

Estandarización de diseño de estructuras de acero para soporte de grúas viajeras



Abstract

An overhead crane is a mechanism that aims to move loads along the structure that supports it. Its design is regulated by various international codes, so it is necessary to define which one should be used in a design in our country. Two of the most important international design codes will be studied in this paper. The first one is published by CMAA (Crane Manufacturers American Association) and the second is referred to be used by AISC (American Institute of Steel Construction) and published by AISE (Association for Iron and Steel Technology).

The main objective of this paper is to create a Microsoft Excel based tool that integrates all the concepts necessary to design the support structure (runway beam, brackets and the connections between them), that would allow creating designs using the crane's technical specifications only. Additionally, a construction requirement guide is included, which contains the design procedures for steel elements, such as bending stresses, shear, axial compression, axial tension, biaxial bending, compression and flexion the design of brackets and connections.

Keywords (bridge crane, steel structure, runway girder, bracket)

Resumen

Se denomina grúa viajera a un mecanismo que tiene la finalidad de mover cargas a lo largo de la estructura que la soporta. Su diseño es normado por varios códigos internacionales, por lo que surge la necesidad de definir cuál debe utilizarse a la hora de realizar un diseño en el país. En el presente trabajo se estudian dos códigos de diseño, que resultan ser los más importantes a nivel internacional. El primero es publicado por CMAA (Crane Manufacturers American Association) y el segundo es referenciado para ser utilizado por AISC (American Institute of Steel Construction) y publicado por AISE (Association for Iron and Steel Technology).

El objetivo principal de la estandarización es crear una herramienta basada en Microsoft Excel que integre todos los conceptos necesarios para el diseño de la estructura de soporte (entiéndase por estructura de soporte viga carrilera, ménsulas de apoyo y uniones entre estas), y que permita hacer diseños con solo brindar los requerimientos técnicos de la grúa. Además de esto, se presenta una guía de requerimientos constructivos que se deben seguir a la hora levantar la estructura, así como los procedimientos de diseño de elementos de acero a esfuerzos de flexión, cortante, compresión axial, tensión axial, flexión biaxial, flexocompresión y el diseño de ménsulas y sus conexiones.

Palabras clave (puente grúa, estructura de acero, viga carrilera, ménsula)

Estandarización de diseño de estructuras de acero para soportar grúas viajeras

ALEJANDRO PORRAS JIMÉNEZ

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Agosto del 2011

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio.....	1
Resumen ejecutivo	2
Introducción	4
Metodología	6
Marco teórico	7
Códigos de diseño aplicables a estructuras de acero con grúas viajeras	14
Análisis de estructuras con grúas viajeras	17
Diseño de estructuras de acero para soporte de grúas viajeras.....	25
Manual de usuario de herramienta de diseño ...	36
Especificaciones de diseño y constructivas.....	41
Resultados	45
Análisis de los resultados	55
Conclusiones y recomendaciones	58
Apéndices	60
Anexos.....	61
Referencias.....	62

Prefacio

El diseño de estructuras de soporte para grúas viajeras, a pesar de ser una tarea que se realiza con cierta frecuencia en la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE), en la oficina de Servicios Técnicos, donde se desarrolló el proyecto no es así de frecuente, además que no se encuentra normalizado de tal manera que se sigan los mismos lineamientos en todas las estructuras. Además, la información disponible en cuanto a códigos de diseño se encuentra muy dispersa, y para un ingeniero que esté haciendo el diseño por primera vez, conlleva una investigación al iniciar un proyecto de este tipo. Es por esto que la investigación de los códigos de diseño que se deben utilizar, y una herramienta de diseño que los aplique cobra importancia, pues facilita el diseño de futuras estructuras similares.

El documento presenta una recopilación de los dos principales códigos de diseño utilizados en grúas viajeras, así como el manual de usuario para la herramienta de diseño y las especificaciones constructivas que se deben seguir durante la fabricación de la estructura.

De esta manera se cumple el objetivo principal del proyecto de elaborar una herramienta basada en los códigos aplicables para el diseño de estructuras de soporte para grúas viajeras.

Se agradece enormemente al departamento de Servicios Técnicos de la Refinadora Costarricense de Petróleo, su jefe Ing. Oíden Álvarez González, ingenieros estructurales Ing. Grettel Morales Benavides, Ing. Renán Espinoza Arias e Ing. Yerson Zúñiga Madrigal por colaborar en la asesoría para el proyecto. Además, al profesor guía Ing. Gustavo Rojas Moya por su constante ayuda y orientación en el camino a seguir para la investigación y elaboración de la herramienta de diseño.

Resumen ejecutivo

Estandarización de diseño de estructuras de acero para soporte de grúas viajeras, pretende ser un documento a través del que, cualquier ingeniero pueda utilizar con el fin de diseñar una estructura con el fin que indica su título. En eso se basa su importancia para la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE), donde se desarrolla el trabajo. Esto se debe a que la tarea de diseñar una grúa viajera ocurre con cierta frecuencia, sin embargo no siempre la responsabilidad recae sobre la misma persona. Eso provoca que si es un ingeniero que lo hace por primera vez, tenga que realizar la investigación del caso en cuanto al contenido de códigos y aplicabilidad antes de iniciar su labor. Esto por supuesto se traduce en tiempo que no siempre es una variable con la que se cuente. Cabe destacar que la estandarización se delimita, al diseño de grúas viajeras de tipo puente.

