354 MPa	-0.101 MPa
	Tx	-0.000 MPa	0.000 MPa
Tensión de corte	Ty	-16.171 MPa	16.388 MPa
	Tensiones de torsión	T	-0.000 MPa

— Fuerza Cortante



— Esfuerzo máximo



Anexo 10: Cálculo de unión empernada

Paso 1: Carga por perno

Para calcular la carga soportada por cada perno, se toman en cuenta los siguientes datos:

$$\text{Carga de Viga + Trolley: } TL = 2711 \text{ kg} = 26.586 \text{ kN}$$

$$\text{Carga Izada: } LL = 9\,000 \text{ kg} = 88.26 \text{ kN}$$

Luego se suman los valores:

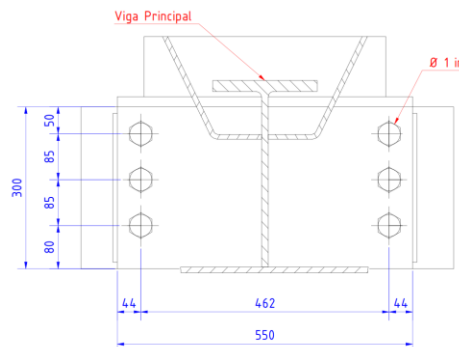
$$P = TL + LL = 114.846 \text{ kN}$$

Con la carga total y considerando que se utilizan 6 pernos por lado, entonces son 12:

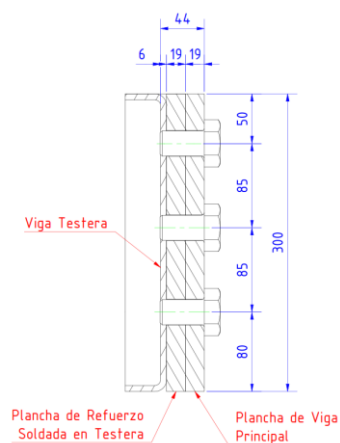
$$F = \frac{P}{12} = \frac{114.846 \text{ kN}}{12} = 9.57 \text{ kN}$$

Paso 2: Esquemas de la unión empernada

De los planos del Anexo final obtenemos una vista de corte frontal:



También obtenemos una vista de corte lateral:



Tal como observamos en la vista de corte lateral, la plancha de viga principal tira hacia abajo y consecuencia la plancha de refuerzo soldada en la viga testera junto esta tira hacia arriba.

Paso 3: Datos importantes

De los anexos, teoría y diseño obtenemos los siguientes datos:

Esfuerzo de fluencia de los pernos ASTM A325: $S_p = 92 \text{ ksi} = 634.318 \text{ MPa}$

Esfuerzo de fluencia de las planchas ASTM A36: $S_y = 36 \text{ ksi} = 248.211 \text{ MPa}$

Factor de diseño: $n_d = 1.5$

Área del diámetro menor del perno: $A_r = 0.625 \text{ in}^2 = 0.0004 \text{ m}^2$

Paso 4: Cálculo de la carga de aplastamiento de los pernos, todos cargados

De la ecuación (65) y despejando la fuerza:

$$F_1 = \frac{2 \cdot t \cdot d \cdot S_p}{n_d} = \frac{2(0.019 \text{ m})(0.0254 \text{ m})634.318 \text{ MPa}}{1.5} = 408.162 \text{ kN}$$

Con el resultado anterior, comparamos con el resultado inicial:

$$F < F_1$$

$$9.57 \text{ kN} \ll 408.162 \text{ kN} \quad \text{(Correcto)}$$

Paso 5: Cálculo de la carga de aplastamiento de las planchas, todos los pernos activos

De la ecuación (65) y despejando la fuerza:

$$F_2 = \frac{2 \cdot t \cdot d \cdot S_y}{n_d} = \frac{2(0.019 \text{ m})(0.0254 \text{ m})248.211 \text{ MPa}}{1.5} = 159.716 \text{ kN}$$

Con el resultado anterior, comparamos con el resultado inicial:

$$F < F_2$$

$$9.57 \text{ kN} \ll 159.716 \text{ kN} \quad \text{(Correcto)}$$

Paso 6: Cálculo de la carga cortante, con todos los pernos activos

- Si las roscas de los pernos no se extienden en los planos de corte

De la ecuación (61) y despejando la fuerza:

$$F_3 = \frac{N \cdot 0,577 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot S_p}{4 \cdot n_d} = \frac{6(0.577)\pi(0.0254 \text{ m})^2(634,318 \text{ MPa})}{4(1.5)} = 741.822 \text{ kN}$$

Con el resultado anterior, comparamos con el resultado inicial:

$$F < F_3$$

$$9.57 \text{ kN} \ll 741.822 \text{ kN} \quad (\text{Correcto})$$

- Si las roscas de los pernos se extienden en los planos de corte

De la ecuación (62) y despejando la fuerza:

$$F_4 = \frac{N \cdot 0,577 \cdot A_r \cdot S_p}{n_d} = \frac{6(0.577)(0.0004 \text{ m}^2)(634,318 \text{ MPa})}{1.5} = 590.323 \text{ kN}$$

Con el resultado anterior, comparamos con el resultado inicial:

$$F < F_4$$

$$9.57 \text{ kN} \ll 590.323 \text{ kN} \quad (\text{Correcto})$$

Paso 7: Cálculo de la carga cortante del borde de las planchas en los pernos del margen

De la ecuación (63) y despejando la fuerza:

$$F_5 = \frac{N \cdot a \cdot t \cdot 0,577 \cdot S_y}{n_d} = \frac{6(0.044 \text{ m})(0.019 \text{ m})(0.577)(248.211 \text{ MPa})}{1.5} = 478.921 \text{ kN}$$

Con el resultado anterior, comparamos con el resultado inicial:

$$F < F_5$$

$$9.57 \text{ kN} \ll 478.921 \text{ kN} \quad (\text{Correcto})$$

Paso 8: Cálculo de la carga de fluencia por tensión de las planchas a lo largo de los agujeros de los pernos

De la ecuación (66) y despejando la fuerza:

$$F_6 = \frac{(w - N \cdot d) \cdot t \cdot S_y}{n_d} = \frac{(0,55m - 6 \cdot 0,0254m)(0,019m)(248,211MPa)}{1,5} = 1250 \text{ kN}$$

Con el resultado anterior, comparamos con el resultado inicial:

$$F < F_6$$

$$9,57 \text{ kN} \ll 1250 \text{ kN} \quad (\text{Correcto})$$

Paso 9: Cálculo de la carga de fluencia pura en las planchas

De la ecuación (67) y despejando la fuerza:

$$F_6 = \frac{w \cdot t \cdot S_y}{n_d} = \frac{(0,55 \text{ m})(0,019 \text{ m})(248,211 \text{ MPa})}{1,5} = 1729 \text{ kN}$$

Con el resultado anterior, comparamos con el resultado inicial:

$$F < F_6$$

$$9,57 \text{ kN} \ll 1729 \text{ kN} \quad (\text{Correcto})$$

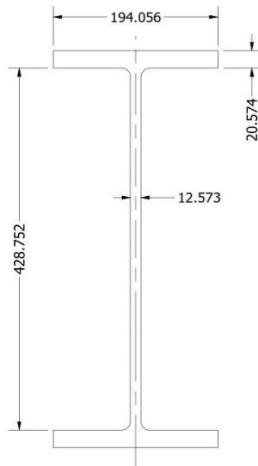
Paso 10: Conclusión

Tal como se puede apreciar en todos los casos, el límite de carga es mucho mayor que el soportado. Por lo tanto, la selección de pernos y material es correcto.

Anexo 11: Cálculo de soldadura crítica

Paso 1: Datos iniciales

La soldadura crítica se da en la unión del perfil de la viga principal (W18x71 lb/ft). Se obtienen los datos dimensionales del perfil, datos de la soldadura (electrodo E7018) de la teoría y la fuerza cortante máxima de los cálculos de la viga principal en el Anexo 2:



Garganta en Alas: $h_a = 20.574 \text{ mm} = 0.020574 \text{ m}$

Garganta en Alma: $h_b = 12.573 \text{ mm} = 0.012573 \text{ m}$

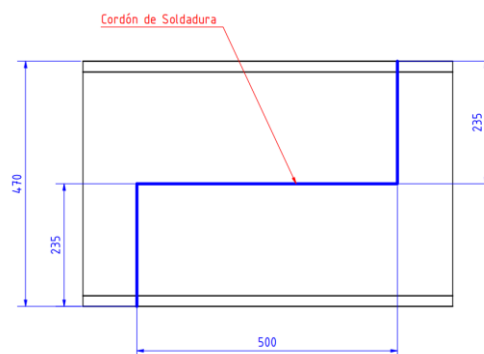
Longitud de unión en Alas: $l_a = 194.056 \text{ mm} = 0.194056 \text{ m}$

Longitud de unión en Alma: $l_b = 428.752 \text{ mm} = 0.428752 \text{ m}$

Esfuerzo de fluencia de soldadura: $\sigma_y = 400 \text{ MPa}$

Cortante Máxima: $F = 66.533 \text{ kN}$

Además, se resalta que el empalme es tipo Z o escalonado, respetando la norma práctica de que el corte horizontal es como mínimo igual al peralte de la viga, tal como se muestra:



Este tipo de empalme se utiliza para reducir la concentración de esfuerzos y la distorsión térmica (deformaciones).

Paso 2: Esfuerzo por soldadura en alas

Se calcula el esfuerzo de soldadura para tracción y compresión en alas utilizando la ecuación (58):

$$\sigma_1 = \frac{F}{h_a l_a}$$

$$\sigma_1 = \frac{66.533 \text{ kN}}{0.020574 \text{ m}(0.194056 \text{ m})} = 16.664 \text{ MPa}$$

Tiene que cumplirse que el esfuerzo máximo sea menor que el esfuerzo permisible en el caso 1 de la CMAA:

$$\sigma_1 < 0.8\sigma_y$$

$$16.664 \text{ MPa} < 0.8(250 \text{ MPa})$$

$$16.664 \text{ MPa} < 200 \text{ MPa} \quad (\text{Correcto})$$

Paso 3: Factor de seguridad de soldadura en alas

El factor de seguridad se obtiene con la relación del esfuerzo máximo con el esfuerzo permisible (tiene que ser superior al rango 1.3-1.5), según la ecuación (39):

$$n = \frac{0.6\sigma_y}{\sigma_1}$$

$$n = \frac{0.6(400 \text{ MPa})}{16.664 \text{ MPa}}$$

$$n = 14.4 \quad (\text{Correcto})$$

Paso 4: Esfuerzo por soldadura en alma

Se calcula el esfuerzo de soldadura para tracción y compresión en alma utilizando la ecuación (58):

$$\sigma_2 = \frac{F}{h_b l_b}$$

$$\sigma_2 = \frac{66.533 \text{ kN}}{0.012573 \text{ m}(0.428752 \text{ m})} = 12.342 \text{ MPa}$$

Tiene que cumplirse que el esfuerzo máximo sea menor que el esfuerzo permisible en el caso 1 de la CMAA:

$$\sigma_2 < 0.8\sigma_y$$

$$12.342 \text{ MPa} < 0.8(250 \text{ MPa})$$

$$12.342 \text{ MPa} < 200 \text{ MPa} \quad \text{(Correcto)}$$

Paso 5: Factor de seguridad de soldadura en alma

El factor de seguridad se obtiene con la relación del esfuerzo máximo con el esfuerzo permisible (tiene que ser superior al rango 1.3-1.5), según la ecuación (39):

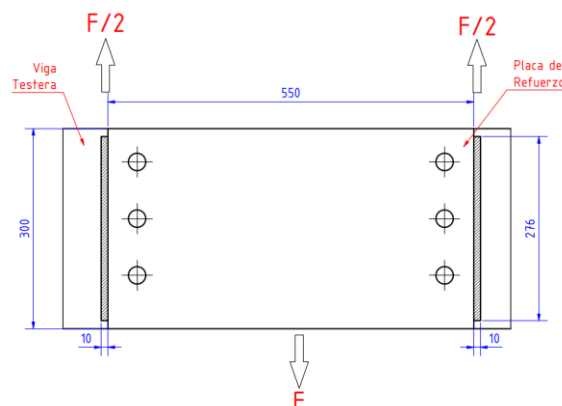
$$n = \frac{0.6\sigma_y}{\sigma_1}$$

$$n = \frac{0.6(400 \text{ MPa})}{12.342 \text{ MPa}}$$

$$n = 19.446 \quad \text{(Correcto)}$$

Paso 6: Esfuerzo por soldadura en unión de viga principal con viga testera

Otro punto crítico de soldadura se da en la unión entre la viga principal y la viga testera. La unión empernada transmite la carga a la soldadura, de la siguiente forma:



Paso 7: Recopilación de datos

Del esquema del punto anterior, obtenemos los siguientes datos:

$$\text{Cateto:} \quad h = 10 \text{ mm} = 0.01 \text{ m}$$

$$\text{Longitud de cordón:} \quad l = 276 \text{ mm} = 0.276 \text{ m}$$

Del cálculo de pernos del anexo anterior obtenemos el valor de la carga:

$$\text{Carga de Viga + Trolley:} \quad TL = 2711 \text{ kg} = 26.586 \text{ kN}$$

$$\text{Carga Izada:} \quad LL = 9\,000 \text{ kg} = 88.26 \text{ kN}$$

Luego se suman los valores:

$$P = TL + LL = 114.846 \text{ kN}$$

Con la carga total y considerando que se utilizan 2 vigas testeras, entonces se reparte:

$$F = \frac{P}{2} = \frac{114.846 \text{ kN}}{2} = 57.423 \text{ kN}$$

Paso 8: Cálculo del esfuerzo

Según la ecuación (59), se procede de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{1.414 \left(\frac{F}{2} \right)}{hl} = \frac{1.414 \left(\frac{57.423 \text{ kN}}{2} \right)}{(0.01 \text{ m})(0.276 \text{ m})} = 14.709 \text{ MPa}$$

Tiene que cumplirse que el esfuerzo máximo sea menor que el esfuerzo permisible en el caso 1 de la CMAA:

$$\tau < 0.8\sigma_y$$

$$14.709 \text{ MPa} < 0.8(250 \text{ MPa})$$

$$14.709 \text{ MPa} < 200 \text{ MPa} \quad \text{(Correcto)}$$

Paso 9: Factor de seguridad de soldadura en alma

El factor de seguridad se obtiene con la relación del esfuerzo máximo con el esfuerzo permisible (tiene que ser superior al rango 1.3-1.5), según la ecuación (39):

$$n = \frac{0.6\sigma_y}{\tau}$$

$$n = \frac{0.6(400 \text{ MPa})}{14.709 \text{ MPa}}$$

$$n = 16.316 \quad \text{(Correcto)}$$

Anexo 12: Resultados de simulación de análisis modal

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos de la simulación de la estructura del puente grúa de 9 toneladas obtenidos con el programa Autodesk Inventor.

Objetivo general y configuración

Tipo de simulación	Análisis modal teniendo en cuenta cargas estáticas
Fecha de la última modificación	5/10/2025, 20:48
Estado de modelo	[Principal]
Vista de diseño	Por defecto
Posicional	[Principal]
Precisión mejorada	No
Número de modos	8 ul
Número de iteraciones	8 ul
Tolerancia	0.00010 ul

Proyecto

N° de pieza	Estructura
Diseñador	Usuario
Coste	S/ 0.00
Fecha de creación	8/05/2023

Propiedades físicas

Masa	9721.734 kg
Área	2190877.091 mm ²
Volumen	1238437.391 mm ³
Centro de gravedad	x=0.000 mm y=4935.347 mm z=-53.307 mm

Material(es)

Nombre	Acero ASTM A36	
General	Densidad de masa	7.850 g/cm ³
	Límite de elasticidad	248.225 MPa
	Resistencia máxima a tracción	399.900 MPa
Tensión	Módulo de Young	199.959 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.300 ul

Modelo de viga

Nodos	342
Vigas	162
- Vigas en I	8
- Tubos redondos	154

Vínculos rígidos

Nombre	Desplazamiento			Rotación			Nodo padre	Nodo o nodos hijo
	Eje X	Eje Y	Eje Z	Eje X	Eje Y	Eje Z		
Vínculo rígido:1	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:337	Nodo:2
Vínculo rígido:2	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:326	Nodo:21
Vínculo rígido:3	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:325	Nodo:23
Vínculo rígido:4	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:340	Nodo:4
Vínculo rígido:5	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:328	Nodo:34
Vínculo rígido:6	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:327	Nodo:36
Vínculo rígido:7	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:338	Nodo:6
Vínculo rígido:8	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:330	Nodo:22, Nodo:25
Vínculo rígido:9	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:329	Nodo:24, Nodo:27
Vínculo rígido:10	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:339	Nodo:8
Vínculo rígido:11	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:332	Nodo:26
Vínculo rígido:12	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:331	Nodo:28
Vínculo rígido:13	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:341	Nodo:10
Vínculo rígido:14	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:334	Nodo:33, Nodo:38

Vínculo rígido:15	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:333	Nodo:35, Nodo:40
Vínculo rígido:16	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:342	Nodo:12
Vínculo rígido:17	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:336	Nodo:37
Vínculo rígido:18	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	fijo	Nodo:335	Nodo:39

Condiciones de funcionamiento

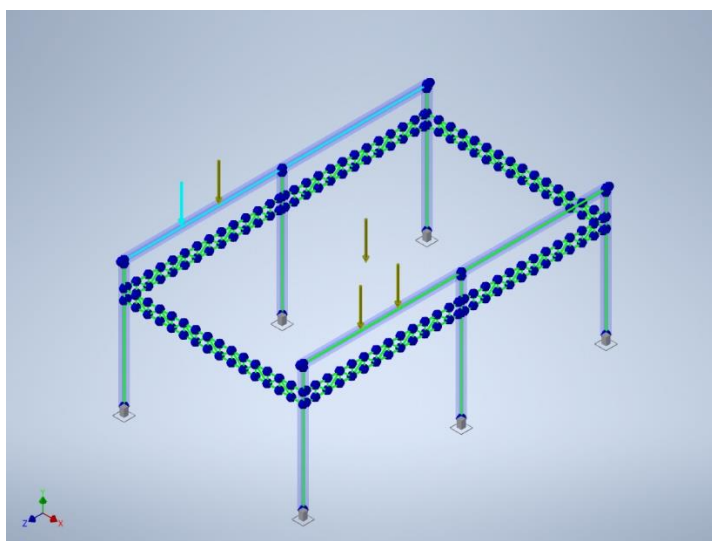
Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
Magnitud	9810.000 mm/s ²
Dirección	Y-

Fuerza:1

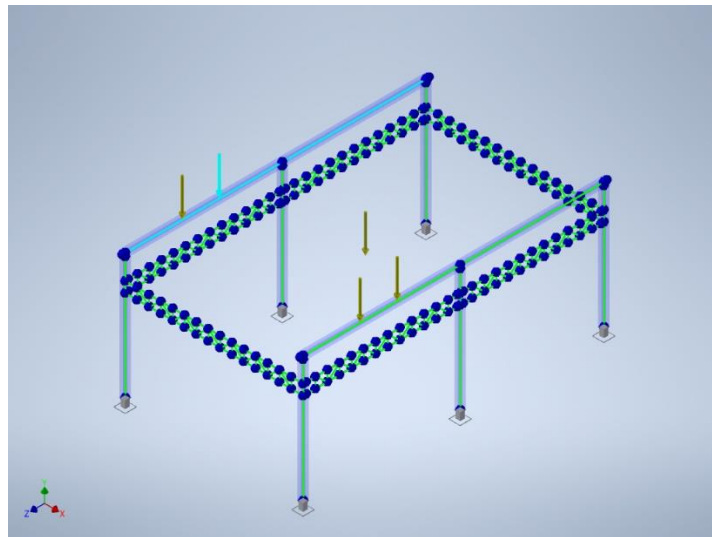
Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	57340.000 N
Sistema de coordenadas de vigas	No
Ángulo de plano	270.00 deg
Ángulo en plano	90.00 deg
Fx	0.000 N
Fy	-57340.000 N
Fz	0.000 N
Desfase	3237.0

Referencia o referencias seleccionadas



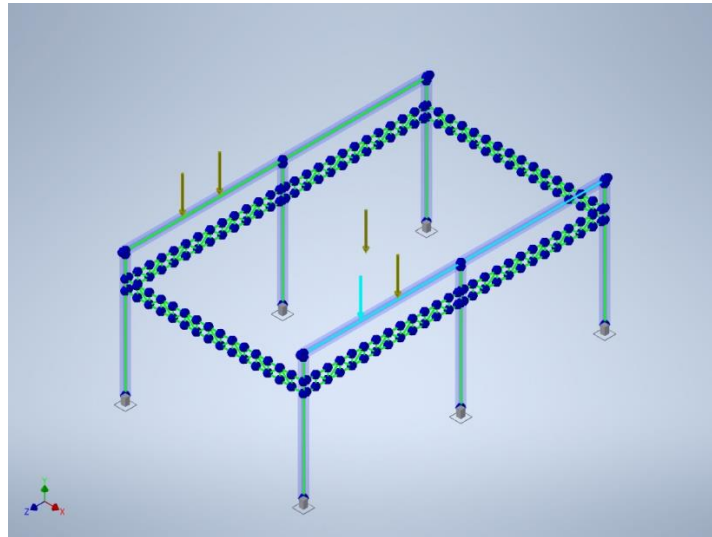
Fuerza:2

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	57340.000 N
Sistema de coordenadas de vigas	No
Ángulo de plano	270.00 deg
Ángulo en plano	90.00 deg
Fx	0.000 N
Fy	-57340.000 N
Fz	0.000 N
Desfase	5237.0

Referencia o referencias seleccionadas**Fuerza:3**

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	57340.000 N
Sistema de coordenadas de vigas	No
Ángulo de plano	270.00 deg
Ángulo en plano	90.00 deg
Fx	0.000 N
Fy	-57340.000 N
Fz	0.000 N
Desfase	3237.0

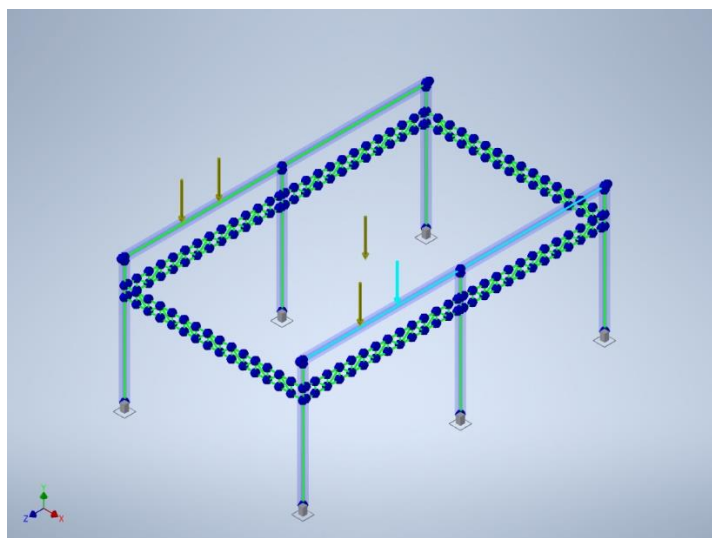
Referencia o referencias seleccionadas



Fuerza:4

Tipo de carga	Fuerza
Magnitud	57340.000 N
Sistema de coordenadas de vigas	No
Ángulo de plano	270.00 deg
Ángulo en plano	90.00 deg
Fx	0.000 N
Fy	-57340.000 N
Fz	0.000 N
Desfase	5237.0

Referencia o referencias seleccionadas



Resultados

Resumen de resultados estáticos

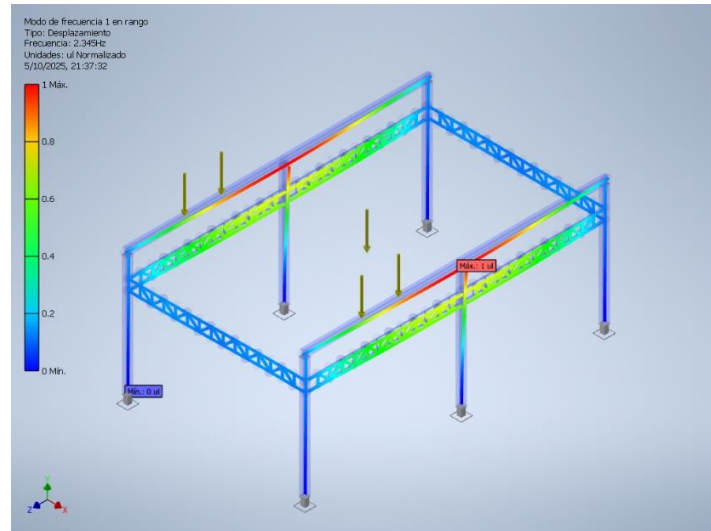
Nombre		Mínimo	Máximo
Desplazamiento		0.000 mm	7.114 mm
Fuerzas	Fx	-1442.399 N	1437.438 N
	Fy	-62047.968 N	63660.282 N
	Fz	-38097.466 N	79812.425 N
Momentos	Mx	-113613550.542 N mm	89428027.766 N mm
	My	-1382601.631 N mm	1381063.041 N mm
	Mz	-11441.506 N mm	11373.341 N mm
Tensiones normales	Smax	-6.506 MPa	57.330 MPa
	Smin	-65.687 MPa	26.104 MPa
	Smax(Mx)	0.000 MPa	61.409 MPa
	Smin(Mx)	-61.409 MPa	-0.000 MPa
	Smax(My)	0.000 MPa	8.493 MPa
	Smin(My)	-8.493 MPa	-0.000 MPa
	Saxial	-6.816 MPa	26.499 MPa
	Tensión de corte	Tx	-0.777 MPa
Ty		-20.654 MPa	19.120 MPa
Tensiones de torsión	T	-0.201 MPa	0.202a

Valor(es) de frecuencia

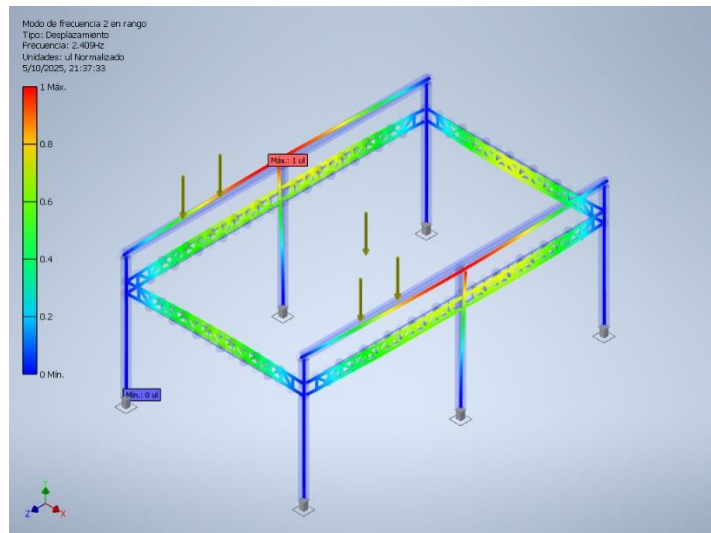
F1	2.34 Hz
F2	2.41 Hz
F3	3.02 Hz
F4	3.43 Hz
F5	4.08 Hz
F6	5.09 Hz
F7	5.20 Hz
F8	5.76 Hz

Figuras

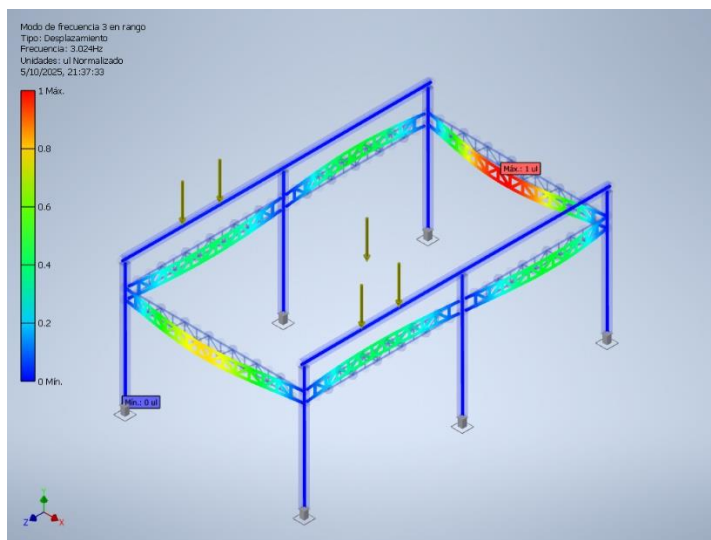
F1 2.34 Hz

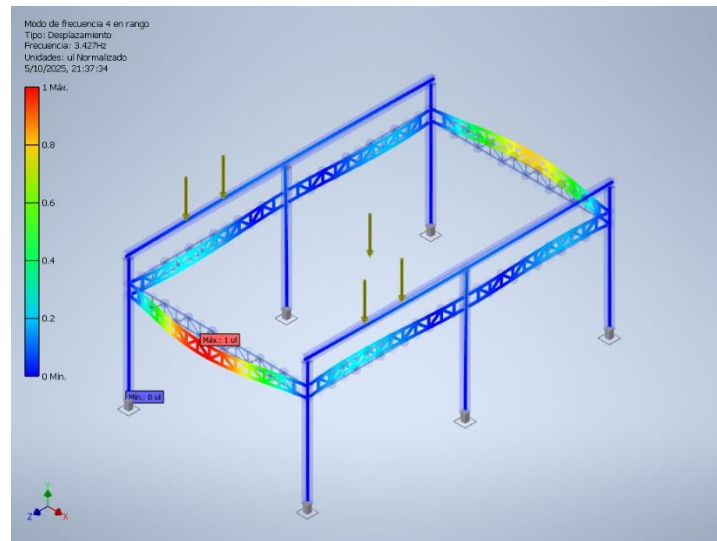
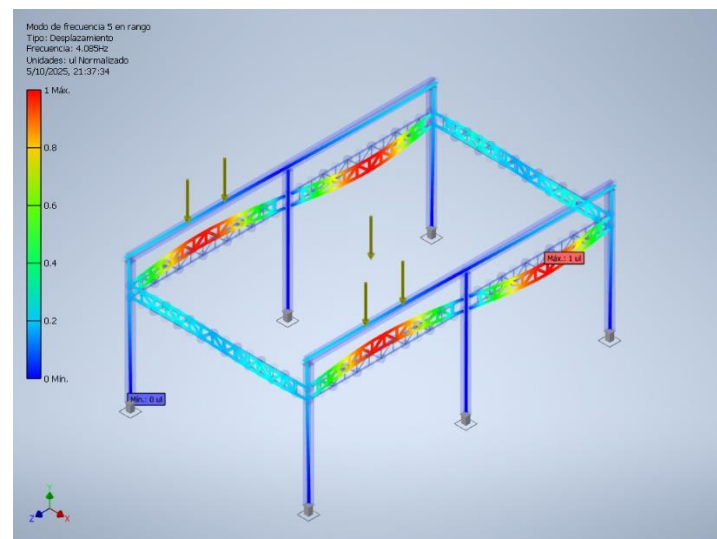
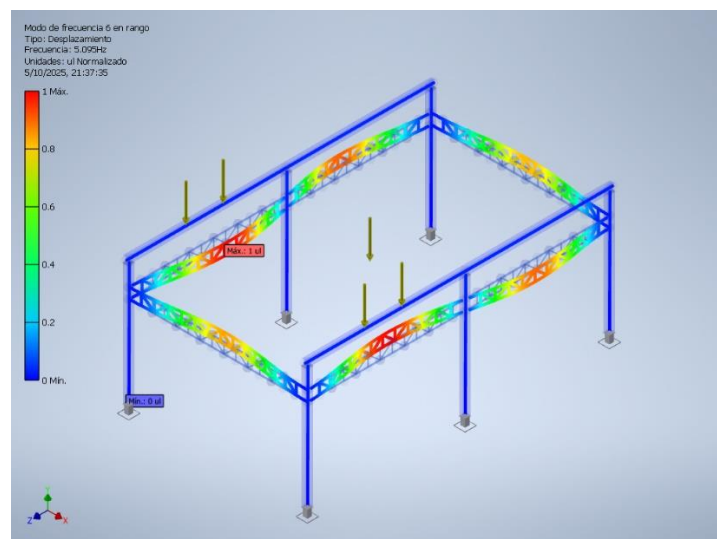


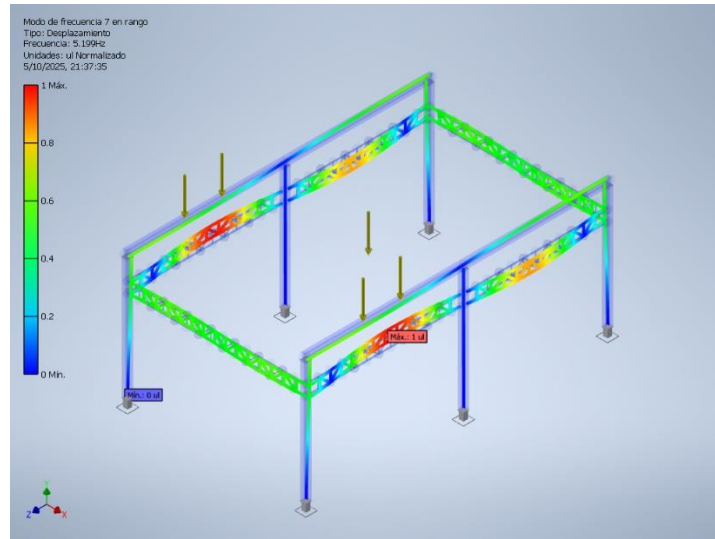
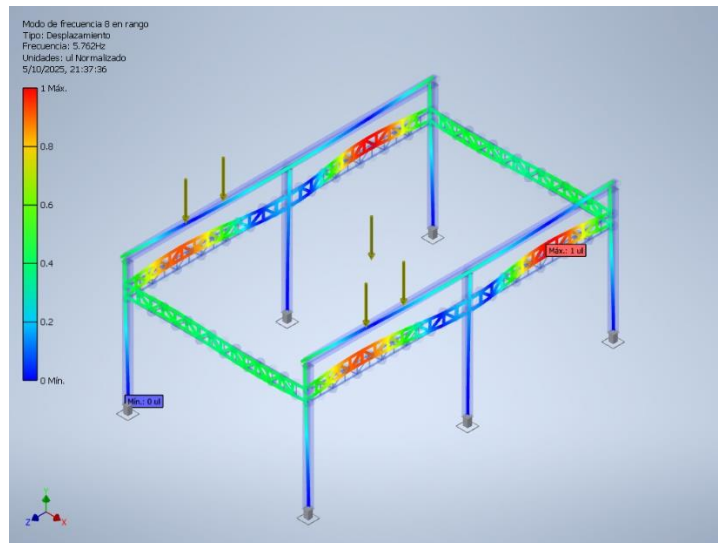
F2 2.41 Hz



F3 3.02 Hz



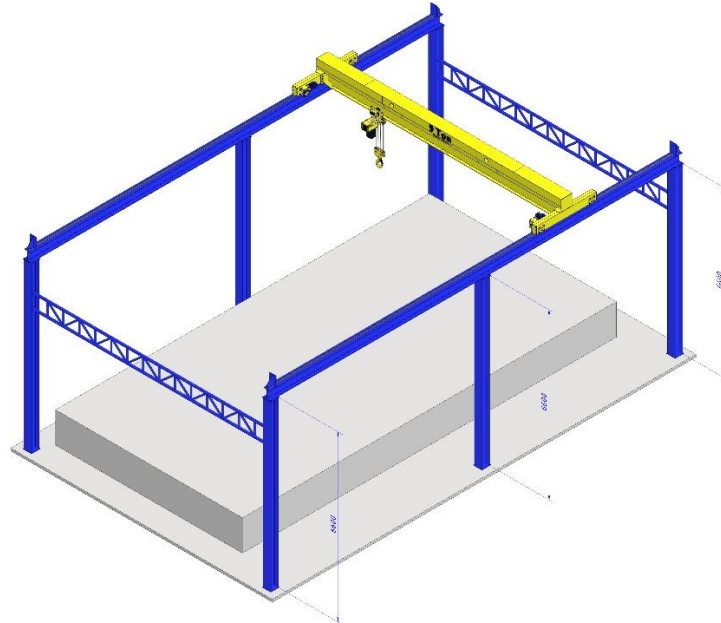
F4 3.43 Hz**F5 4.08 Hz****F6 5.09 Hz**

F7 5.20 Hz**F8 5.76 Hz**

Anexo 13: Estabilidad por Vuelco

Paso 1: Velocidad de diseño del viento

De los planos obtenemos la altura de la columna que es 6.6 m y del mapa eólico del anexo 30 obtenemos la velocidad de 95 km/h.