Se traza por lo tanto el objetivo general del proyecto: *Elaborar una herramienta que permita el diseño de estructuras de soporte para grúas viajeras, con base en el código del AISC y otros aplicables.* Con la elaboración de una herramienta de diseño, en este caso a través del software Microsoft Excel, se encierran todos los conceptos que resultan fundamentales en el diseño de una estructura de este tipo, y a su vez se aplican directamente los cálculos, lo cual permite limitar el margen de error.

Microsoft Excel, se utiliza a través de las funciones predeterminadas, aplicación de filtros, programación de celdas, programación de macros a través del lenguaje Visual Basic.

Dentro de los conceptos fundamentales que deben considerarse al realizar el diseño de una estructura para una grúa viajera están las cargas que se producen debido a la grúa viajera en la estructura. Para el cálculo de esas cargas, se utilizan 2 enfoques diferentes. El primero dado por el código del American Institute of Steel Construction (AISC), Guía de diseño N°7 (Steel Guide N°7, Industrial Buildings). El otro enfoque utilizado es brindado por Crane Manufactures

American Association (CMAA) quienes emiten dos estándares de diseño, la guía N° 70 y la N° 74, diferenciados por la cantidad de vigas puente con las que cuente la grúa.

Sin embargo, antes de mencionar las cargas que considera cada código, es importante conocer las partes que componen una grúa de este tipo. La figura 1, señala las principales partes de una grúa tipo puente.

Cada uno de los códigos utiliza diferentes maneras para el cálculo de la magnitud de cargas a utilizar, sin embargo las cargas que aplican resultan similares. En el caso de AISC establece que se deben considerar cargas causadas por:

- Carga máxima de ruedas: es la reacción en los rieles de la grúa, que provoca la carga nominal que levanta, sumado al peso propio de los componentes de la grúa.
- Carga de impacto: la provoca el impacto generado al izar la carga en la grúa.
- Cargas laterales: provocada por el movimiento lateral de la carga a través del puente de la grúa.
- Cargas longitudinales: es causada por el movimiento del puente a lo largo de la viga carrilera.

Se tiene que para CMAA, las cargas a considerar son:

- Carga máxima de ruedas: se define de la misma manera que para AISC.
- Fuerzas verticales de inercia: se refiere a las cargas producidas por la grúa al levantar la carga, es equivalente a la carga de impacto.
- Fuerzas de inercia debido al manejo de la grúa: son cargas laterales producidas por la grúa durante el movimiento de la carga a lo largo del puente.
- Cargas de desgaste: son producidas a lo largo de la viga carrilera, debido al movimiento del puente sobre ella.

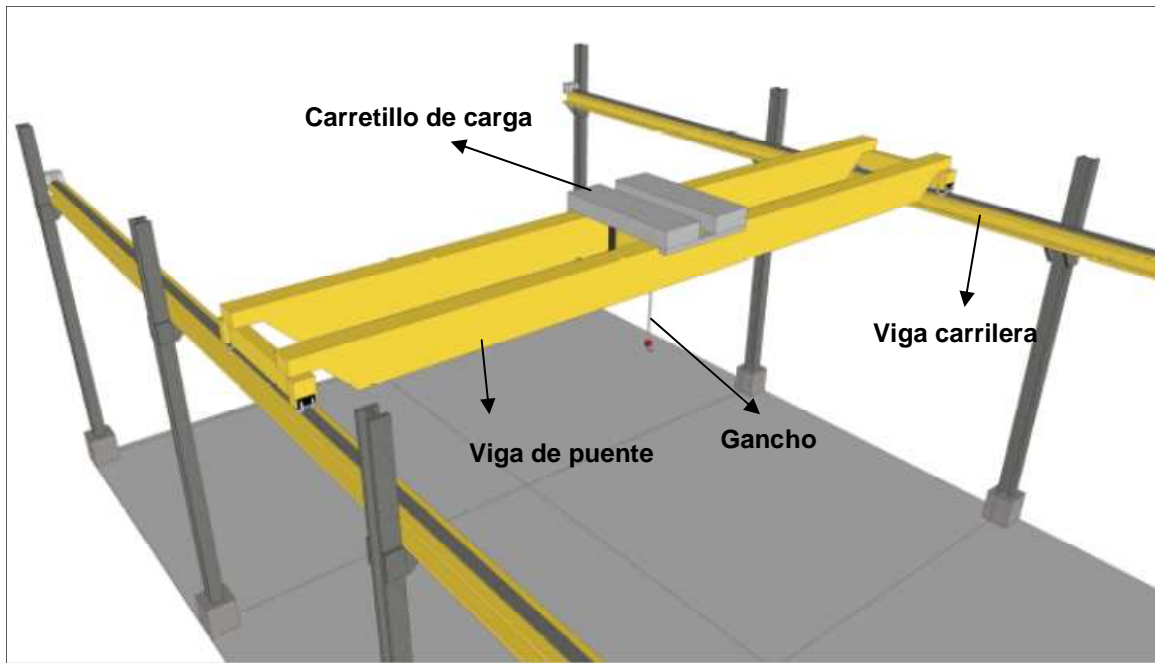


Figura 1. Esquema general de una grúa tipo puente.