Así, utilizando la ecuación (75) la velocidad de diseño del viento es:

$$V_h = V \left(\frac{h}{10} \right)^{0.22} = 95 \frac{\text{km}}{\text{h}} \left(\frac{6.6}{10} \right)^{0.22} = 86.701 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Paso 2: Carga exterior del viento

Con la velocidad de diseño del viento, de la figura 20 obtenemos el factor de forma $C = 1.5$. Así, utilizando la ecuación (76):

$$P_h = 0.005C(V_h)^2 = 0.005(1.5)(86.701)^2 = 56.378 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Paso 3: Cálculo de la fuerza cortante por viento

De los planos obtenemos el área de la cara de la columna donde el viento impacta. Así el ancho es 0.312 m y el largo 6.6 m. Por lo tanto, el área es:

$$A = 0.312 \text{ m} (6.6 \text{ m}) = 2.059 \text{ m}^2$$

Con la presión del viento y el área, obtenemos la fuerza cortante por viento:

$$V_v = A \cdot P_h = 2.059 \text{ m}^2 \left(56.378 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right) = 116.082 \text{ kg} = 1.138 \text{ kN}$$

Paso 4: Cálculo de la fuerza cortante por desplazamiento de la carga

De los cálculos anteriores podemos obtener el peso de la viga principal incluyendo el carrito y la carga que es 114.846 kN.

$$N = \frac{114.846 \text{ kN}}{2} = 57.423 \text{ kN}$$

Recordando que la viga se asienta en dos columnas y que la NTP E.020 recomienda considerar la carga horizontal como el 0.20 de la carga vertical:

$$V_d = N(0.20) = 57.423 \text{ kN}(0.20) = 11.485 \text{ kN}$$

Paso 5: Fuerza cortante total

$$V = V_v + V_d = 1.138 \text{ kN} + 11.485 \text{ kN} = 12.623 \text{ kN}$$

Paso 6: Cálculo de los momentos por fuerza cortante y momento cortante total

Debido al cortante por viento y considerando que actúa en la mitad de la viga:

$$M_v = 1.138 \text{ kN} \left(\frac{6.6 \text{ m}}{2} \right) = 3.757 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Debido al cortante por desplazamiento de carga:

$$M_d = 11.485 \text{ kN}(6.6 \text{ m}) = 75.798 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Momento total:

$$M = M_v + M_d = 3.757 \text{ kN} \cdot \text{m} + 75.798 \text{ kN} \cdot \text{m} = 79.555 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Paso 7: Cálculo del peso de la zapata

Considerando una zapata con las siguientes medidas:

Ancho (a): 2 m

Largo (a): 2 m

Alto (h): 1.5 m

Calculamos el volumen de la zapata y multiplicamos por la densidad del concreto considerándola como 2100 kg/m^3 .

$$P = (2m)(2m)(1.5m) \left(2100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 12600 \text{ kg} = 123.564 \text{ kN}$$

Paso 8: Cálculo del momento desestabilizador

Considerando los datos anteriores y la ecuación (77):

$$M_d = M + V \cdot h = 79.555 \text{ kN} \cdot \text{m} + (12.623 \text{ kN})(1.5 \text{ m}) = 98.49 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Paso 9: Cálculo del momento estabilizador

Considerando los datos anteriores y la ecuación (78):

$$M_e = (N + P) \cdot \frac{a}{2} = (57.423 \text{ kN} + 123.564 \text{ kN}) \cdot \frac{(2\text{m})}{2} = 180.987 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Paso 10: Comprobación del factor de seguridad

Considerando que según la NTP E.020 el factor de seguridad debe ser igual o mayor a 1.5 y de la ecuación (79):

$$\frac{M_e}{M_d} = \frac{180.987 \text{ kN} \cdot \text{m}}{98.49 \text{ kN} \cdot \text{m}} = 1.838 \geq 1.5$$

Por lo tanto, la estructura (o las columnas) no falla a volteo.

Anexo 14: Propiedades del acero ASTM A36



PLANCHAS DE ACERO CARBONO

ASTM A36



Estado de Suministro: Laminado

Tolerancia: ASTM A6

Características

Acero estructural de buena soldabilidad, adecuado para la fabricación de vigas soldadas para edificios, estructuras remachadas, y atomilladas, bases de columnas, piezas para puentes y depósitos de combustibles.

Aplicaciones

Construcción de puentes, estanques, estructuras para industrias, edificios, torres y aplicaciones estructurales en general.

Propiedades Mecánicas

Esfuerzo Fluencia		Esfuerzo Tracción		Elongación
(Kg / mm ²)	MPa	(Kg / mm ²)	MPa	%
25,5 (mín.)	250 (mín.)	40,8 (mín.)	400 (mín.)	20 (mín.)

Composición Química (Valores típicos)

% C	% Mn	% Si	% P	% S
≤ 0,26	0,80 - 1,20	≤ 0,40	≤ 0,04	≤ 0,05

Mínimo Radio Interior de Plegado en Frío (**)

Espesor E (mm.)		
Hasta 20 mm. (incl.)	Sobre 20 mm. hasta 25 mm. (incl.)	Sobre 25 mm. hasta 50 mm. (incl.)
1,5 X E	1,5 X E	1,5 X E

(**) Los parámetros de plegado indicados son perpendiculares al sentido de laminación de la placa.

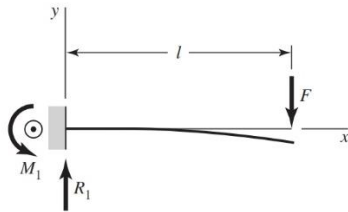
Los valores de las tablas son referenciales.



Santiago: Fray Camilo N° 781, Santiago. T: (02) 889 6000. -Av. 10 de Julio N° 202, Santiago. T: (02) 889 6140. -Panamericana Norte N° 6080, Quilicura. T: (02) 889 6080. -Traslaviña N° 1516, San Miguel. T: (02) 889 6170.
Antofagasta: Av. Pedro Aguirre Cerda N° 7277. T: (55) 682 500. **Vina del Mar:** Quilota N° 636. T: (32) 269 8823. **Concepción:** Paicavi N° 2677. T: (41) 226 2700. **Puerto Montt:** Ruta 5 Sur N° 552, Camino Pargua. T: (65) 493 300.

Anexo 15: Tabla A9 del libro Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley

1 En voladizo: carga en extremo

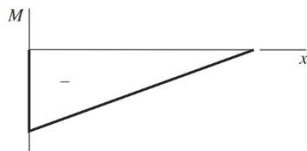
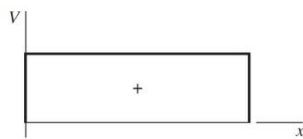


$$R_1 = V = F \quad M_1 = Fl$$

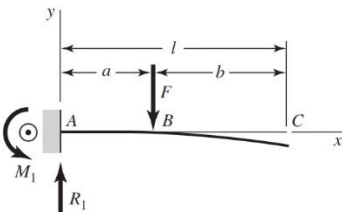
$$M = F(x - l)$$

$$y = \frac{Fx^2}{6EI}(x - 3l)$$

$$y_{\text{máx}} = -\frac{Fl^3}{3EI}$$



2 En voladizo: carga intermedia



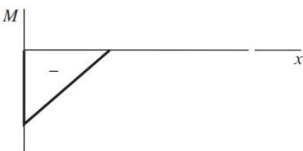
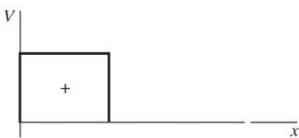
$$R_1 = V = F \quad M_1 = Fa$$

$$M_{AB} = F(x - a) \quad M_{BC} = 0$$

$$y_{AB} = \frac{Fx^2}{6EI}(x - 3a)$$

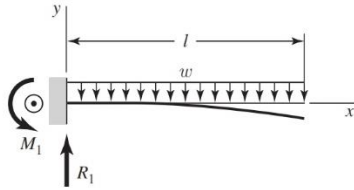
$$y_{BC} = \frac{Fa^2}{6EI}(a - 3x)$$

$$y_{\text{máx}} = \frac{Fa^2}{6EI}(a - 3l)$$



(continúa)

3 En voladizo: carga uniforme

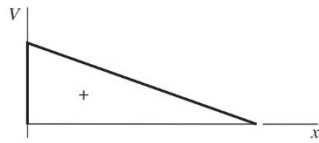


$$R_1 = wl \quad M_1 = \frac{wl^2}{2}$$

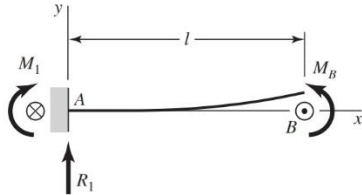
$$V = w(l-x) \quad M = -\frac{w}{2}(l-x)^2$$

$$y = \frac{wx^2}{24EI}(4lx - x^2 - 6l^2)$$

$$y_{\text{máx}} = -\frac{wl^4}{8EI}$$

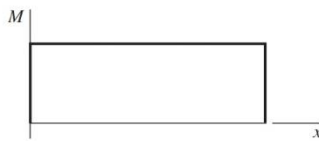
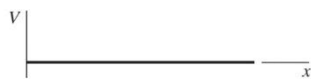


4 En voladizo: carga de momento

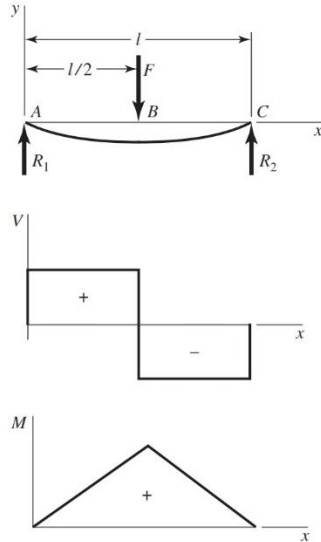


$$R_1 = V = 0 \quad M_1 = M = M_B$$

$$y = \frac{M_B x^2}{2EI} \quad y_{\text{máx}} = \frac{M_B l^2}{2EI}$$



5 Apoyos simples: carga central



$$R_1 = R_2 = \frac{F}{2}$$

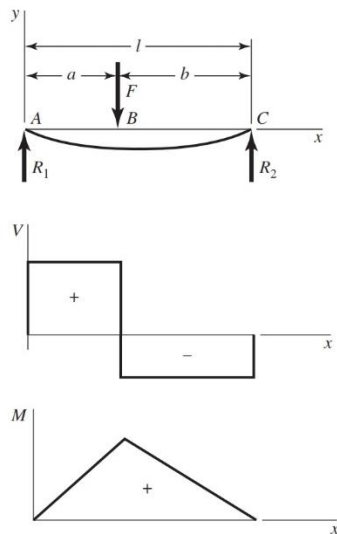
$$V_{AB} = R_1 \quad V_{BC} = -R_2$$

$$M_{AB} = \frac{Fx}{2} \quad M_{BC} = \frac{F}{2}(l-x)$$

$$y_{AB} = \frac{Fx}{48EI}(4x^2 - 3l^2)$$

$$y_{\text{máx}} = -\frac{Fl^3}{48EI}$$

6 Apoyos simples: carga intermedia



$$R_1 = \frac{Fb}{l} \quad R_2 = \frac{Fa}{l}$$

$$V_{AB} = R_1 \quad V_{BC} = -R_2$$

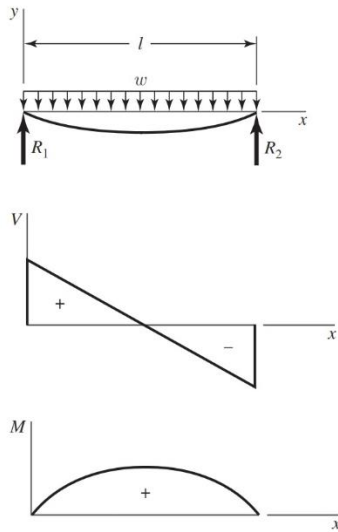
$$M_{AB} = \frac{Fbx}{l} \quad M_{BC} = \frac{Fa}{l}(l-x)$$

$$y_{AB} = \frac{Fbx}{6EI}(x^2 + b^2 - l^2)$$

$$y_{BC} = \frac{Fa(l-x)}{6EI}(x^2 + a^2 - 2lx)$$

(continúa)

7 Apoyos simples: carga uniforme



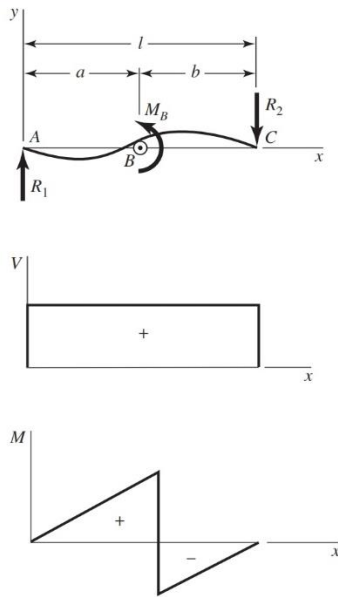
$$R_1 = R_2 = \frac{wl}{2} \quad V = \frac{wl}{2} - wx$$

$$M = \frac{wx}{2}(l - x)$$

$$y = \frac{wx}{24EI}(2lx^2 - x^3 - l^3)$$

$$y_{\text{máx}} = -\frac{5wl^4}{384EI}$$

8 Apoyos simples: carga de momento



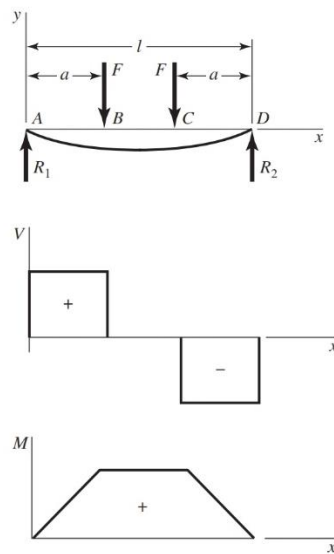
$$R_1 = R_2 = \frac{M_B}{l} \quad V = \frac{M_B}{l}$$

$$M_{AB} = \frac{M_B x}{l} \quad M_{BC} = \frac{M_B}{l}(x - l)$$

$$y_{AB} = \frac{M_B x}{6EI}(x^2 + 3a^2 - 6al + 2l^2)$$

$$y_{BC} = \frac{M_B}{6EI}[x^3 - 3lx^2 + x(2l^2 + 3a^2) - 3a^2l]$$

9 Apoyos simples: cargas idénticas



$$R_1 = R_2 = F \quad V_{AB} = F \quad V_{BC} = 0$$

$$V_{CD} = -F$$

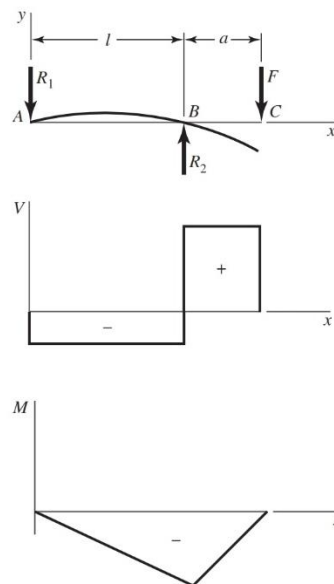
$$M_{AB} = Fx \quad M_{BC} = Fa \quad M_{CD} = F(l-x)$$

$$y_{AB} = \frac{Fx}{6EI}(x^2 + 3a^2 - 3la)$$

$$y_{BC} = \frac{Fa}{6EI}(3x^2 + a^2 - 3lx)$$

$$y_{\max} = \frac{Fa}{24EI}(4a^2 - 3l^2)$$

10 Apoyos simples: carga en voladizo



$$R_1 = \frac{Fa}{l} \quad R_2 = \frac{F}{l}(l+a)$$

$$V_{AB} = -\frac{Fa}{l} \quad V_{BC} = F$$

$$M_{AB} = -\frac{Fax}{l} \quad M_{BC} = F(x-l-a)$$

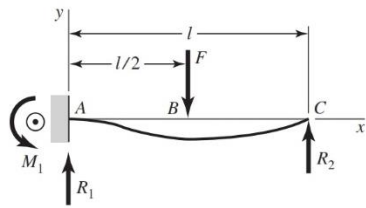
$$y_{AB} = \frac{Fax}{6EI}(l^2 - x^2)$$

$$y_{BC} = \frac{F(x-l)}{6EI}[(x-l)^2 - a(3x-l)]$$

$$y_C = -\frac{Fa^2}{3EI}(l+a)$$

(continúa)

11 Un apoyo fijo y el otro simple: carga central



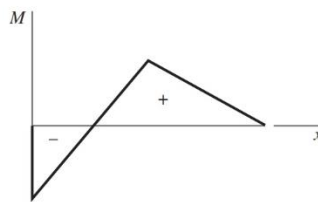
$$R_1 = \frac{11F}{16} \quad R_2 = \frac{5F}{16} \quad M_1 = \frac{3Fl}{16}$$

$$V_{AB} = R_1 \quad V_{BC} = -R_2$$

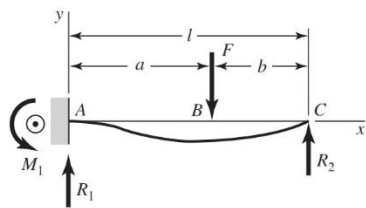
$$M_{AB} = \frac{F}{16}(11x - 3l) \quad M_{BC} = \frac{5F}{16}(l - x)$$

$$y_{AB} = \frac{Fx^2}{96EI}(11x - 9l)$$

$$y_{BC} = \frac{F(l-x)}{96EI}(5x^2 + 2l^2 - 10lx)$$



12 Un apoyo fijo y el otro simple: carga intermedia



$$R_1 = \frac{Fb}{2l^3}(3l^2 - b^2) \quad R_2 = \frac{Fa^2}{2l^3}(3l - a)$$

$$M_1 = \frac{Fb}{2l^2}(l^2 - b^2)$$

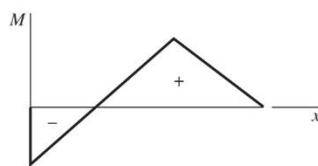
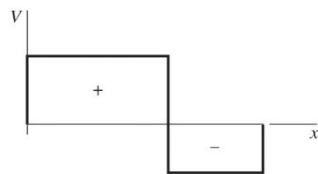
$$V_{AB} = R_1 \quad V_{BC} = -R_2$$

$$M_{AB} = \frac{Fb}{2l^3}[b^2l - l^3 + x(3l^2 - b^2)]$$

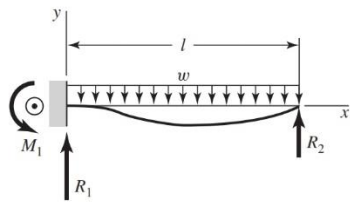
$$M_{BC} = \frac{Fa^2}{2l^3}(3l^2 - 3lx - al + ax)$$

$$y_{AB} = \frac{Fbx^2}{12EI l^3}[3l(b^2 - l^2) + x(3l^2 - b^2)]$$

$$y_{BC} = y_{AB} - \frac{F(x-a)^3}{6EI}$$



13 Un apoyo fijo y el otro simple: carga uniforme

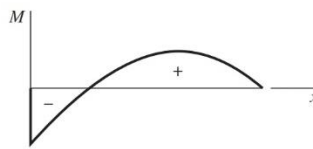
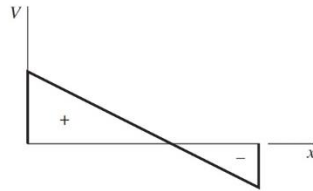


$$R_1 = \frac{5wl}{8} \quad R_2 = \frac{3wl}{8} \quad M_1 = \frac{wl^2}{8}$$

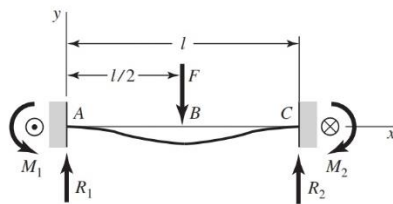
$$V = \frac{5wl}{8} - wx$$

$$M = -\frac{w}{8}(4x^2 - 5lx + l^2)$$

$$y = \frac{wx^2}{48EI}(l-x)(2x-3l)$$



14 Apoyos fijos: carga central



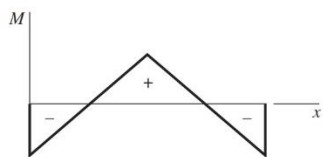
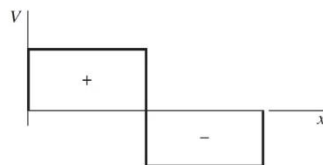
$$R_1 = R_2 = \frac{F}{2} \quad M_1 = M_2 = \frac{Fl}{8}$$

$$V_{AB} = -V_{BC} = \frac{F}{2}$$

$$M_{AB} = \frac{F}{8}(4x - l) \quad M_{BC} = \frac{F}{8}(3l - 4x)$$

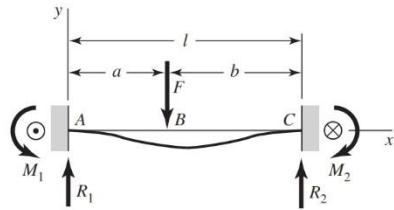
$$y_{AB} = \frac{Fx^2}{48EI}(4x - 3l)$$

$$y_{\text{máx}} = -\frac{Fl^3}{192EI}$$



(continúa)

15 Un apoyo fijo y el otro simple: carga central



$$R_1 = \frac{Fb^2}{l^3}(3a + b) \quad R_2 = \frac{Fa^2}{l^3}(3b + a)$$

$$M_1 = \frac{Fab^2}{l^2} \quad M_2 = \frac{Fa^2b}{l^2}$$

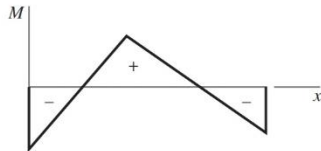
$$V_{AB} = R_1 \quad V_{BC} = -R_2$$

$$M_{AB} = \frac{Fb^2}{l^3}[x(3a + b) - al]$$

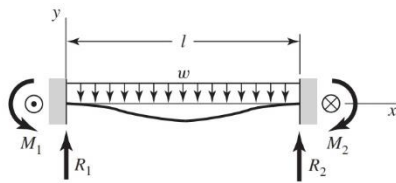
$$M_{BC} = M_{AB} - F(x - a)$$

$$y_{AB} = \frac{Fb^2x^2}{6EI l^3}[x(3a + b) - 3al]$$

$$y_{BC} = \frac{Fa^2(l - x)^2}{6EI l^3}[(l - x)(3b + a) - 3bl]$$



16 Un apoyo fijo y el otro simple: carga intermedia



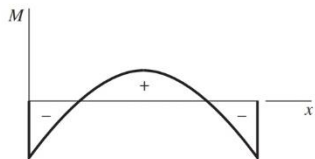
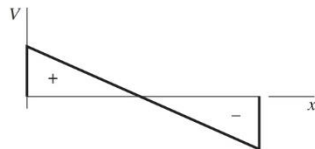
$$R_1 = R_2 = \frac{wl}{2} \quad M_1 = M_2 = \frac{wl^2}{12}$$

$$V = \frac{w}{2}(l - 2x)$$

$$M = \frac{w}{12}(6lx - 6x^2 - l^2)$$

$$y = -\frac{wx^2}{24EI}(l - x)^2$$

$$y_{\text{máx}} = -\frac{wl^4}{384EI}$$



Anexo 16: Propiedades perfiles W de la AISC

1-20

DIMENSIONS AND PROPERTIES

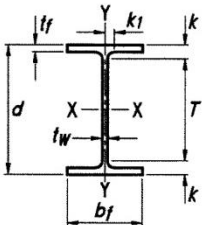



Table 1-1 (continued)
W-Shapes
Dimensions

Shape	Area, A in. ²	Depth, d in.		Web			Flange				Distance			Workable Gage	
				Thickness, t _w in.	t _w /2 in.	Width, b _f in.	Thickness, t _f in.	k		k ₁ in.	T in.				
								k _{des} in.	k _{det} in.						
W21×93	27.3	21.6	21 ⁵ / ₈	0.580	⁹ / ₁₆	⁵ / ₁₆	8.42	8 ³ / ₈	0.930	¹⁵ / ₁₆	1.43	¹⁵ / ₈	¹⁵ / ₁₆	18 ³ / ₈	5 ¹ / ₂
×83 ^c	24.4	21.4	21 ³ / ₈	0.515	¹ / ₂	¹ / ₄	8.36	8 ³ / ₈	0.835	¹³ / ₁₆	1.34	1 ¹ / ₂	⁷ / ₈		
×73 ^c	21.5	21.2	21 ¹ / ₄	0.455	⁷ / ₁₆	¹ / ₄	8.30	8 ¹ / ₄	0.740	³ / ₄	1.24	1 ⁷ / ₁₆	⁷ / ₈		
×68 ^c	20.0	21.1	21 ¹ / ₈	0.430	⁷ / ₁₆	¹ / ₄	8.27	8 ¹ / ₄	0.685	¹¹ / ₁₆	1.19	1 ³ / ₈	⁷ / ₈		
×62 ^c	18.3	21.0	21	0.400	³ / ₈	³ / ₁₆	8.24	8 ¹ / ₄	0.615	⁵ / ₈	1.12	1 ⁵ / ₁₆	¹³ / ₁₆		
×55 ^c	16.2	20.8	20 ³ / ₄	0.375	³ / ₈	³ / ₁₆	8.22	8 ¹ / ₄	0.522	¹ / ₂	1.02	1 ³ / ₁₆	¹³ / ₁₆		
×48 ^{c,f}	14.1	20.6	20 ⁵ / ₈	0.350	³ / ₈	³ / ₁₆	8.14	8 ¹ / ₈	0.430	⁷ / ₁₆	0.930	1 ¹ / ₈	¹³ / ₁₆		
W21×57 ^c	16.7	21.1	21	0.405	³ / ₈	³ / ₁₆	6.56	6 ¹ / ₂	0.650	⁵ / ₈	1.15	1 ⁵ / ₁₆	¹³ / ₁₆	18 ³ / ₈	3 ¹ / ₂
×50 ^c	14.7	20.8	20 ⁷ / ₈	0.380	³ / ₈	³ / ₁₆	6.53	6 ¹ / ₂	0.535	⁹ / ₁₆	1.04	1 ¹ / ₄	¹³ / ₁₆		
×44 ^c	13.0	20.7	20 ⁵ / ₈	0.350	³ / ₈	³ / ₁₆	6.50	6 ¹ / ₂	0.450	⁷ / ₁₆	0.950	1 ¹ / ₈	¹³ / ₁₆		
W18×311 ^h	91.6	22.3	22 ³ / ₈	1.52	¹ / ₂	³ / ₄	12.0	12	2.74	2 ³ / ₄	3.24	3 ⁷ / ₁₆	1 ³ / ₈	15 ¹ / ₂	5 ¹ / ₂
×283 ^h	83.3	21.9	21 ⁷ / ₈	1.40	¹ / ₂	¹¹ / ₁₆	11.9	11 ⁷ / ₈	2.50	2 ¹ / ₂	3.00	3 ³ / ₁₆	1 ⁵ / ₁₆		
×258 ^h	76.0	21.5	21 ¹ / ₂	1.28	¹ / ₂	⁵ / ₈	11.8	11 ³ / ₄	2.30	2 ⁵ / ₁₆	2.70	3	1 ¹ / ₄		
×234 ^h	68.6	21.1	21	1.16	¹ / ₂	¹ / ₂	11.7	11 ⁵ / ₈	2.11	2 ¹ / ₈	2.51	2 ³ / ₄	1 ³ / ₁₆		
×211	62.3	20.7	20 ⁵ / ₈	1.06	¹ / ₂	⁹ / ₁₆	11.6	11 ¹ / ₂	1.91	1 ¹⁵ / ₁₆	2.31	2 ⁹ / ₁₆	1 ³ / ₁₆		
×192	56.2	20.4	20 ³ / ₈	0.960	¹⁵ / ₁₆	¹ / ₂	11.5	11 ¹ / ₂	1.75	1 ³ / ₄	2.15	2 ⁷ / ₁₆	1 ¹ / ₈		
×175	51.4	20.0	20	0.890	⁷ / ₈	⁷ / ₁₆	11.4	11 ³ / ₈	1.59	1 ⁹ / ₁₆	1.99	2 ⁷ / ₁₆	1 ¹ / ₄	15 ¹ / ₈	
×158	46.3	19.7	19 ³ / ₄	0.810	¹³ / ₁₆	⁷ / ₁₆	11.3	11 ¹ / ₄	1.44	1 ⁷ / ₁₆	1.84	2 ³ / ₈	1 ¹ / ₄		
×143	42.0	19.5	19 ¹ / ₂	0.730	³ / ₄	³ / ₈	11.2	11 ¹ / ₄	1.32	1 ⁵ / ₁₆	1.72	2 ³ / ₁₆	1 ³ / ₁₆		
×130	38.3	19.3	19 ¹ / ₄	0.670	¹ / ₂	³ / ₈	11.2	11 ¹ / ₈	1.20	1 ³ / ₁₆	1.60	2 ¹ / ₁₆	1 ³ / ₁₆		
×119	35.1	19.0	19	0.655	⁵ / ₈	⁵ / ₁₆	11.3	11 ¹ / ₄	1.06	1 ¹ / ₁₆	1.46	1 ¹⁵ / ₁₆	1 ³ / ₁₆		
×106	31.1	18.7	18 ³ / ₄	0.590	⁹ / ₁₆	⁵ / ₁₆	11.2	11 ¹ / ₄	0.940	¹⁵ / ₁₆	1.34	1 ¹³ / ₁₆	1 ¹ / ₈		
×97	28.5	18.6	18 ³ / ₈	0.535	⁹ / ₁₆	⁵ / ₁₆	11.1	11 ¹ / ₈	0.870	⁷ / ₈	1.27	1 ³ / ₄	1 ¹ / ₈		
×86	25.3	18.4	18 ³ / ₈	0.480	¹ / ₂	¹ / ₄	11.1	11 ¹ / ₈	0.770	³ / ₄	1.17	1 ⁵ / ₈	1 ¹ / ₁₆		
×76 ^c	22.3	18.2	18 ¹ / ₄	0.425	⁷ / ₁₆	¹ / ₄	11.0	11	0.680	¹¹ / ₁₆	1.08	1 ⁹ / ₁₆	1 ¹ / ₁₆		
W18×71	20.9	18.5	18 ¹ / ₂	0.495	¹ / ₂	¹ / ₄	7.64	7 ⁵ / ₈	0.810	¹³ / ₁₆	1.21	1 ¹ / ₂	⁷ / ₈	15 ¹ / ₂	3 ¹ / ₂ ^g
×65	19.1	18.4	18 ³ / ₈	0.450	⁷ / ₁₆	¹ / ₄	7.59	7 ⁵ / ₈	0.750	³ / ₄	1.15	1 ⁷ / ₁₆	⁷ / ₈		
×60 ^c	17.6	18.2	18 ¹ / ₄	0.415	⁷ / ₁₆	¹ / ₄	7.56	7 ¹ / ₂	0.695	¹ / ₂	1.10	1 ³ / ₈	¹³ / ₁₆		
×55 ^c	16.2	18.1	18 ¹ / ₈	0.390	³ / ₈	³ / ₁₆	7.53	7 ¹ / ₂	0.630	⁵ / ₈	1.03	1 ⁵ / ₁₆	¹³ / ₁₆		
×50 ^c	14.7	18.0	18	0.355	³ / ₈	³ / ₁₆	7.50	7 ¹ / ₂	0.570	⁹ / ₁₆	0.972	1 ¹ / ₄	¹³ / ₁₆		
W18×46 ^c	13.5	18.1	18	0.360	³ / ₈	³ / ₁₆	6.06	6	0.605	⁵ / ₈	1.01	1 ¹ / ₄	¹³ / ₁₆	15 ¹ / ₂	3 ¹ / ₂ ^g
×40 ^c	11.8	17.9	17 ⁷ / ₈	0.315	⁵ / ₁₆	³ / ₁₆	6.02	6	0.525	¹ / ₂	0.927	1 ³ / ₁₆	¹³ / ₁₆		
×35 ^c	10.3	17.7	17 ³ / ₄	0.300	⁵ / ₁₆	³ / ₁₆	6.00	6	0.425	⁷ / ₁₆	0.827	1 ¹ / ₈	³ / ₄		

^c Shape is slender for compression with F_y = 50 ksi.
^f Shape exceeds compact limit for flexure with F_y = 50 ksi.
^g The actual size, combination and orientation of fastener components should be compared with the geometry of the cross section to ensure compatibility.
^h Flange thickness greater than 2 in. Special requirements may apply per AISC Specification Section A3.1c.

Table 1-1 (continued) W-Shapes Properties														 W21-W18	
Nom- inal Wt.	Compact Section Criteria		Axis X-X				Axis Y-Y				r_{ts}	h_o	Torsional Properties		
	b_f 2 t_f	h t_w	I in. ⁴	S in. ³	r in.	Z in. ³	I in. ⁴	S in. ³	r in.	Z in. ³			J in. ⁴	C_w in. ⁶	
93	4.53	32.3	2070	192	8.70	221	92.9	22.1	1.84	34.7	2.24	20.7	6.03	9940	
83	5.00	36.4	1830	171	8.67	196	81.4	19.5	1.83	30.5	2.21	20.6	4.34	8630	
73	5.60	41.2	1600	151	8.64	172	70.6	17.0	1.81	26.6	2.19	20.5	3.02	7410	
68	6.04	43.6	1480	140	8.60	160	64.7	15.7	1.80	24.4	2.17	20.4	2.45	6760	
62	6.70	46.9	1330	127	8.54	144	57.5	14.0	1.77	21.7	2.15	20.4	1.83	5960	
55	7.87	50.0	1140	110	8.40	126	48.4	11.8	1.73	18.4	2.11	20.3	1.24	4980	
48	9.47	53.6	959	93.0	8.24	107	38.7	9.52	1.66	14.9	2.05	20.2	0.803	3950	
57	5.04	46.3	1170	111	8.36	129	30.6	9.35	1.35	14.8	1.68	20.5	1.77	3190	
50	6.10	49.4	984	94.5	8.18	110	24.9	7.64	1.30	12.2	1.64	20.3	1.14	2570	
44	7.22	53.6	843	81.6	8.06	95.4	20.7	6.37	1.26	10.2	1.60	20.3	0.770	2110	
311	2.19	10.4	6970	624	8.72	754	795	132	2.95	207	3.53	19.6	176	76200	
283	2.38	11.3	6170	565	8.61	676	704	118	2.91	185	3.47	19.4	134	65900	
258	2.56	12.5	5510	514	8.53	611	628	107	2.88	166	3.42	19.2	103	57600	
234	2.76	13.8	4900	466	8.44	549	558	95.8	2.85	149	3.37	19.0	78.7	50100	
211	3.02	15.1	4330	419	8.35	490	493	85.3	2.82	132	3.32	18.8	58.6	43400	
192	3.27	16.7	3870	380	8.28	442	440	76.8	2.79	119	3.28	18.7	44.7	38000	
175	3.58	18.0	3450	344	8.20	398	391	68.8	2.76	106	3.24	18.4	33.8	33300	
158	3.92	19.8	3060	310	8.12	356	347	61.4	2.74	94.8	3.20	18.3	25.2	29000	
143	4.25	22.0	2750	282	8.09	322	311	55.5	2.72	85.4	3.17	18.2	19.2	25700	
130	4.65	23.9	2460	256	8.03	290	278	49.9	2.70	76.7	3.13	18.1	14.5	22700	
119	5.31	24.5	2190	231	7.90	262	253	44.9	2.69	69.1	3.13	17.9	10.6	20300	
106	5.96	27.2	1910	204	7.84	230	220	39.4	2.66	60.5	3.10	17.8	7.48	17400	
97	6.41	30.0	1750	188	7.82	211	201	36.1	2.65	55.3	3.08	17.7	5.86	15800	
86	7.20	33.4	1530	166	7.77	186	175	31.6	2.63	48.4	3.05	17.6	4.10	13600	
76	8.11	37.8	1330	146	7.73	163	152	27.6	2.61	42.2	3.02	17.5	2.83	11700	
71	4.71	32.4	1170	127	7.50	146	60.3	15.8	1.70	24.7	2.05	17.7	3.49	4700	
65	5.06	35.7	1070	117	7.49	133	54.8	14.4	1.69	22.5	2.03	17.7	2.73	4240	
60	5.44	38.7	984	108	7.47	123	50.1	13.3	1.68	20.6	2.02	17.5	2.17	3850	
55	5.98	41.1	890	98.3	7.41	112	44.9	11.9	1.67	18.5	2.00	17.5	1.66	3430	
50	6.57	45.2	800	88.9	7.38	101	40.1	10.7	1.65	16.6	1.98	17.4	1.24	3040	
46	5.01	44.6	712	78.8	7.25	90.7	22.5	7.43	1.29	11.7	1.58	17.5	1.22	1720	
40	5.73	50.9	612	68.4	7.21	78.4	19.1	6.35	1.27	10.0	1.56	17.4	0.810	1440	
35	7.06	53.5	510	57.6	7.04	66.5	15.3	5.12	1.22	8.06	1.51	17.3	0.506	1140	