La herramienta de diseño, funciona de tal manera que el usuario, con conocimiento básico de la grúa, a través de sencillas opciones y brindando cierta información importante, pueda hacer el diseño de la estructura para soportarla.

La validación de la herramienta se hace a través del diseño de una grúa que RECOPE utilizará en uno de sus planteles en Siquirres. Con esto se comprueba la utilidad y facilidad de la misma para hacer el diseño de cualquier estructura que deba soportar una grúa. Es importante mencionar que la herramienta diseña de la estructura de soporte la viga carrilera, las ménsulas de apoyo, las conexiones entre las ménsulas y las columnas, y las columnas, sin embargo para estas últimas el usuario debe incluir los valores últimos de carga para los que desea dimensionar su sección, pues no está dentro de los alcances del proyecto hacer estos cálculos.

Estandarización de diseño de estructuras para soporte de grúas viajeras, se puede por lo tanto describir como una recopilación y aplicación de los dos códigos de diseño más importantes relativos al tema, incluyendo una herramienta que

permite su automatización para el dimensionamiento de una estructura de ese tipo.

Introducción

Estandarización del diseño de estructuras de acero para soporte de grúas viajeras pretende ser, una recopilación y análisis de dos de los códigos de diseño más utilizados a nivel internacional para dimensionar este tipo de estructuras. Sin perder de vista que el producto final del proyecto es la elaboración de una herramienta de diseño que encierre los conceptos que definen los códigos en estudio, y a su vez automatice el procedimiento de diseño, para que cualquier usuario con los conocimientos necesarios en ingeniería pueda diseñar la estructura sin mayor dificultad.

Para el diseño de estructuras de acero se pueden aplicar dos filosofías de diseño, ASD o LRFD. En el presente proyecto se aplica únicamente la segunda. La estandarización de diseño está basada en códigos publicados por autoridades en el tema a nivel internacional. El primero de ellos es Crane Manufacturers Association of America (CMAA), entidad encargada en Estados Unidos de regular y mantener los estándares de calidad entre sus asociados. Estos publican dos guías de diseño, la N° 70 y N° 74, donde se trata el tema a profundidad. La segunda autoridad es American Institute of Steel Construction (AISC), entidad que emite los lineamientos y teorías a utilizar en el diseño de estructuras de acero. Estos a su vez cuentan con la publicación de la Guía de Diseño N°7, donde más que definir el diseño de una estructura para una grúa, se refiere directamente a dos códigos de diseño que incluyen el tema, y que AISC aprueba para su aplicación. Estos códigos son publicados por Association of Iron and Steel Engineers (AISE) y American Society of Civil Engineers (ASCE). Los códigos que publican son: AISE Technical Report N°13 y Minimum Designs Loads for Buildings and Other Structures, respectivamente. De los códigos referidos por AISC, la herramienta de diseño está basada en el elaborado por ASCE.

La herramienta de diseño nombrada, está programada sobre Microsoft Excel 2007, con la

utilización de sus funciones avanzadas y en complemento con Visual Basic a través de macros.

Con la herramienta de diseño se logra crear un instrumento, que permite que cualquier ingeniero, después de definir algunas características de la grúa que desea utilizar y la estructura que la soportará, pueda dimensionarla de manera casi automatizada, con solo realizar simples selecciones entre las opciones que le presenta el programa. Con la herramienta se puede realizar por completo el diseño de la viga carrilera.

Sin embargo, se debe destacar que el presente trabajo estudia los conceptos incluidos en los códigos mencionados, los aplica y compara entre sí.

Para aplicar los conceptos recopilados de diseño, se presenta el diseño de una grúa ejemplo, que es requerida por la empresa RECOPE, quien solicitó el estudio.

Con el fin de que el alcance del presente trabajo sea precisado, se muestran los objetivos.

Objetivo general

- Elaborar una herramienta que permita el diseño de estructuras de soporte para grúas viajeras, con base en el código del AISC y otros aplicables.

Objetivos específicos

- Recopilación de normas para diseño de estructuras de grúas viajeras.
- Análisis estructural de una nave industrial, considerando todas las cargas que influyen en la estructura y documentación del mismo, para ser utilizado como referencia.
- Automatizar los procedimientos de diseño para estructuras de acero laminado en

- caliente, utilizadas como soporte de grúas viajeras, mediante Microsoft Excel.
- Elaborar dentro de la herramienta de diseño, una sección de guía para el análisis estructural.
 - Diseñar columnas, vigas, arriostres y uniones de la estructura de soporte de una grúa viajera.
 - Recopilar datos de fabricantes de grúas y especificaciones que se deben considerar en el diseño.
 - Recopilar especificaciones para la construcción de la estructura diseñada.