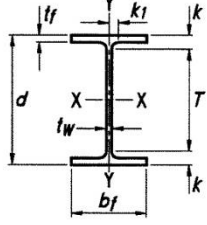



Table 1-1 (continued)
W-Shapes
Dimensions

Shape	Area, A	Depth, d	Web		Flange				Distance				Work-able Gage	
			Thickness, t _w	t _w / 2	Width, b _f	Thickness, t _f	k		k ₁	T				
							k _{des}	k _{det}			in.	in.		
in. ²	in.	in.	in.	in.	in.	in.	in.	in.	in.	in.	in.			
W14×132	38.8	14.7	14 ⁵ / ₈	0.645	⁵ / ₈	14.7	14 ³ / ₄	1.03	1	1.63	2 ⁵ / ₁₆	19 ¹ / ₁₆	10	5 ¹ / ₂
×120	35.3	14.5	14 ¹ / ₂	0.590	⁹ / ₁₆	14.7	14 ⁵ / ₈	0.940	¹⁵ / ₁₆	1.54	2 ¹ / ₄	1 ¹ / ₂		
×109	32.0	14.3	14 ³ / ₈	0.525	¹ / ₂	14.6	14 ⁵ / ₈	0.860	⁷ / ₈	1.46	2 ³ / ₁₆	1 ¹ / ₂		
×99 ^f	29.1	14.2	14 ¹ / ₈	0.485	¹ / ₂	14.6	14 ⁵ / ₈	0.780	³ / ₄	1.38	2 ¹ / ₁₆	1 ⁷ / ₁₆		
×90 ^f	26.5	14.0	14	0.440	⁷ / ₁₆	14.5	14 ¹ / ₂	0.710	¹¹ / ₁₆	1.31	2	1 ⁷ / ₁₆		
W14×82	24.0	14.3	14 ¹ / ₄	0.510	¹ / ₂	10.1	10 ¹ / ₈	0.855	⁷ / ₈	1.45	1 ¹¹ / ₁₆	1 ¹ / ₁₆	10 ⁷ / ₈	5 ¹ / ₂
×74	21.8	14.2	14 ¹ / ₈	0.450	⁷ / ₁₆	10.1	10 ¹ / ₈	0.785	¹³ / ₁₆	1.38	1 ⁵ / ₈	1 ¹ / ₁₆		
×68	20.0	14.0	14	0.415	⁷ / ₁₆	10.0	10	0.720	³ / ₄	1.31	1 ⁹ / ₁₆	1 ¹ / ₁₆		
×61	17.9	13.9	13 ⁷ / ₈	0.375	³ / ₈	10.0	10	0.645	⁵ / ₈	1.24	1 ¹ / ₂	1		
W14×53	15.6	13.9	13 ⁷ / ₈	0.370	³ / ₈	8.06	8	0.660	¹¹ / ₁₆	1.25	1 ¹ / ₂	1	10 ⁷ / ₈	5 ¹ / ₂
×48	14.1	13.8	13 ³ / ₄	0.340	⁵ / ₁₆	8.03	8	0.595	⁵ / ₈	1.19	1 ⁷ / ₁₆	1		
×43 ^c	12.6	13.7	13 ⁵ / ₈	0.305	⁵ / ₁₆	8.00	8	0.530	¹ / ₂	1.12	1 ³ / ₈	1		
W14×38 ^c	11.2	14.1	14 ¹ / ₈	0.310	⁵ / ₁₆	6.77	6 ³ / ₄	0.515	¹ / ₂	0.915	1 ¹ / ₄	¹³ / ₁₆	11 ⁵ / ₈	3 ¹ / ₂ ^g
×34 ^c	10.0	14.0	14	0.285	⁵ / ₁₆	6.75	6 ³ / ₄	0.455	⁷ / ₁₆	0.855	1 ³ / ₁₆	³ / ₄		3 ¹ / ₂
×30 ^c	8.85	13.8	13 ⁷ / ₈	0.270	¹ / ₄	6.73	6 ³ / ₄	0.385	³ / ₈	0.785	1 ¹ / ₈	³ / ₄		3 ¹ / ₂
W14×26 ^c	7.69	13.9	13 ⁷ / ₈	0.255	¹ / ₄	5.03	5	0.420	⁷ / ₁₆	0.820	1 ¹ / ₈	³ / ₄	11 ⁵ / ₈	2 ³ / ₄ ^g
×22 ^c	6.49	13.7	13 ³ / ₄	0.230	¹ / ₄	5.00	5	0.335	⁵ / ₁₆	0.735	1 ¹ / ₁₆	³ / ₄	11 ⁵ / ₈	2 ³ / ₄ ^g
W12×336 ^h	98.9	16.8	16 ⁷ / ₈	1.78	1 ³ / ₄	13.4	13 ³ / ₈	2.96	2 ¹⁵ / ₁₆	3.55	3 ⁷ / ₈	1 ¹¹ / ₁₆	9 ¹ / ₈	5 ¹ / ₂
×305 ^h	89.5	16.3	16 ³ / ₈	1.63	¹⁵ / ₈	13.2	13 ¹ / ₄	2.71	2 ¹¹ / ₁₆	3.30	3 ⁵ / ₈	1 ⁵ / ₈		
×279 ^h	81.9	15.9	15 ⁷ / ₈	1.53	1 ¹ / ₂	13.1	13 ¹ / ₈	2.47	2 ¹ / ₂	3.07	3 ³ / ₈	1 ⁵ / ₈		
×252 ^h	74.1	15.4	15 ³ / ₈	1.40	¹³ / ₈	13.0	13	2.25	2 ¹ / ₄	2.85	3 ¹ / ₈	1 ¹ / ₂		
×230 ^h	67.7	15.1	15	1.29	¹⁵ / ₁₆	12.9	12 ⁷ / ₈	2.07	2 ¹ / ₁₆	2.67	2 ¹⁵ / ₁₆	1 ¹ / ₂		
×210	61.8	14.7	14 ³ / ₄	1.18	¹³ / ₁₆	12.8	12 ³ / ₄	1.90	¹ / ₈	2.50	2 ¹³ / ₁₆	1 ⁷ / ₁₆		
×190	56.0	14.4	14 ³ / ₈	1.06	¹¹ / ₁₆	12.7	12 ⁵ / ₈	1.74	¹ / ₄	2.33	2 ⁵ / ₈	¹³ / ₈		
×170	50.0	14.0	14	0.960	¹⁵ / ₁₆	12.6	12 ⁵ / ₈	1.56	⁹ / ₁₆	2.16	2 ⁷ / ₁₆	1 ⁵ / ₁₆		
×152	44.7	13.7	13 ³ / ₄	0.870	⁷ / ₈	12.5	12 ¹ / ₂	1.40	¹ / ₄	2.00	2 ⁵ / ₁₆	1 ¹ / ₄		
×136	39.9	13.4	13 ³ / ₈	0.790	¹³ / ₁₆	12.4	12 ³ / ₈	1.25	1 ¹ / ₄	1.85	2 ¹ / ₈	1 ¹ / ₄		
×120	35.2	13.1	13 ¹ / ₈	0.710	¹¹ / ₁₆	12.3	12 ³ / ₈	1.11	1 ¹ / ₈	1.70	2	¹³ / ₁₆		
×106	31.2	12.9	12 ⁷ / ₈	0.610	⁵ / ₈	12.2	12 ¹ / ₄	0.990	1	1.59	1 ⁷ / ₈	1 ¹ / ₈		
×96	28.2	12.7	12 ³ / ₄	0.550	⁹ / ₁₆	12.2	12 ¹ / ₈	0.900	⁷ / ₈	1.50	1 ¹³ / ₁₆	1 ¹ / ₈		
×87	25.6	12.5	12 ¹ / ₂	0.515	¹ / ₂	12.1	12 ¹ / ₈	0.810	¹³ / ₁₆	1.41	1 ¹¹ / ₁₆	1 ¹ / ₁₆		
×79	23.2	12.4	12 ³ / ₈	0.470	¹ / ₂	12.1	12 ¹ / ₈	0.735	³ / ₄	1.33	1 ⁵ / ₈	1 ¹ / ₁₆		
×72	21.1	12.3	12 ¹ / ₄	0.430	⁷ / ₁₆	12.0	12	0.670	¹¹ / ₁₆	1.27	1 ⁹ / ₁₆	1 ¹ / ₁₆		
×65 ^f	19.1	12.1	12 ¹ / ₈	0.390	³ / ₈	12.0	12	0.605	⁵ / ₈	1.20	1 ¹ / ₂	1		

^c Shape is slender for compression with $F_y = 50$ ksi.
^f Shape exceeds compact limit for flexure with $F_y = 50$ ksi.
^g The actual size, combination and orientation of fastener components should be compared with the geometry of the cross section to ensure compatibility.
^h Flange thickness greater than 2 in. Special requirements may apply per AISC Specification Section A3.1c.

Table 1-1 (continued) W-Shapes Properties														
 W14-W12														
Nom- inal Wt.	Compact Section Criteria		Axis X-X				Axis Y-Y				<i>r_{ts}</i>	<i>h_o</i>	Torsional Properties	
	<i>b_f</i>	<i>h</i>	<i>I</i>	<i>S</i>	<i>r</i>	<i>Z</i>	<i>I</i>	<i>S</i>	<i>r</i>	<i>Z</i>			<i>J</i>	<i>C_w</i>
lb/ft	<i>2t_f</i>	<i>t_w</i>	in. ⁴	in. ³	in.	in. ³	in. ⁴	in. ³	in.	in. ³	in.	in.	in. ⁴	in. ⁶
132	7.15	17.7	1530	209	6.28	234	548	74.5	3.76	113	4.23	13.7	12.3	25500
120	7.80	19.3	1380	190	6.24	212	495	67.5	3.74	102	4.20	13.6	9.37	22700
109	8.49	21.7	1240	173	6.22	192	447	61.2	3.73	92.7	4.17	13.4	7.12	20200
99	9.34	23.5	1110	157	6.17	173	402	55.2	3.71	83.6	4.14	13.4	5.37	18000
90	10.2	25.9	999	143	6.14	157	362	49.9	3.70	75.6	4.10	13.3	4.06	16000
82	5.92	22.4	881	123	6.05	139	148	29.3	2.48	44.8	2.85	13.4	5.07	6710
74	6.41	25.4	795	112	6.04	126	134	26.6	2.48	40.5	2.83	13.4	3.87	5990
68	6.97	27.5	722	103	6.01	115	121	24.2	2.46	36.9	2.80	13.3	3.01	5380
61	7.75	30.4	640	92.1	5.98	102	107	21.5	2.45	32.8	2.78	13.3	2.19	4710
53	6.11	30.9	541	77.8	5.89	87.1	57.7	14.3	1.92	22.0	2.22	13.2	1.94	2540
48	6.75	33.6	484	70.2	5.85	78.4	51.4	12.8	1.91	19.6	2.20	13.2	1.45	2240
43	7.54	37.4	428	62.6	5.82	69.6	45.2	11.3	1.89	17.3	2.18	13.2	1.05	1950
38	6.57	39.6	385	54.6	5.87	61.5	26.7	7.88	1.55	12.1	1.82	13.6	0.798	1230
34	7.41	43.1	340	48.6	5.83	54.6	23.3	6.91	1.53	10.6	1.80	13.5	0.569	1070
30	8.74	45.4	291	42.0	5.73	47.3	19.6	5.82	1.49	8.99	1.77	13.4	0.380	887
26	5.98	48.1	245	35.3	5.65	40.2	8.91	3.55	1.08	5.54	1.30	13.5	0.358	405
22	7.46	53.3	199	29.0	5.54	33.2	7.00	2.80	1.04	4.39	1.27	13.4	0.208	314
336	2.26	5.47	4060	483	6.41	603	1190	177	3.47	274	4.13	13.8	243	57000
305	2.45	5.98	3550	435	6.29	537	1050	159	3.42	244	4.05	13.6	185	48600
279	2.66	6.35	3110	393	6.16	481	937	143	3.38	220	4.00	13.4	143	42000
252	2.89	6.96	2720	353	6.06	428	828	127	3.34	196	3.93	13.2	108	35800
230	3.11	7.56	2420	321	5.97	386	742	115	3.31	177	3.87	13.0	83.8	31200
210	3.37	8.23	2140	292	5.89	348	664	104	3.28	159	3.81	12.8	64.7	27200
190	3.65	9.16	1890	263	5.82	311	589	93.0	3.25	143	3.77	12.7	48.8	23600
170	4.03	10.1	1650	235	5.74	275	517	82.3	3.22	126	3.70	12.4	35.6	20100
152	4.46	11.2	1430	209	5.66	243	454	72.8	3.19	111	3.66	12.3	25.8	17200
136	4.96	12.3	1240	186	5.58	214	398	64.2	3.16	98.0	3.61	12.2	18.5	14700
120	5.57	13.7	1070	163	5.51	186	345	56.0	3.13	85.4	3.56	12.0	12.9	12400
106	6.17	15.9	933	145	5.47	164	301	49.3	3.11	75.1	3.52	11.9	9.13	10700
96	6.76	17.7	833	131	5.44	147	270	44.4	3.09	67.5	3.49	11.8	6.85	9410
87	7.48	18.9	740	118	5.38	132	241	39.7	3.07	60.4	3.46	11.7	5.10	8270
79	8.22	20.7	662	107	5.34	119	216	35.8	3.05	54.3	3.43	11.7	3.84	7330
72	8.99	22.6	597	97.4	5.31	108	195	32.4	3.04	49.2	3.41	11.6	2.93	6540
65	9.92	24.9	533	87.9	5.28	96.8	174	29.1	3.02	44.1	3.38	11.5	2.18	5780

Anexo 17: Propiedades de perfiles HSS de la AISC

1-76

DIMENSIONS AND PROPERTIES

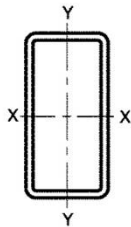


Table 1-11 (continued)
Rectangular HSS
Dimensions and Properties

Shape	Design Wall Thickness, <i>t</i>	Nominal Wt.	Area, <i>A</i>	<i>b/t</i>	<i>h/t</i>	Axis X-X				
						<i>I</i>	<i>S</i>	<i>r</i>	<i>Z</i>	
						in. ⁴	in. ³	in.	in. ³	
HSS14×10× ⁵ / ₈	0.581	93.34	25.7	14.2	21.1	687	98.2	5.17	120	
	× ¹ / ₂	0.465	76.07	20.9	18.5	573	81.8	5.23	98.8	
	× ³ / ₈	0.349	58.10	16.0	25.7	447	63.9	5.29	76.3	
	× ⁵ / ₁₆	0.291	48.86	13.4	31.4	45.1	380	54.3	5.32	64.6
	× ¹ / ₄	0.233	39.43	10.8	39.9	57.1	310	44.3	5.35	52.4
HSS14×6× ⁵ / ₈	0.581	76.33	21.0	7.33	21.1	478	68.3	4.77	88.7	
	× ¹ / ₂	0.465	62.46	17.2	9.90	402	57.4	4.84	73.6	
	× ³ / ₈	0.349	47.90	13.2	14.2	37.1	317	45.3	4.91	57.3
	× ⁵ / ₁₆	0.291	40.35	11.1	17.6	45.1	271	38.7	4.94	48.6
	× ¹ / ₄	0.233	32.63	8.96	22.8	57.1	222	31.7	4.98	39.6
	× ³ / ₁₆	0.174	24.73	6.76	31.5	77.5	170	24.3	5.01	30.1
HSS14×4× ⁵ / ₈	0.581	67.82	18.7	3.88	21.1	373	53.3	4.47	73.1	
	× ¹ / ₂	0.465	55.66	15.3	5.60	317	45.3	4.55	61.0	
	× ³ / ₈	0.349	42.79	11.8	8.46	37.1	252	36.0	4.63	47.8
	× ⁵ / ₁₆	0.291	36.10	9.92	10.7	45.1	216	30.9	4.67	40.6
	× ¹ / ₄	0.233	29.23	8.03	14.2	57.1	178	25.4	4.71	33.2
	× ³ / ₁₆	0.174	22.18	6.06	20.0	77.5	137	19.5	4.74	25.3
HSS12×10× ¹ / ₂	0.465	69.27	19.0	18.5	22.8	395	65.9	4.56	78.8	
	× ³ / ₈	0.349	53.00	14.6	25.7	310	51.6	4.61	61.1	
	× ⁵ / ₁₆	0.291	44.60	12.2	31.4	38.2	264	44.0	4.64	51.7
	× ¹ / ₄	0.233	36.03	9.90	39.9	48.5	216	36.0	4.67	42.1
HSS12×8× ⁵ / ₈	0.581	76.33	21.0	10.8	17.7	397	66.1	4.34	82.1	
	× ¹ / ₂	0.465	62.46	17.2	14.2	333	55.6	4.41	68.1	
	× ³ / ₈	0.349	47.90	13.2	19.9	31.4	262	43.7	4.47	53.0
	× ⁵ / ₁₆	0.291	40.35	11.1	24.5	38.2	224	37.4	4.50	44.9
	× ¹ / ₄	0.233	32.63	8.96	31.3	48.5	184	30.6	4.53	36.6
	× ³ / ₁₆	0.174	24.73	6.76	43.0	66.0	140	23.4	4.56	27.8
HSS12×6× ⁵ / ₈	0.581	67.82	18.7	7.33	17.7	321	53.4	4.14	68.8	
	× ¹ / ₂	0.465	55.66	15.3	9.90	271	45.2	4.21	57.4	
	× ³ / ₈	0.349	42.79	11.8	14.2	31.4	215	35.9	4.28	44.8
	× ⁵ / ₁₆	0.291	36.10	9.92	17.6	38.2	184	30.7	4.31	38.1
	× ¹ / ₄	0.233	29.23	8.03	22.8	48.5	151	25.2	4.34	31.1
	× ³ / ₁₆	0.174	22.18	6.06	31.5	66.0	116	19.4	4.38	23.7

Note: For compactness criteria, refer to Table 1-12A.