Metodología

El proyecto de graduación bajo la modalidad de práctica profesional fue realizado en el departamento de Servicios Técnicos de RECOPE, con sede en el plantel ubicado en el Alto de Ochomogo en Cartago, Costa Rica.

El objetivo principal de elaborar una herramienta que permita el diseño de estructuras de soporte para grúas viajeras de tipo puente fue logrado mediante los siguientes pasos.

En primer lugar se realizó una profunda investigación de todos los conceptos básicos que deben conocerse en el ámbito de las grúas industriales. Desde el nombre de cada una de sus partes, hasta el funcionamiento y las principales marcas que se distribuyen a nivel mundial.

Con un conocimiento básico, se inicia la investigación bibliográfica con respecto al tema. La investigación procede de tres maneras. Primeramente por medio de internet se hace la búsqueda de documentos relacionados con el tema, con el fin conocer las entidades que lo tratan. La segunda forma de investigación fue a través de consultas a profesionales con experiencia en el diseño estructural, y por último la consulta de bibliografía escrita.

Después de contar con la bibliografía traducida y estudiada, se procede a programar cada una de las fórmulas necesarias para el diseño de la herramienta. Se le da a la herramienta una estructura sencilla con los pasos del diseño.

La programación de la herramienta se hace mediante Microsoft Excel, utilizando las opciones avanzadas del programa, así como macros en algunos casos. En general la metodología de programación es sencilla, para fórmulas que resuelve la herramienta se programan directamente en las celdas. Si el

programa debe interpretar un dato, se utilizan las funciones predeterminadas de Excel. En el caso de que el usuario deba elegir opciones, se usan botones de opción, que son parte de los complementos de macros de Excel. Así mismo con la implementación de listas de opción.

En el caso de la aplicación de macros, se utiliza el lenguaje de programación de visual basic.

Para finalizar el trabajo, y comprobar la utilidad y validez de la herramienta, se aplica la misma en el diseño de una grúa requerida por RECOPE. Para esta prueba, se recopilan los datos necesarios de la grúa de RECOPE y se introducen en la herramienta de diseño. Se escogen secciones que cumplan con los esfuerzos que deben soportar, así como ménsulas de apoyo y la unión de estas con las columnas.

Marco teórico

Una grúa viajera es un mecanismo instalado en una estructura fija, el cual permite el traslado de una carga de un punto a otro, dentro del rango que la estructura de soporte le permite.

Definiciones

Para un completo entendimiento de los conceptos que se presentan es necesario primero conocer algunas definiciones básicas referentes a grúas. Debido a que la mayoría de normativa vigente del tema se encuentra en inglés, se incluye en cada concepto el nombre en inglés con el fin de obtener otras referencias. Estas se muestran a continuación¹.

- A prueba de fallos (Fail-safe): condición en la cual se detiene cualquier movimiento de la grúa al detectar algún error en el funcionamiento.
- Ascenso (Lift): máxima distancia vertical a través de la que el gancho puede moverse de manera segura.
- Bloque de carga (load block): formado por el montaje del gancho giratorio, el soporte, poleas, pernos, y el marco, todo suspendido por las cuerdas de la grúa.
- Cabina del operador (Operator's cab): cabina donde el operador maneja la grúa.
- Capacidad (Capacity): valor máximo de carga que la grúa puede levantar, expresado en toneladas.
- Carga nominal (Rated load): la máxima carga para la que la grúa fue diseñada y construida, y que se muestra en el equipo.
- Cargas de las ruedas (Wheel load): carga en cualquiera de las ruedas al levantar la carga nominal, y el carretillo colocado en la posición del puente donde provoque la situación de carga más crítica.
- Carretillo (Trolley): el carretillo consiste en el marco, los soportes y el mecanismo del

polipasto. Este se mueve a lo largo de las vigas de puente, en dirección perpendicular a los rieles de la pista.

- Claro (Span): distancia horizontal entre los rieles de la pista de la grúa.
- Colector de puente (Bridge collector): dispositivo instalado en el puente para sostener cables del sistema de corriente en la pista de grúa.
- Colector del carretillo (Trolley Collectors): dispositivo colocado en el carretillo para recoger los cables de la viga puente mientras se mueve.
- Compensador (Equalizer): dispositivo que compensa cuando la cuerda de la grúa se estira o tiene longitudes diferentes.
- Conductor de puente (Bridge conductor): cables y accesorios instalados en el puente para brindar corriente a los carretillos del polipasto colectores.
- Distancia entre ejes de ruedas (Wheel base): distancia de centro a centro entre las ruedas exteriores del carretillo o puente de la grúa.
- Eje impulsor del carretillo (Trolley drive shaft): eje a lo largo del carretillo para transmitir el torque del motor a las ruedas del carretillo.
- Eje impulsor del puente (Bridge cross-shaft): un eje colocado a lo largo del puente para transmitir el torque del motor a las ruedas de la unidad del puente.
- Espacio libre lateral (Side clearance): distancia entre el extremo de la grúa al obstáculo más cercano (columnas, muros, entre otros).
- Espacio libre sobre grúa (Overhead clearance): distancia de la parte superior de la grúa al punto más bajo de la estructura del techo, luces colgantes, cableado, entre otros.
- Factor de seguridad (Factor of safety): esfuerzo último del material dividido entre el máximo esfuerzo en cada parte de la unidad.