**Table 1-11 (continued)
Rectangular HSS
Dimensions and Properties**



HSS14-HSS12

Shape	Axis Y-Y				Workable Flat		Torsion		Surface Area ft ² /ft
	<i>I</i>	<i>S</i>	<i>r</i>	<i>Z</i>	Depth	Width	<i>J</i>	<i>C</i>	
	in. ⁴	in. ³	in.	in. ³	in.	in.	in. ⁴	in. ³	
HSS14×10× ⁵ / ₈	407	81.5	3.98	95.1	11 ³ / ₁₆	7 ³ / ₁₆	832	146	3.83
× ¹ / ₂	341	68.1	4.04	78.5	11 ³ / ₄	7 ³ / ₄	685	120	3.87
× ³ / ₈	267	53.4	4.09	60.7	12 ⁵ / ₁₆	8 ⁵ / ₁₆	528	91.8	3.90
× ⁵ / ₁₆	227	45.5	4.12	51.4	12 ⁹ / ₁₆	8 ⁹ / ₁₆	446	77.4	3.92
× ¹ / ₄	186	37.2	4.14	41.8	12 ⁷ / ₈	8 ⁷ / ₈	362	62.6	3.93
HSS14×6× ⁵ / ₈	124	41.2	2.43	48.4	11 ³ / ₁₆	3 ³ / ₁₆	334	83.7	3.17
× ¹ / ₂	105	35.1	2.48	40.4	11 ³ / ₄	3 ³ / ₄	279	69.3	3.20
× ³ / ₈	84.1	28.0	2.53	31.6	12 ⁵ / ₁₆	4 ⁵ / ₁₆	219	53.7	3.23
× ⁵ / ₁₆	72.3	24.1	2.55	26.9	12 ⁹ / ₁₆	4 ⁹ / ₁₆	186	45.5	3.25
× ¹ / ₄	59.6	19.9	2.58	22.0	12 ⁷ / ₈	4 ⁷ / ₈	152	36.9	3.27
× ³ / ₁₆	45.9	15.3	2.61	16.7	13 ³ / ₁₆	5 ³ / ₁₆	116	28.0	3.28
HSS14×4× ⁵ / ₈	47.2	23.6	1.59	28.5	11 ¹ / ₄	—	148	52.6	2.83
× ¹ / ₂	41.2	20.6	1.64	24.1	11 ³ / ₄	—	127	44.1	2.87
× ³ / ₈	33.6	16.8	1.69	19.1	12 ¹ / ₄	2 ¹ / ₄	102	34.6	2.90
× ⁵ / ₁₆	29.2	14.6	1.72	16.4	12 ⁵ / ₈	2 ⁵ / ₈	87.7	29.5	2.92
× ¹ / ₄	24.4	12.2	1.74	13.5	12 ⁷ / ₈	2 ⁷ / ₈	72.4	24.1	2.93
× ³ / ₁₆	19.0	9.48	1.77	10.3	13 ¹ / ₈	3 ¹ / ₈	55.8	18.4	2.95
HSS12×10× ¹ / ₂	298	59.7	3.96	69.6	9 ³ / ₄	7 ³ / ₄	545	102	3.53
× ³ / ₈	234	46.9	4.01	54.0	10 ⁵ / ₁₆	8 ⁵ / ₁₆	421	78.3	3.57
× ⁵ / ₁₆	200	40.0	4.04	45.7	10 ⁹ / ₁₆	8 ⁹ / ₁₆	356	66.1	3.58
× ¹ / ₄	164	32.7	4.07	37.2	10 ⁷ / ₈	8 ⁷ / ₈	289	53.5	3.60
HSS12×8× ⁵ / ₈	210	52.5	3.16	61.9	9 ³ / ₁₆	5 ³ / ₁₆	454	97.7	3.17
× ¹ / ₂	178	44.4	3.21	51.5	9 ³ / ₄	5 ³ / ₄	377	80.4	3.20
× ³ / ₈	140	35.1	3.27	40.1	10 ⁵ / ₁₆	6 ⁵ / ₁₆	293	62.1	3.23
× ⁵ / ₁₆	120	30.1	3.29	34.1	10 ⁹ / ₁₆	6 ⁹ / ₁₆	248	52.4	3.25
× ¹ / ₄	98.8	24.7	3.32	27.8	10 ⁷ / ₈	6 ⁷ / ₈	202	42.5	3.27
× ³ / ₁₆	75.7	18.9	3.35	21.1	11 ¹ / ₈	7 ¹ / ₈	153	32.2	3.28
HSS12×6× ⁵ / ₈	107	35.5	2.39	42.1	9 ³ / ₁₆	3 ³ / ₁₆	271	71.1	2.83
× ¹ / ₂	91.1	30.4	2.44	35.2	9 ³ / ₄	3 ³ / ₄	227	59.0	2.87
× ³ / ₈	72.9	24.3	2.49	27.7	10 ⁵ / ₁₆	4 ⁵ / ₁₆	178	45.8	2.90
× ⁵ / ₁₆	62.8	20.9	2.52	23.6	10 ⁹ / ₁₆	4 ⁹ / ₁₆	152	38.8	2.92
× ¹ / ₄	51.9	17.3	2.54	19.3	10 ⁷ / ₈	4 ⁷ / ₈	124	31.6	2.93
× ³ / ₁₆	40.0	13.3	2.57	14.7	11 ³ / ₁₆	5 ³ / ₁₆	94.6	24.0	2.95

— Indicates flat depth or width is too small to establish a workable flat.

Anexo 18: Tabla B4.1b de la AISC 360-10

Sect. B4.]

MEMBER PROPERTIES

16.1-17

<p align="center">TABLE B4.1b Width-to-Thickness Ratios: Compression Elements Members Subject to Flexure</p>						
Case	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio		Examples	
			λ_p (compact/ noncompact)	λ_r (noncompact/ slender)		
Unstiffened Elements	10	Flanges of rolled I-shaped sections, channels, and tees	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	11	Flanges of doubly and singly symmetric I-shaped built-up sections	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.95 \sqrt{\frac{k_c E}{F_L}}$ [a] [b]	
	12	Legs of single angles	b/t	$0.54 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.91 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	13	Flanges of all I-shaped sections and channels in flexure about the weak axis	b/t	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	14	Stems of tees	d/t	$0.84 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.03 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Stiffened Elements	15	Webs of doubly-symmetric I-shaped sections and channels	h/t_w	$3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	16	Webs of singly-symmetric I-shaped sections	h_c/t_w	$\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ [c] $\left(\frac{0.54 M_y}{M_p} - 0.09 \right) \leq \lambda_r$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	17	Flanges of rectangular HSS and boxes of uniform thickness	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	18	Flange cover plates and diaphragm plates between lines of fasteners or welds	b/t	$1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	19	Webs of rectangular HSS and boxes	h/t	$2.42 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
20	Round HSS	D/t	$0.07 \frac{E}{F_y}$	$0.31 \frac{E}{F_y}$		

[a] $k_c = 4/\sqrt{h/t_w}$ but shall not be taken less than 0.35 nor greater than 0.76 for calculation purposes.
 [b] $F_L = 0.7F_y$ for major axis bending of compact and noncompact web built-up I-shaped members with $S_{xt}/S_{xc} \geq 0.7$;
 $F_L = F_y S_{xt}/S_{xc} \geq 0.5F_y$ for major-axis bending of compact and noncompact web built-up I-shaped members with $S_{xt}/S_{xc} < 0.7$.
 [c] M_y is the moment at yielding of the extreme fiber. M_p = plastic bending moment, kip-in. (N-mm)
 E = modulus of elasticity of steel = 29,000 ksi (200 000 MPa)
 F_y = specified minimum yield stress, ksi (MPa)

Anexo 19: Tabla 1 de la AWS D14.1 “Clasificación de la soldabilidad de los aceros”

AWS D14.1/D14.1M:2005

Table 1
Weldability Classification of Steels

Material Class ⁽¹⁾	Steel Specification and Grade		Minimum or Range of Tensile Strength ksi [MPa]	Minimum Yield Strength ksi [MPa]
I	AISI/SAE		See Notes (2), (3), & (4)	See Notes (2) & (4)
	1005	Sheet, Plate	Hot Rolled 42 [290]	23.5 [162]
	1006	Bar or Casting	Hot Rolled 43 [295]	24 [165]
	1008	(Usually specified by composition	Hot Rolled 44 [305]	24.5 [170]
	1010	only—without mechanical properties)	Hot Rolled 47 [325]	26 [180]
	1012		Hot Rolled 48 [330]	26.5 [183]
	1013		Hot Rolled 49 [338]	27 [186]
	1015		Hot Rolled 50 [345]	27.5 [190]
	1016		Hot Rolled 55 [380]	30 [205]
	1017		Hot Rolled 53 [365]	29 [200]
	1018		Hot Rolled 58 [400]	32 [220]
	1020		Hot Rolled 55 [380]	30 [205]
1021		Hot Rolled 61 [420]	33 [230]	
1025		Hot Rolled 58 [400]	32 [220]	
II	ASTM		See Note (5)	See Note (5)
	A27	Grade N-1 Castings Chemistry Only	Not Specified—See 4.3	Not Specified—See 4.3
		Grade 60-30	60 [415]	30 [205]
		Grade 65-35	65 [450]	35 [240]
	A36	Shapes, Plate, Bar	58–80 [400–550]	36 [250]
	A53	Grade B Pipe	60 [415]	35 [240]
	A106	Grade B Pipe	60 [415]	35 [240]
	A131	Grade A, B, D, CS, DS	58–75 [400–520]	34 [235]
		Ship Building Shapes, Plate, Bars		
	A139	Grade A Pipe	48 [330]	30 [205]
		Grade B	60 [415]	35 [240]
		Grade C	60 [415]	42 [290]
		Grade D	60 [415]	46 [315]
		Grade E	66 [455]	52 [360]
	A283	Grade C, ≤ 2 in. [50 mm] Plate	55–75 [380–515]	30 [205]
		Grade D, ≤ 1 in. [25 mm]	60–80 [415–550]	33 [230]
	A381	Grade Y35 Pipe	60 [415]	35 [240]
	A500	Grade A Tubing	45 [310]	33 [288]
		Grade B	58 [400]	42 [290]
	A501	Tubing	58 [400]	36 [250]
A515	Grade 55, ≤ 8 in. [200 mm] Plate <i>Grade no longer listed in A515-2003</i>	55–75 [380–515]	30 [205]	
A516	Grade 55, ≤ 8 in. [200 mm] Plate	55–75 [380–515]	30 [205]	
	Grade 60, ≤ 8 in. [200 mm] Plate	60–80 [415–550]	32 [220]	
A524	Grade I, ≤ 0.375 in. [10 mm] Pipe	60–85 [414–586]	35 [240]	
	Grade II, > 0.375 in. [10 mm] Pipe	55–80 [380–550]	30 [205]	
A570— <i>Withdrawn in 2000</i>	Grade 36 Sheet, ≤ 0.229 in. [6 mm]	53 [365]	36 [250]	
A573	Grade 58 Plate, ≤ 1.5 in. [40 mm]	58–71 [400–490]	32 [220]	
	Grade 65 Plate, ≤ 1.5 in. [40 mm]	65–77 [450–530]	35 [240]	
A662	Grade A Plate, ≤ 1.5 in. [40 mm]	58–78 [400–540]	40 [275]	
	Grade B Plate, ≤ 1.5 in. [40 mm]	65–85 [450–585]	40 [275]	
A709	Grade 36 Shapes, Plate, Bar	58–80 [400–550]	36 [250]	
API ⁽⁶⁾				
5L	Grade B Pipe	60 [410]	35 [240]	

(continued)

Table 1 (Continued)
Weldability Classification of Steels

Material Class ⁽¹⁾	Steel Specification and Grade		Minimum or Range of Tensile Strength ksi [MPa]	Minimum Yield Strength ksi [MPa]
III	AISI/SAE 1030	Sheet, Plate, Bar, or Casting (Usually specified by composition only— without mechanical properties)	See Notes (2) & (7) 68 [470]	See Notes (2) & (4) 37.5 [260]
	ASTM A27	Grade N-2 Castings Heat Treated	See Note (5) Not Specified—See 4.3	See Note (5) Not Specified—See 4.3
		Grade 70-36	70 [485]	36 [250]
		Grade 70-40	70 [485]	40 [275]
	A106	Grade C Pipe	70 [485]	40 [275]
	A131	Grade AH32, DH32, EH32 AH36, DH36, EH36	64–85 [440–590] 71–90 [490–620]	46 [315] 51 [355]
		Ship Building Shapes, Plate, Bars		
	A283	Grade C, > 2 in. [50 mm] to ≤ 4 in. [100 mm] Plate	55–75 [380–515]	30 [205]
		Grade D, > 2 in. [50 mm] to ≤ 4 in. [100 mm] Plate	60–80 [415–550]	33 [230]
	A500	Grade C Round Tubing	62 [427]	46 [317]
		Grade C Shaped Tubing	62 [427]	50 [345]
	A515	Grade 60, ≤ 2 in. [50 mm] Plate	60–80 [415–550]	32 [220]
		Grade 65, ≤ 2 in. [50 mm] Plate	65–85 [450–585]	35 [240]
	A516	Grade 60, ≤ 2 in. [50 mm] Plate	60–80 [415–550]	32 [220]
		Grade 65, ≤ 2 in. [50 mm] Plate	65–85 [450–585]	35 [240]
	A537	Class 1, ≤ 2.5 in. [65 mm] Plate	70–90 [485–620]	50 [345]
	A572	Shapes, Plate, Sheet, & Bar HSLA Cb-V Steels		
		Grade 42, ≤ 2 in. [50 mm]	60 [415]	42 [290]
		Grade 50, ≤ 0.5 in. [13 mm]	65 [450]	50 [345]
		Grade 50, > 0.5 [13 mm] to ≤ 2 in. [50 mm]		
		Type 1 or 2 Killed Steel	65 [450]	50 [345]
	A588	Grades A, B, C, & K Shapes, Plate, & Bar ≤ 4 in. [100 mm]	70 [480]	50 [340]
	A606	Type 2 & 4 Sheet ≤ 0.180 in. [5 mm] Weathering Steel—As Rolled Cut Lengths All Other Coils & Cut Lengths	70 [480] 65 [450]	50 [340] 45 [310]
	A607— <i>Withdrawn in 2000</i>	Type 1 Class 2 Sheet ≤ 0.180 in. [5 mm] HSLA Non-Weathering	Grade 45 Grade 50 60 [410] 65 [450]	45 [310] 50 [340]
	A618	HSLA Structural Tubing Wall ≤ 3/4 in. [19 mm] Wall > 3/4 in. [19 mm] to ≤ 1.5 in. [38 mm]	Grade II Grade II Grade III 70 [485] 67 [460] 65 [450]	50 [345] 46 [315] 50 [345]
	A633	HSLA Normalized Structural Plate, ≤ 4 in. [100 mm] Plate, ≤ 2.5 in. [65 mm] Plate, > 2.5 in. [65 mm] to ≤ 4 in. [100 mm]	Grade A Grades C & D Grades C & D 63–83 [430–570] 70–90 [485–620] 65–85 [450–590]	42 [290] 50 [345] 46 [315]
	A662	Grade B PV Plate Moderate & Low Temp. Applications	65–85 [450–585]	40 [275]

(continued)

AWS D14.1/D14.1M:2005

Table 1 (Continued)
Weldability Classification of Steels

Material Class ⁽¹⁾	Steel Specification and Grade		Minimum or Range of Tensile Strength ksi [MPa]	Minimum Yield Strength ksi [MPa]	
III (Cont'd)	A709	Structural Shapes, Plate, Bars—Bridges Non-Weathering	Grade 50	65 [450]	50 [345]
		Weathering	Grade 50W	70 [485]	50 [345]
	API ⁽⁶⁾ 5LX	Grade 42 High-Strength Pipe		60 [410]	42 [290]
IV	ASTM			See Note (5)	See Note (5)
	A283	Grade C, > 4 in. [100 mm] to ≤ 12 in. [300 mm] Plate		55–75 [380–515]	30 [205]
		Grade D, > 4 in. [100 mm] to ≤ 8 in. [200 mm] Plate		60–80 [415–550]	33 [230]
	A515	Grade 60, > 2 in. [50 mm] Plate		60–80 [415–550]	32 [220]
		Grade 65, > 2 in. [50 mm] Plate		65–85 [450–585]	35 [240]
	A516	Grade 60, > 2 in. [50 mm] Plate		60–80 [415–550]	32 [220]
		Grade 65, > 2 in. [50 mm] Plate		65–85 [450–585]	35 [240]
	A537 ⁽⁸⁾	Class 2, ≤ 2.5 in. [65 mm] Plate		80–100 [550–690]	60 [415]
	A572	Shapes, Plate, Sheet & Bar			
		Grade 60, ≤ 1.25 in. [32 mm]		75 [520]	60 [415]
	Grade 65, ≤ 1.25 in. [32 mm]		80 [550]	65 [450]	
	A607— <i>Withdrawn in 2000</i>	HSLA Non-Weathering	Grade 60 Grade 65	75 [520] 80 [550]	60 [410] 65 [450]
	A633 ⁽⁸⁾	HSLA Normalized Structural Plate			
		≤ 4 in. [100 mm]	Grade E	80–100 [550–690]	60 [415]
		> 4 in. [100 mm] to ≤ 6 in. [150 mm]	Grade E	80–100 [550–690]	55 [380]
V ⁽⁸⁾	ASTM			See Note (5)	See Note (5)
	A514	HSLA Q&T Plate, ≤ 2.5 in. [65 mm]		110–130 [760–895]	100 [690]
		> 2.5 in. [65 mm] to ≤ 6 in. [150 mm]		100–130 [690–895]	90 [620]
	A517	HSLA Q&T PV Plate, ≤ 2.5 in. [65 mm]		115–135 [795–930]	100 [690]
		> 2.5 in. [65 mm] to ≤ 6 in. [150 mm]		105–135 [725–930]	90 [620]
	A709	HSLA Q&T Plate, ≤ 2.5 in. [65 mm]		110–130 [760–895]	100 [690]
		Grades 100 & 100 W, > 2.5 in. [65 mm] to ≤ 4 in. [100 mm]		100–130 [690–895]	90 [620]

Notes:

- (1) Material Class I steels are the most weldable, and Material Class V steel the most difficult to weld of the steels listed.
- (2) All tensile and yield strength values for AISI/SAE steels are *estimated minimum values*.
- (3) Hardness is not to exceed 160 Brinell for the AISI/SAE steels listed under Weldability Class I. These same AISI/SAE steels should be placed in a higher Weldability Class when hardness exceeds 160 Brinell (ultimate strength greater than 80 ksi [550 MPa]).
- (4) See 4.3 for tensile-yield property determination for AISI/SAE steels.
- (5) All tensile and yield strength values listed for ASTM steels are specified by the ASTM Standard.
- (6) API = American Petroleum Institute.
- (7) Hardness is not to exceed 180 Brinell for the AISI/SAE steel listed under Weldability Class III. This same AISI/SAE steel should be placed in a high Weldability Class when hardness exceeds 180 Brinell (ultimate strength greater than 90 ksi [620 MPa]).
- (8) Qualification is required due to the upper limit of the tensile strength range or the entire range exceeding 90 ksi [620 MPa].