¹ (Whiting Corporation, 1967)

- Freno (Brake): dispositivo encargado de retardar o detener el movimiento por fricción o energía.
- Freno de mantenimiento (holding brake): freno que evita el movimiento cuando la grúa está apagada.
- Freno de torque (Countertorque braking): método de control mediante el cual se cambia la dirección del motor para producir torque en la dirección opuesta.
- Freno dinámico (Dynamic braking): mecanismo conectado al motor, el cual es activado para proveer una fuerza retardante cuando está siendo revisado.
- Frenos de control (Control braking means): método para controlar la velocidad del motor durante revisiones de la grúa.
- Generador de freno (Regenerative braking): tipo de freno dinámico donde la energía que se produce es aprovechada e integrada al sistema eléctrico.
- Grúa auxiliar (Auxiliary hoist): unidad de grúa complementaria que consiste en un motor, un enganche, frenos, engranaje, tambor y cuerdas con la capacidad de manejar cargas menores pero a mayor velocidad que la grúa principal.
- Grúa principal (Main hoist): unidad de grúa que consiste en un motor, un enganche, frenos, engranaje, tambor y cuerdas con la capacidad de manejar las cargas nominales máximas.
- Movimiento de elevación (Hoist motion): el movimiento de la grúa cuando baja o levanta alguna carga.
- Movimiento del puente (Bridge travel): movimiento horizontal que hace la grúa en dirección paralela a los rieles de la pista.
- Parachoques (Bumper): dispositivo que absorbe la energía para reducir el impacto que provoca la grúa al llegar al final del carril.
- Pista de la grúa (Runway): vigas, soportes, rieles y marco estructural en el que la grúa opera.
- Proximidad del gancho (Hook approach): la mínima distancia horizontal entre el centro de los rieles de la pista y el gancho.
- Puente (Bridge): Es la parte de la grúa compuesta por una viga, barandas, con soportes para el carretillo del polipasto y se mueve en dirección paralela a los rieles de la pista de grúa.
- Regulador (Controller): dispositivo para regular de manera predeterminada la energía entregada al motor u otros equipos.
- Roles del carretillo (Trolley trucks): consisten en las ruedas, soportes, ejes, y soporte estructural para el mecanismo de la grúa y travesaños de carga.
- Soporte del puente (Bridge truck): montaje compuesto por ruedas, soportes, ejes y un marco estructural que soporta la viga de puente.
- Tambor (drum): dispositivo cilíndrico alrededor del cual se enrolla la cuerda para levantar o bajar la carga.
- Tope (Stop): dispositivo para limitar el movimiento del carretillo o del puente de la grúa.
- Travesaños del carretillo (Trolley Girts): elementos estructurales apoyados en los roles del carretillo, y que a su vez sostienen la polea o polipasto.
- Unidad de carretillo (Trolley drive): compuesto por motor, acoplamientos y carcasa.
- Unidad del puente (Bridge drive): compuesta por un motor, engranajes, el freno y el 'case' que los protege.
- Viga de puente (Drive girder): viga frontal, donde se ubica la unidad del puente, el eje del puente, rieles y usualmente la cabina del operador (si se tiene una).
- Viga tensora (Idler girder): viga trasera, sin maquinaria.
- Pluma (boom): miembro horizontal montado en el carretillo que permite levantar o bajar una carga en algún punto que no sea directamente abajo del tambor o carretillo.
- Freno de carga mecánica (Brake, mechanical load): freno de fricción automática usado para controlar cargas al bajarse. Este dispositivo es unidireccional, requiere esfuerzo de torsión por parte del motor al bajar la carga, pero no impone ninguna carga adicional al motor al subirla.
- Freno de emergencia (Braking emergency): método para desacelerar la grúa cuando no hay corriente eléctrica. Este puede ser activado por el operador de la grúa, o automáticamente en el momento que se pierde el suministro eléctrico.
- Sobrecarga (Overload): cualquier carga mayor que la carga nominal.

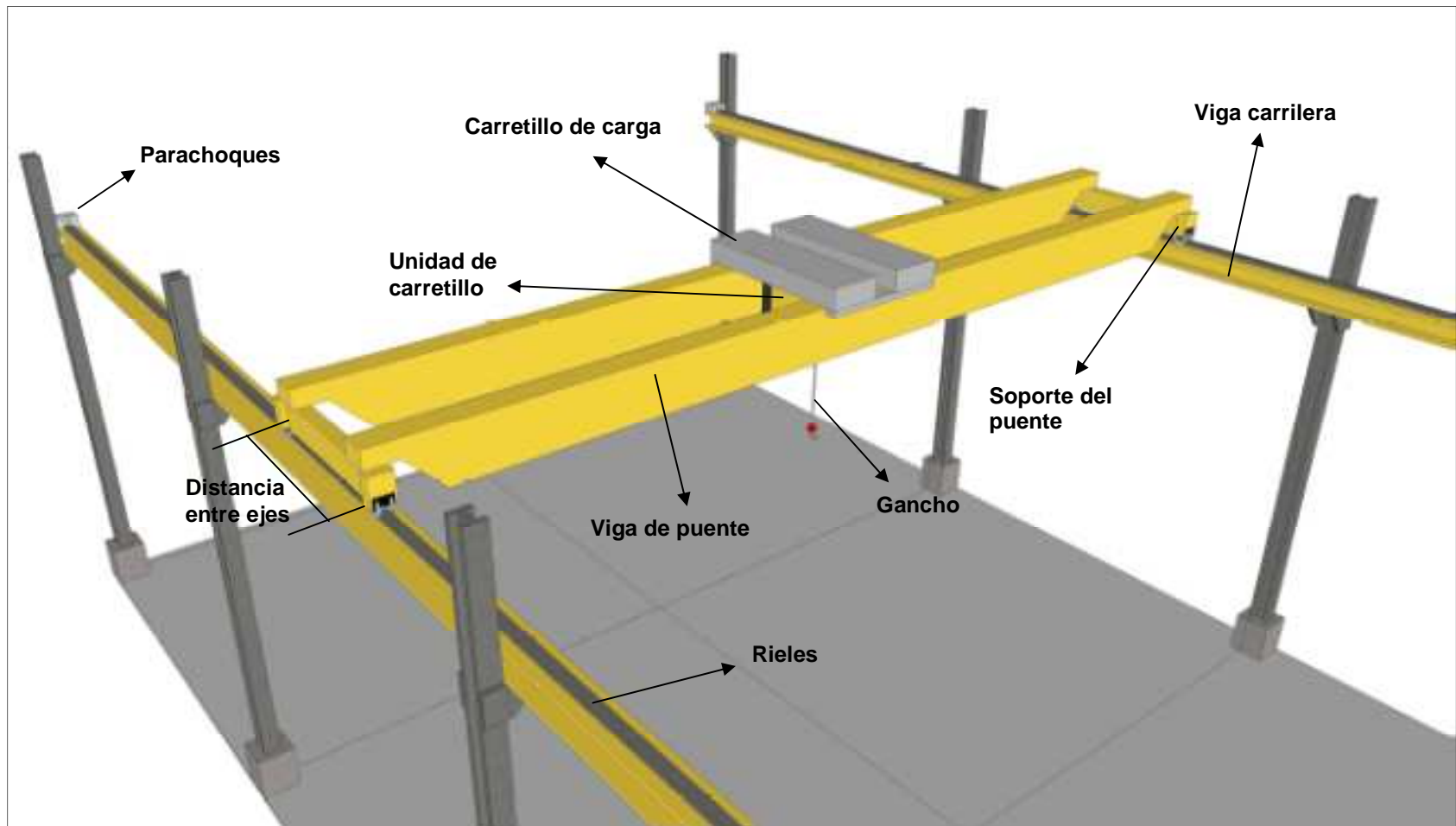


Figura 1. Partes de la grúa puente

Clasificación de grúas en edificaciones industriales

Las grúas en edificaciones industriales se clasifican según varios parámetros. Los principales son según el servicio que deben brindar, según la forma de apoyo y forma de izar la carga.

Clasificación de grúas según el tipo de servicio

Esta clasificación la establece el Crane Manufacturers Association of America (CMAA) y es la siguiente:

- Clase A (Uso poco frecuente): esta clasificación incluye grúas instaladas en sitios tales como centrales eléctricas, servicios públicos, cuartos de turbinas, motores o transformadores, donde el movimiento de equipos a bajas velocidades tiene largos periodos de inactividad. En ocasiones este tipo de grúas son diseñadas con una capacidad únicamente para la instalación inicial del equipo en el sitio, o para mantenimiento ocasional.
- Clase B (Servicio liviano): se incluyen grúas instaladas en talleres, fábricas de ensamble de piezas livianas, bodegas de mercancía liviana, donde las cargas a levantar son bajas y la velocidad es baja. La frecuencia entre levantamientos puede variar de 2 a 5 levantamientos por hora, con un promedio de 10 pies de distancia de traslado por levantamiento.
- Clase C (Servicio moderado): se incluyen grúas instaladas en talleres de máquinas o fábricas de papel, donde los requerimientos de servicio son moderados. En este caso las cargas promedio menores al 50% de la capacidad nominal, con una frecuencia de levantamientos de entre 5 y 10 por hora, con 15 pies de distancia de traslado sin sobrepasar el 50% de la capacidad nominal de levantamiento.
- Clase D (Servicio pesado): se incluyen grúas utilizadas en talleres de maquinaria pesada, fundiciones, bodegas de aceros, patios de contenedores, bodegas madereras, entre otras. En esta clase de

servicio las cargas se acercan al 50% de la capacidad nominal. Las cargas se manejan a altas velocidades, con una frecuencia de levantamientos entre 10 y 20 por hora, con traslados de 15 pies, y sin sobrepasar del 65% de la capacidad nominal de levantamiento.