Anexo 20: Tabla 9 de la AWS D14.1 “Requisitos del material de aporte”

AWS D14.1/D14.1M:2005

Table 9
Matching Filler Metal Requirements^{(1), (2), (3)}

Base Metal ⁽⁴⁾	Welding Process			
	SMAW	SAW	GMAW	FCAW
Class I	AWS A5.1 or A5.5	AWS A5.17 or A5.23	AWS A5.18	AWS A5.20 or A5.29
Class II	E60XX, E70XX E70XX-X	F6XX-EXXX F7XX-EXXX F7XX-EXX-XX	ER70S-X AWS A5.18 or A5.28 E70C-XX	E6XT-X, E6XTX-X, E7XT-X, or E7XTX-X (except -2, -3, -10, -13, -14, or GS) ⁽⁵⁾
Class III	AWS A5.1 or A5.5 ⁽¹⁾ E70XX ⁽⁶⁾ E70XX-X ⁽⁶⁾	AWS A5.17 or A5.23 F7XX-EXXX F7XX-EXX-XX	AWS A5.18 ER70S-X AWS A5.18 or A5.28 E70C-XX	AWS A5.20 or A5.29 E7XT-X or E7XTX-X (except -2, -3, -10, -13, -14, or GS) ⁽⁵⁾
Class IV	AWS A5.5	AWS A5.23	AWS A5.28	AWS A5.29
UTS > 70 ksi [485 MPa]	E80XX-X	F8XX-EXX-XX	ER80S-X E80C-XX	E8XTX-X
UTS ≤ 70 ksi [485 MPa]	AWS A5.1 or A5.5 E70XX-X ⁽⁶⁾ E70XX ⁽⁶⁾	AWS A5.17 or A5.23 F7XX-EXX F7XX-EXX-X	AWS A5.18 ER70S-X E70C-XX	AWS A5.20 E7XT-X or E7XTX-X (except -2, -3, -10, -13, -14, or GS) ⁽⁵⁾
Class V Thickness	AWS A5.5	AWS A5.23	AWS A5.28	AWS A5.29
< 2.5 in. [65 mm]	E110XX-X ⁽⁶⁾ E11018M	F11XX-EXX-XX	ER110S-X	E11XTX-X
≥ 2.5 in. [65 mm]	E100XX-X ⁽⁶⁾ E10018M	F10XX-EXX-XX	ER100S-X	E10XTX-X

Notes:

- (1) The use of the same type of filler metal having the next higher strength classification as listed in AWS filler metal specifications is permitted. A filler metal of a lower strength may be used where the Engineer has stipulated less than 100% joint efficiency.
- (2) When welds are to be thermally stress relieved, the deposited weld metal shall not exceed 0.05% vanadium.
- (3) Filler metals of alloy groups B3, B3L, B4L, B5, B6, B6L, B7, B7L, B8, B8L, or B9, in AWS A5.5, A5.23, A5.28, or A5.29, are not prequalified for use in the as-welded condition.
- (4) In joints involving base metals of different yield points or strengths, filler metals applicable to the lower strength metal may be used.
- (5) These electrode classifications do not have yield strength or elongation requirements specified in AWS A5.20. If E7XT-2 filler metals are qualified by prototype testing (see 9.5.3), this qualifies the use of these filler metals for production. However, it is recommended that these classifications and the E7XT-11 classification from AWS A5.20 be limited to weld thicknesses less than 1/2 in. [13 mm].
- (6) Low hydrogen classifications only (i.e., EXX15, EXX15-XX, EXX16, EXX16-XX, EXX18, EXX18-XX, EXX28, EXX48).

Anexo 21: Propiedades del electrodo E6011 – Punto Azul

SMAW

Aceros de Bajo Carbono

SOLDEXA

PUNTO AZUL

Electrodo revestido del tipo celulósico, de alta penetración y resistencia, diseñado para uso con corriente alterna o continua. Presenta un arco estable y uniforme con gran facilidad en el encendido y el reencendido del electrodo, además, presenta fácil remoción de escoria, puede soldar sobre superficies ligeramente oxidadas.

El metal depositado solidifica con rapidez lo que le confiere facilidad para realizar soldaduras en todas posiciones.

Es ideal para las aplicaciones en carpintería metálica.


Clasificación	
AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1	E6011

Análisis Químico del Metal Depositado (valores típicos) [%]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,05	0,5	0,3	máx. 0,020	máx. 0,020	-	-	-	-	-

Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V (-30°C) [J]
Sin tratamiento	mín. 430 (60 000)	mín. 330 (48 000)	22	mín. 30

Conservación del Producto	Posiciones de Soldadura
<ul style="list-style-type: none"> Mantener en un lugar seco y evitar humedad. No requiere almacenamiento bajo horno. 	P, H, Va, Sc. 

Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente alterna (AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP				
Diámetro	[mm]	2,50	3,25	4,00
	[pulgadas]	3/32	1/8	5/32
Amperaje mínimo		50	80	115
Amperaje máximo		80	110	150

Aplicaciones

- Diseñada exclusivamente para la soldadura de unión de aceros de bajo carbono: perfiles, ángulos, platinas, etc. en el sector cerrajero.
- Ideal para trabajos de fabricación de Carpintería Metálica en general y fabricación de estructuras livianas.
- Se recomienda para la fabricación de puertas, ventanas, portones, carrocerías, etc. con un límite de fluencia de 330MPa.

Anexo 22: Propiedades del electrodo E7018 – Supercito

SMAW

Aceros al Carbono y Baja Aleación



SUPERCITO

Electrodo revestido de tipo básico, de bajo hidrógeno con extraordinarias características mecánicas y de soldabilidad. Presenta un arco muy suave, bajo nivel de salpicaduras y la escoria es de muy fácil remoción. El contenido de hierro en polvo mejora su tasa de depósito. Dentro de su categoría es el producto que presenta los mejores niveles de resistencia a la tracción.

Clasificación	
AWS A5.1 / ASME-SFA 5.1	E7018

Aprobaciones	Grados
ABS	3H15,3Y
LR	3m,3ym
GL	3Y

Análisis Químico de Metal Depositado (valores típicos) [%]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,05	1,00	0,60	máx. 0,020	máx. 0,020	-	-	-	-	-

Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V [°C (°F)] [J (Ft-Lbf)]
Sin tratamiento	520 – 610 (75 400 – 88 450)	min. 400 (58 000)	min.23	[-30 °C (-22 °F)] min. 70 (57)

Conservación del Producto
<ul style="list-style-type: none"> Mantener en un lugar seco y evitar humedad. Almacenamiento en horno: 125 - 150°C. Resecado de 300°C a 350 °C por 2 horas.

Posiciones de Soldadura
P, H, Va, Sc.

Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente alterna (AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP							
Diámetro	[mm]	1,60	2,50	3,25	4,00	5,00	6,30
	[pulgadas]	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo	-	60	90	120	170	210	
Amperaje máximo	-	90	140	190	240	280	

Aplicaciones

- Para aceros de mediano a alto contenido de carbono, alta resistencia y baja aleación.
- Para aceros de alto contenido de azufre y fácil fresado.
- Para aceros laminados al frío.
- Por sus características de resistencia y su fácil manejo, especialmente adecuado para: Soldaduras de tuberías de vapor, calderas de alta presión, piezas de maquinaria pesada, instalaciones de la industria petrolera, petroquímica y minera.

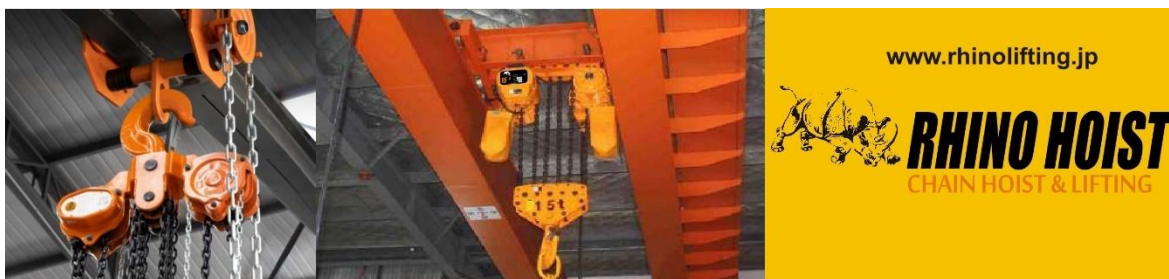
Nota: El precalentamiento está en función al tipo y espesor del material a soldar.

Anexo 23: Tabla 5 de la AWS D14.1 “Garganta mínima efectiva para juntas parciales de soldadura a tope”

Table 5			
Minimum Effective Throat for Partial Joint Penetration Groove Welds			
Metal Thickness of Thicker Part Jointed		Minimum Effective Throat	
in.	mm	in.	mm
≤ 1/4	≤ 6	1/8	3
> 1/4 to ≤ 1/2	> 6 to ≤ 13	3/16	5
> 1/2 to ≤ 3/4	> 13 to ≤ 20	1/4	6
> 3/4 to ≤ 1-1/2	> 20 to ≤ 40	5/16	8
> 1-1/2 to ≤ 2-1/4	> 40 to ≤ 55	3/8	10
> 2-1/4 to ≤ 6	> 55 to ≤ 150	1/2	13
> 6	> 150	5/8	16

General Note: The effective throat does not need to exceed the thickness of the thinner part joined.

Anexo 25: Teclé eléctrico



RHINO HOIST -TECLES ELÉCTRICOS DE CADENA CON TROLLEY ELECTRICO

Especificaciones Técnicas 0.5 - 50 ton

Model	SSDHL									
	0.5-01S	01-01S	1.5-01S	02-01S	02-02S	2.5-01S	03-01S	03-02S	03-03S	05-02S
Capacity(t)	0.5t	1t	1.5t	2t		2.5t	3t		5t	
Lifting speed (m/min)	7.2	6.6	8.8	6.6	3.3	5.4	5.4	4.4	2.2	2.7
Motor power (Kw)	0.8	1.5	3	3	1.5	3	3	3	1.5	3
Rotation speed (r/min)	1440									
Insulation grade	F									
Power supply	3P 220V-380V/220v-440v 60Hz									
Control voltage	24V / 36V / 48V									
No,of chain	1	1	1	1	2	1	1	2	3	2
Spec.of load chain	Φ6.3	Φ7.1	Φ10.0	Φ10.0	Φ7.1	Φ11.2	Φ11.2	10	Φ7.1	Φ11.2
Net weight (kg)	47	61	108	115	73	115	122	131	85	151



Especificaciones Técnicas 10 ton.

Model	SSDHL	
	10-04S	10-04D
Capacity(t)	10t	
Lifting Speed(m/min)	2.7	2.7/0.9
Motor Power(kw)	3.0x2	3.0x2/1.0x2
Rotations Speed(r/min)	1440	2880/960
Insulation Grade	F	
Power Supply	3P 220V 690V	
Control Voltage	24V/36V/48V	
No.of Chain	4	4
Spec.of Load Chain	φ11.2	
Net Weight(kg)	300	380

Especificaciones Técnicas 15 - 20 ton. De uno y dos velocidades

Model	Capacity	Lifting speed (m/min)	Motor power (kw)	Rotation speed (r/min)	Insulation grade	Power supply	Voltage	No.of chain	Spec. of load chain	Net weight (kg)
15-06S	15t	1.8	3.0x2	1440	F grade	3 phase, 200V-690V, 50/60Hz	24V/36V/48V	6	Φ11.2	382
15-06D	15t	1.8/0.6	3.0x2/1.0x2	2880/960	F grade	3 phase, 200V-690V, 50/60Hz	24V/36V/48V	6	Φ11.2	455
20-08S	20t	1.4	3.0x2	1440	F grade	3 phase, 200V-690V, 50/60Hz	24V/36V/48V	8	Φ11.2	482
20-08D	20t	1.5/0/5	3.0x2/1.0x2	2880/960	F grade	3 phase, 200V-690V, 50/60Hz	24V/36V/48V	8	Φ11.2	545



Anexo 26: Trolley eléctrico

TROLLEY ELÉCTRICO



Trolley eléctrico /o Carros Eléctricos RHINO HOIST, se pueden acoplar a diferentes marcas, tipo de uso profesional e industrial, se utilizan para apoyar a los equipos eléctricos de elevación, cada carro eléctrico se prueba con el 150% de carga de su capacidad nominal y se suministra con un certificado de prueba y un manual de instrucciones.

DATOS TÉCNICOS

MODELO		SDHL-0.5	SDHL-01	SDHL-02	SDHL-03	SDHL-05	SDHL-7.5	SDHL-10
CAPACIDAD	(ton)	0.5	1	2	3	5	7.5	10
VELOCIDAD	(m/min)	12.2/24	11/21	11/21	11/21	11/21	11/21	11/21
MOTOR	(kw)	0.12	0.4	0.4	0.75	0.75	0.75	0.75
RADIO MÍNIMO DE GIRO	(mm)	0.8	0.8	0.8	1.0	1.8	2.5(3.0)	2.5(3.0)
PESO NETO	(kg)	36	45	50	65	70	150	150
DIMENSIONES (mm)	A	240	315	325	340	400	500	500
	B	188	212	220	250	291	370	370
	R	302	142	142	142	142	142	142
	S	133	125-175	164-214	190-240	205-255	237-287	237-287
	T	348.5	231	231	231	231	231	231



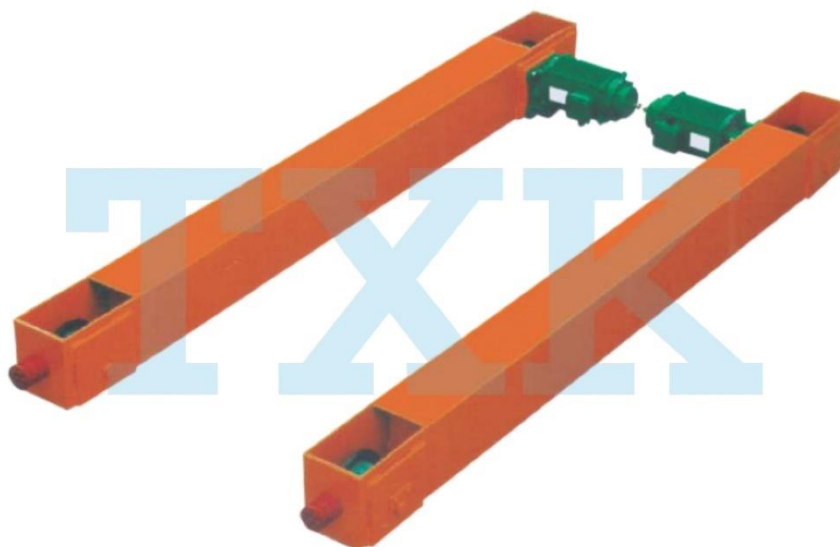
Anexo 27: Testeros

1-25TN

JUEGO DE VIGAS
TESTERAS
TXK
 JAPANESE INDUSTRY


TESTEROS ELÉCTRICOS

Juego de vigas testeras, de 1T hasta 25T, carros que trabajan en paralelo o de manera independiente. Estos equipos trabajan sobre una pista o riel, su estructura es de acero forjado, tratado térmicamente, para una mayor resistencia y durabilidad. Mecanismo de control Múltiple, para el control centralizado, control de dispersión, o el modo de control distribuido y los carros son capaces de realizar operaciones automatizadas según el programa. Pueden ser utilizados en diversos sistemas de traslado de cargas, siendo los puentes grúa, el más común. Sistema de freno electromagnético regulable, ruedas dentadas directo al motor para un arranque inicial suave.