- Clase E (Servicio Severo): este tipo de servicio requiere una grúa con la capacidad de manejar cargas cercanas a la capacidad nominal durante toda su vida útil. Se incluyen grúas de magneto, balde, y combinación de ambas, utilizadas en botaderos de chatarra, fábricas de cemento, fábricas madereras, patios de 'containers'; con frecuencia de levantamientos de 20 o más por hora, y funcionando cerca de la capacidad nominal de levantamiento.
- Clase F (Servicio Severo Continuo): este tipo de servicio requiere una grúa con la capacidad de manejar cargas cercanas a la capacidad nominal bajo condiciones severas y continuas. Entre las aplicaciones se incluyen grúas diseñadas específicamente para realizar tareas que sean parte fundamental de la producción en una fábrica. Este tipo de grúa debe brindar la más completa confiabilidad y todas las facilidades para un mantenimiento adecuado y continuo.

En caso de conocer las condiciones bajo las cuales la grúa estará en operación, con respecto a los ciclos de operación y la carga a levantar en cada ciclo, la clasificación anterior se puede hacer de manera numérica, y no cualitativa, mediante la siguiente ecuación:

$$k = \sqrt[3]{(W_1)^3 P_1 + (W_2)^3 P_2 + (W_3)^3 P_3 + \dots + (W_n)^3 P_n}$$

Ecuación 1

Donde:

W= magnitud de la carga, se expresa como la relación de las cargas levantadas, con respecto a la capacidad nominal. Se debe incluir la operación de la grúa sin levantar cargas, y el peso de cualquier accesorio.

P= Probabilidad de carga, se expresa como la relación de la cantidad de ciclos con cada magnitud de carga, con respecto a la cantidad total de ciclos. La suma de las probabilidades de carga P debe ser igual a 1.

k= Factor de carga efectiva.

Una vez obtenido el factor de carga efectiva, se puede hacer la clasificación de tipo de servicio con base en el siguiente cuadro.

CUADRO 1. DEFINICIÓN DE CMAA TIPOS DE SERVICIO DE GRÚAS EN TÉRMINOS DE TIPOS Y CICLOS DE CARGA.					
Tipo de carga	Ciclos de carga				k = Factor de carga efectiva
	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	
L ₁	A	B	C	D	0,35 - 0,53
L ₂	B	C	D	E	0,531 - 0,67
L ₃	C	D	E	F	0,671 - 0,85
L ₄	D	E	F	F	0,851 - 1,0
	Uso ocasional con largos periodos de inactividad	Uso regular con operación intermitente	Uso regular con operación continua	Uso regular con severa operación continua	

Se definen las clasificaciones L (Load Classes) y N (Load Cycles) de la siguiente manera.²

Tipos de carga (Load Classes)

L₁: grúas que raramente levantan la carga nominal, y en condiciones normales levantan cargas livianas.

L₂: grúas que raramente levantan la carga nominal, y en condiciones normales levantan cargas de 1/3 de la nominal.

L₃: grúas que frecuentemente levantan la carga nominal, y en condiciones normales levantan cargas entre 1/3 y 2/3 de la nominal.

L₄: grúas que normalmente levantan cargas cercanas a la nominal.

Ciclos de carga (Load cycles)

N₁: entre 20.000 y 100.000 ciclos.

N₂: entre 100.000 y 500.000 ciclos.

N₃: entre 500.000 y 2.000.000 ciclos.

N₄: de 2.000.000 de ciclos en adelante.

Una vez que se definen los parámetros de tipo de carga (L), ciclos de carga (N) y factor de carga

² (Crane Manufacturers Association of America, 2000)

efectiva (k), se ubica la intersección de los tres valores en la tabla, y esta indicará la clasificación de servicio a la cual pertenece la grúa en análisis.

Clasificación de grúas según el tipo de mecanismo

Existen varios tipos de grúas para edificaciones, que se diferencian entre sí por varios aspectos. Entre ellos la ubicación de los apoyos del polipasto o polea, el mecanismo para levantar la carga, sea manual o mecánico y el sistema estructural. A continuación se muestran algunos de estos sistemas, con los que se clasifican las grúas según su mecanismo.

- Grúas viajeras de puente (Overhead traveling cranes): este tipo de grúa consta de una viga puente que se apoya sobre carriles en ambos extremos. A lo largo de la viga puente se mueve el carretillo de la grúa, mecanismo que levanta las cargas. En esta clase de grúas las capacidades varían desde las 3 hasta las 500 toneladas. Las grúas viajeras de puente se dividen en tipos: primero, según la cantidad de vigas puente, estas pueden ser:

- Monocarril: consta de una única viga de puente, que sostiene el carretillo de carga. (Merritt, 1972)
- Grúa de puente: consta de dos vigas de puente, sobre las cuales se apoya el carretillo de carga.