● DATOS TÉCNICOS						
MODELO	LONGITUD (mm)	POTENCIA (kw)	ORBITA (kG)	DIÁMETRO DE RUEDA	GRUPO DE TRABAJO	CAPACIDAD (TN)
T0.75-120	0.75	0.37	9	120	M3	1
T1.2-150	1.2	0.37	9	150	M3	1.5
T1.5-150	1.5	0.37	9	150	M3	2
T2.0-180	2	0.37	12	160	M4	3
T2.5-200	2.5	0.6	12	200	M4	5
T2.0-200	2	0.6	15	250	M4	7.5
T2.5-250	2.5	0.6	15	250	M4	7.5
T3.0-250	3	0.6	15	250	M4	10
T2.5-280	2.5	0.6	22	260	M5	10
T3.0-280	3	1.5	22	260	M5	10
T2.5-300	2.5	1.5-2.2	30	300	M5	15
T3.0-300	3	1.5-2.2	30	300	M5	15

Anexo 28: Propiedades mecánicas de los pernos ASTM A325

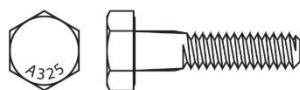


FICHA TÉCNICA

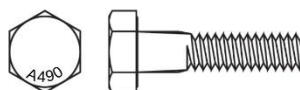
SOLUCIONES
INDUSTRIALES

PERNO HEXAGONAL F3125

ANSI/ASME B1.1 | ANSI/ASME B18.2.6



Perno Hexagonal ASTM F3125 Grado A325 clase 1
Imagen referencial



Perno Hexagonal ASTM F3125 Grado A490 clase 1
Imagen referencial

■ Descripción

ASTM F3125 cubre requisitos químicos físicos y mecánicos para pernos estructurales.

ASTM F3125 es una consolidación de 6 normativas ASTM: A325, A325M, A490, A490M, F1852 y F2280. Con esta consolidación estas normativas pasan a ser grados de normativa F3125. Pernos fabricados bajo esta normativa son para uso de conexiones estructurales, cubierto en la especificación Structural Joints Using High-Strength Bolts aprobada por Research Council on Structural Connections.

■ Normas para Pernos hexagonales

ANSI/ASME B1.1 : Roscas en pulgada (UNC-UN)
ANSI/ASME B18.2.6 : Norma Dimensional Pernos Estructurales.
ASTM F3125 : Norma material, Grados A325 y A490

■ Largo Perno y largo de hilo

El largo de un perno hexagonal se mide desde la base de la cabeza hasta el final del hilo. El largo de hilo para pernos es según normativa ASME B18.2.6.
Pernos con rosca total hasta 4 veces el diámetro y que se encuentren fuera de normativa, se tomara indicación ASME B18.2.6 S1 y se marcan con una letra T (A325T).

Para cabezas y largo de roscas fuera de normativa, no incluidos en ASME B18.2.6 S1, serán marcados "A325S" o "A490S", de acuerdo a ASME B18.2.6 S2.

**Para mayor información consultar requisitos complementarios Norma F3125.*

■ Recubrimiento ASTM F3125 Grado A325

ASTM F2329	Hot Dip Galvanized (HDG) / 50µm	
ASTM B695	clase 55	
ASTM F3393	Corrosión	D
	Apariencia	1
	Coefficiente de fricción	R

■ Recubrimiento ASTM F3125 Grado A490

ASTM F3393	Corrosión	D
	Apariencia	1
	Coefficiente de fricción	R

■ Propiedades Mecánicas



Especificación	ASTM F3125 Grado A325	ASTM F3125 Grado A490
Diámetro nominal	1/2 a 1.1/2	1/2 a 1.1/2
Esfuerzo de fluencia (min)	92 Ksi	130 Ksi
Tracción (min)	120 Ksi	150-173 Ksi
Elongación en 4D, min. %	14	14
Reducción de área, min. %	35	40
Dureza HR	C25-C34	33-C38
Identificación		

Imagen referencial

OTERO INDUSTRIAL DEL PERÚ

Es parte de EMPRESAS OTERO, holding que reúne a un grupo de empresas de larga trayectoria y vasta experiencia en los mercados. Nuestro negocio está basado en la confianza de los clientes, con un servicio integral y una logística de excelencia. Atendemos empresas de los rubros mineros, industrial, pesqueros, constructoras entre otros.

Tenemos la capacidad de ajustarse y responder a las necesidades de las empresas y contamos con un amplio stock de productos e insumos de prestigiosas marcas internacionales. Somos líderes en abastecimientos de aceros especiales, pernos, fijaciones, herramientas, maquinarias e instrumentos necesarios para el éxito de su negocio.

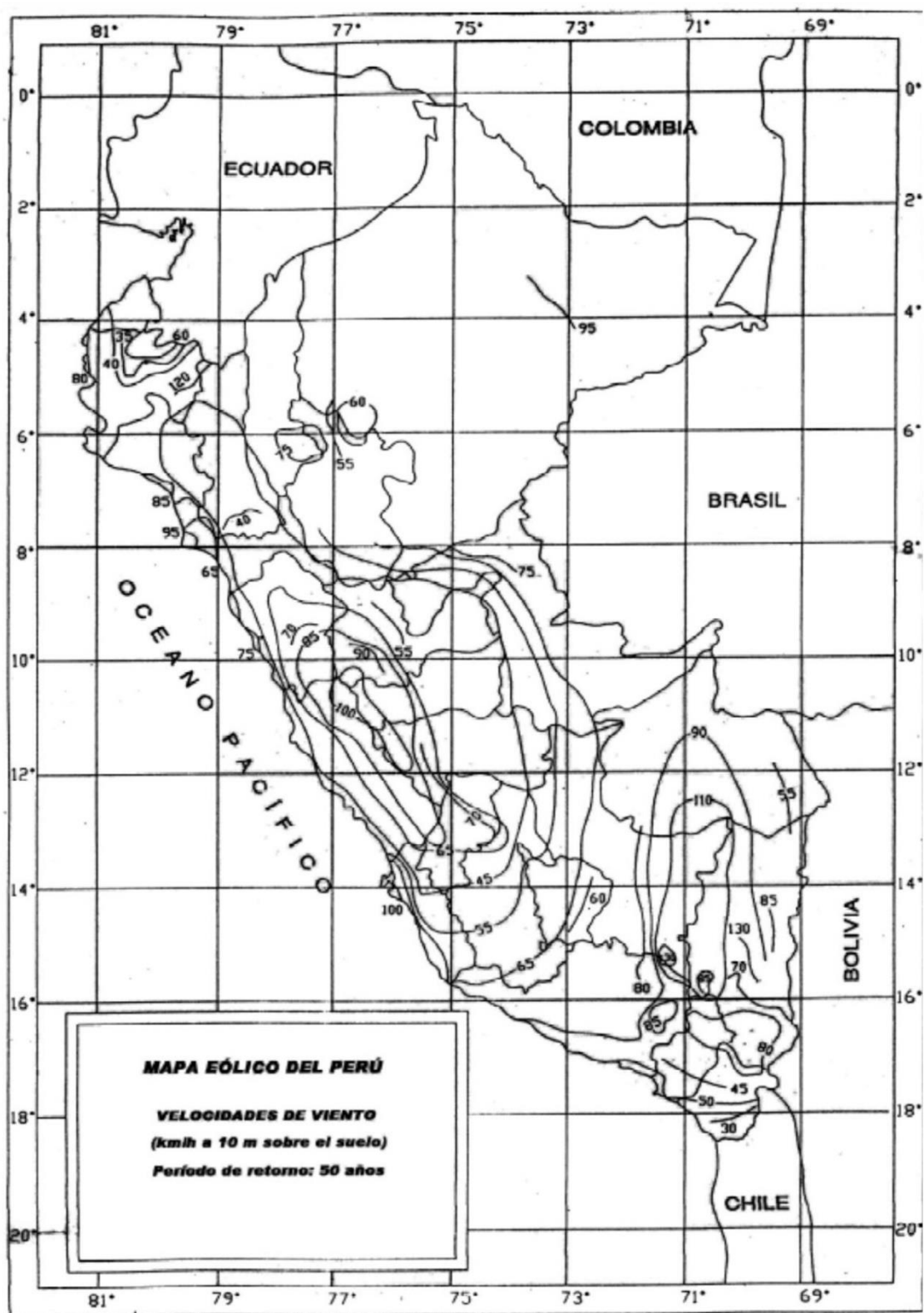
www.oteroindustrial.com.pe • Teléfono : (+51 1) 719 1074 • Av. Argentina 1610, Lima - Perú

Anexo 29: Diámetros y áreas de roscas unificadas UNC y UNF

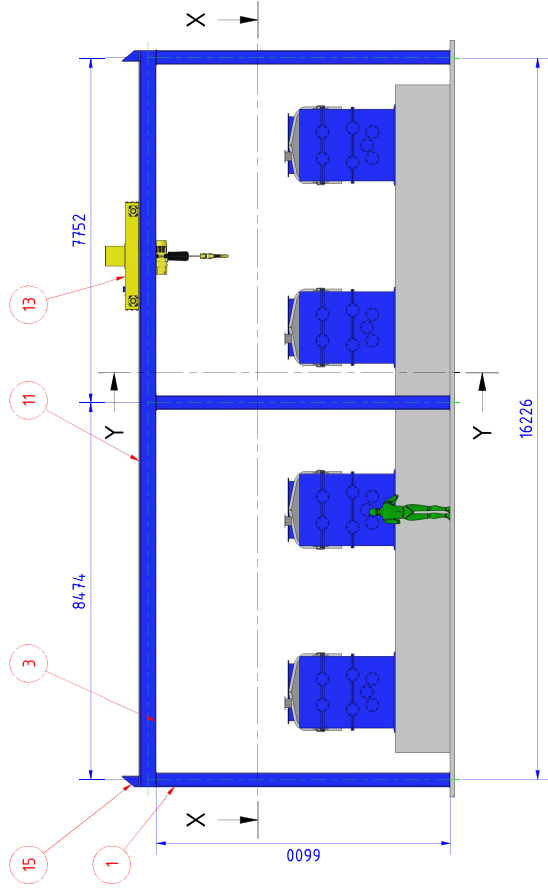
Designación de tamaño	Diámetro mayor nominal	Serie gruesa-UNC			Serie fina-UNF		
		Roscas por pulgada, N	Área de esfuerzo de tensión A_{tr} , pulg ²	Área del diámetro menor $A_{r,r}$, pulg ²	Roscas por pulgada, N	Área de esfuerzo de tensión A_{tr} , pulg ²	Área del diámetro menor $A_{r,r}$, pulg ²
0	0.0600				80	0.001 80	0.001 51
1	0.0730	64	0.002 63	0.002 18	72	0.002 78	0.002 37
2	0.0860	56	0.003 70	0.003 10	64	0.003 94	0.003 39
3	0.0990	48	0.004 87	0.004 06	56	0.005 23	0.004 51
4	0.1120	40	0.006 04	0.004 96	48	0.006 61	0.005 66
5	0.1250	40	0.007 96	0.006 72	44	0.008 80	0.007 16
6	0.1380	32	0.009 09	0.007 45	40	0.010 15	0.008 74
8	0.1640	32	0.014 0	0.011 96	36	0.014 74	0.012 85
10	0.1900	24	0.017 5	0.014 50	32	0.020 0	0.017 5
12	0.2160	24	0.024 2	0.020 6	28	0.025 8	0.022 6
$\frac{1}{4}$	0.2500	20	0.031 8	0.026 9	28	0.036 4	0.032 6
$\frac{5}{16}$	0.3125	18	0.052 4	0.045 4	24	0.058 0	0.052 4
$\frac{3}{8}$	0.3750	16	0.077 5	0.067 8	24	0.087 8	0.080 9
$\frac{7}{16}$	0.4375	14	0.106 3	0.093 3	20	0.118 7	0.109 0
$\frac{1}{2}$	0.5000	13	0.141 9	0.125 7	20	0.159 9	0.148 6
$\frac{9}{16}$	0.5625	12	0.182	0.162	18	0.203	0.189
$\frac{5}{8}$	0.6250	11	0.226	0.202	18	0.256	0.240
$\frac{3}{4}$	0.7500	10	0.334	0.302	16	0.373	0.351
$\frac{7}{8}$	0.8750	9	0.462	0.419	14	0.509	0.480
1	1.0000	8	0.606	0.551	12	0.663	0.625
$1\frac{1}{4}$	1.2500	7	0.969	0.890	12	1.073	1.024
$1\frac{1}{2}$	1.5000	6	1.405	1.294	12	1.581	1.521

* Esta tabla se compiló de la norma ANSI B1.1-1974. El diámetro menor se determinó mediante la ecuación $d_r = d - 1.299\ 038p$ y el diámetro de paso a partir de $d_p = d - 0.649\ 519p$. Para calcular el área de esfuerzo de tensión se usaron la media del diámetro de paso y el diámetro menor.

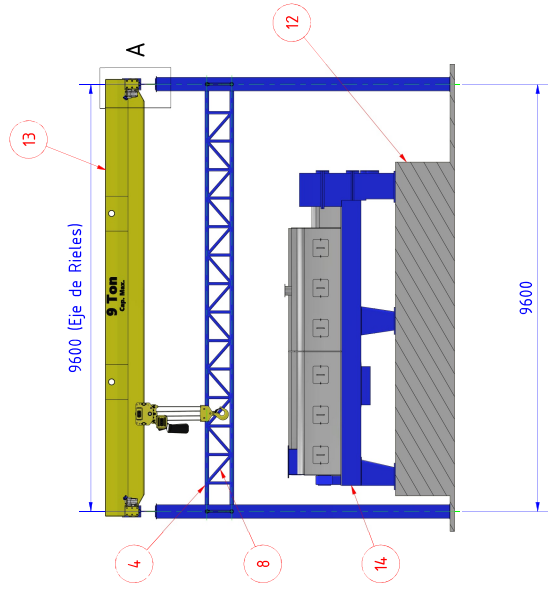
Anexo 30: Mapa eólico del Perú



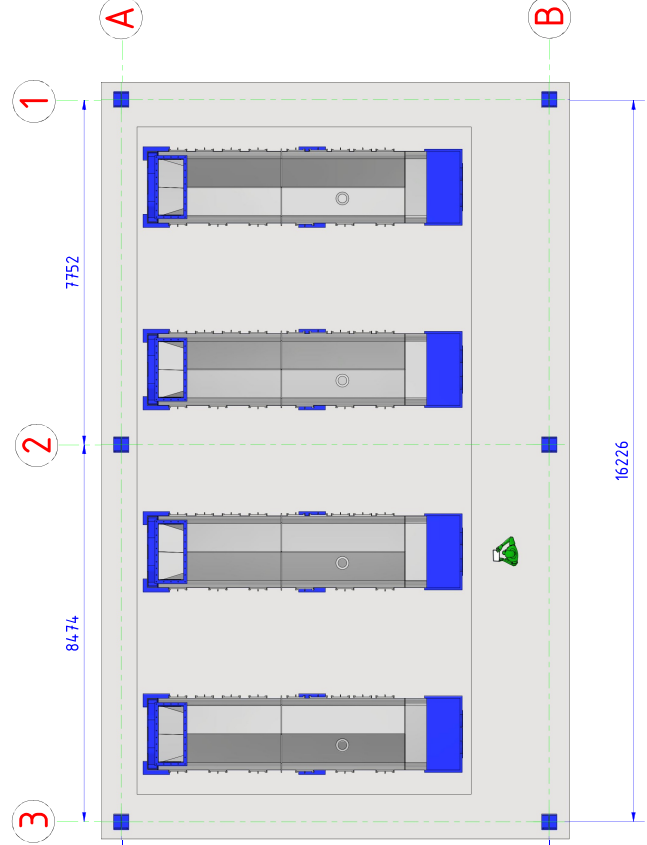
Anexo 31: Planos



VISTA LATERAL
(1 : 80)



Y-Y
(1 : 80)



X-X
(1 : 80)

15	4	W 14x74	Perfil W14"x74 lb/ft ASTM A36 x 400 mm	20.7 kg
14	4	Prensa Pescado	Elemento representativo	5517.6 kg
13	1	Puente grúa	Perfil personalizado, diferentes componentes.	3714.24 kg
12	1	Base civil	Elemento representativo	376082 kg
11	2	2"x1"	Rieles - Plancha ASTM A36	335.04 kg
10	20	2 x 0.154	Tubería diám. 2" SCH40 ASTM A53 x 855 mm	4.66 kg
9	22	2 x 0.154	Tubería diám. 2" SCH40 ASTM A53 x 859 mm	4.69 kg
8	26	2 x 0.154	Tubería diám. 2" SCH40 ASTM A53 x 850 mm	4.64 kg
7	74	2 x 0.154	Tubería diám. 2" SCH40 ASTM A53 x 560 mm	3.05 kg
6	4	3 x 0.216	Tubería diám. 3" SCH40 ASTM A53 x 744.0 mm	83.96 kg
5	4	3 x 0.216	Tubería diám. 3" SCH40 ASTM A53 x 816.2 mm	92.11 kg
4	4	3 x 0.216	Tubería diám. 3" SCH40 ASTM A53 x 9600 mm	108.35 kg
3	2	W 14x74	Perfil W14"x74 lb/ft ASTM A36 x 16538 mm	1830 kg
2	12	342x335x13 mm	Plancha ASTM A36	12.4 kg
1	6	W 12x72	Perfil W12"x72 lb/ft ASTM A36 x 6600 mm	705.34 kg
ITEM CANT			MATERIAL Y NORMA	PESO

NOTA:
 - El diseño sigue las disposiciones de la CMAA Especificación 74, AISC Manual de Construcción con Acero y AISC 360-10.
 - La soldadura seguirá las disposiciones de la AWS D11 y D14.1.
 - Los detalles de pintura seguirán las especificaciones del cliente.

EMPRESA:	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA	LONGITUD ANIL:	8	ESCALA:	1:80	PROYECTO:	PROYECTO
ESCALA PROFESIONAL:	INGENIERIA MECANICA	TITULO TECNICO:	8.01	FECHA DE EMISION:	13/04/2025	FECHA DE REALIZACION:	13/04/2025
PROYECTO:	PROYECTO DE UN CRANEO GRUA DE VIGA ÚNICA, PARA SOPORTAR CARGAS Y TORCIONES	ALUMNO:	N21	FECHA DE REVISIÓN:	13/04/2025	FECHA DE REVISIÓN:	13/04/2025
DISEÑO:	C. PRETEL	VALOR DEL AREA:	50	FECHA DE REVISIÓN:	13/04/2025	FECHA DE REVISIÓN:	13/04/2025
REVISADO:	C. PRETEL	VALOR DEL AREA:	50	FECHA DE REVISIÓN:	13/04/2025	FECHA DE REVISIÓN:	13/04/2025
APROBADO:	C. PRETEL	VALOR DEL AREA:	50	FECHA DE REVISIÓN:	13/04/2025	FECHA DE REVISIÓN:	13/04/2025