Figura 2. Grúa Monocarril (tomado de: http://www.gruasgh.com/prod2_texto.htm).



Figura 3. Grúa de puente (tomado de: <http://www.gruasindustriales.com.mx>).

Aparte de la cantidad de vigas puente, las grúas viajeras de puente también se dividen según la cantidad de motores y carretillos de carga con los que cuentan. Dentro de ese tipo existen grúas con hasta dos carretillos de carga con doble gancho cada uno, y con hasta siete motores. También varían según el dispositivo para recoger la carga, que puede ser de imán o de balde.

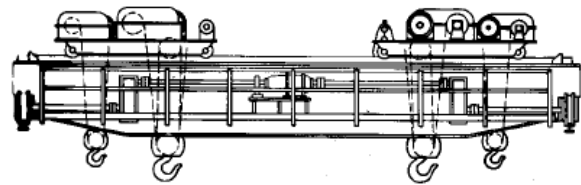


Figura 4. Esquema de grúa de puente con doble carretillo de carga y 7 motores (Whiting Corporation, 1967).

- Grúas de cúpula de carga (Cupola charging cranes): esta clase de grúas utiliza un balde, llamado cúpula, para transportar las cargas. La cúpula cuelga de un gancho unido al cable que proviene del motor. Estas varían según el mecanismo que se encarga de levantar el balde, donde se aplican diferentes tipos de poleas. La estructura que soporta la grúa generalmente cuenta con una columna y una viga, con los arriostres necesarios. Las grúas de cúpula generalmente clasifican dentro de la condición de servicio D o E, y son de capacidades entre las 2 y 7 ½ toneladas.

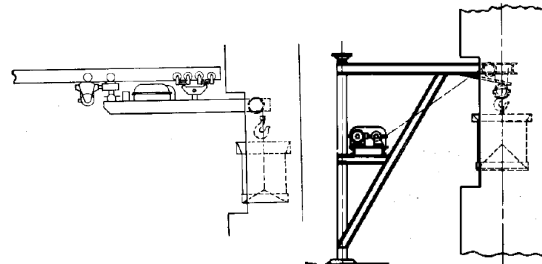


Figura 5. Ejemplos de grúas de cúpula. (Whiting Corporation, 1967)

- Grúas de Pórtico (Gantry Cranes): este tipo de grúa puede utilizarse para cualquiera de las seis clasificaciones de servicio. Se considera similar a la grúa viajera de puente, con la diferencia de que la viga puente no tiene la posibilidad de desplazamiento horizontal. La estructura cuenta con un único marco que sirve de soporte para la viga puente y a su vez al carretillo de carga. Esta clase de grúa tiene variaciones de acuerdo al tipo de marco estructural y tipo de carretillo de carga.

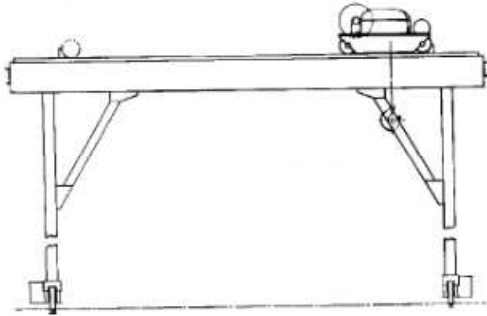


Figura 6. Grúa tipo pórtico (Whiting Corporation, 1967).

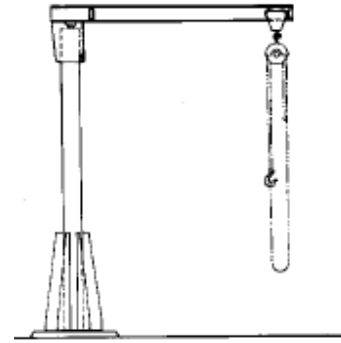


Figura 9. Grúa de pilar manual. (Whiting Corporation, 1967)

- Grúas manuales (handpower cranes): para esta clase de grúas se encuentran de tipo puente, de cúpula y de pórtico, con la excepción de que los mecanismos para levantar la carga son manuales, basados en sistemas de poleas y en ocasiones, contrapesos. Algunos esquemas de este tipo de grúas se muestran a continuación.

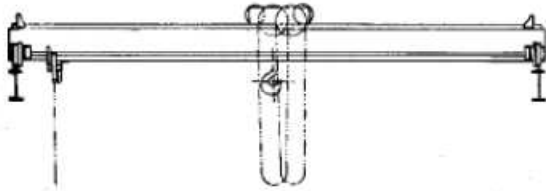


Figura 7. Grúa de puente manual. (Whiting Corporation, 1967)

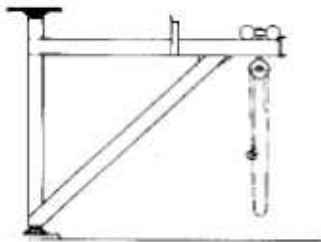


Figura 8. Grúa de pórtico manual. (Whiting Corporation, 1967)

Códigos de diseño aplicables a estructuras de acero con grúas viajeras

Con el fin de realizar un diseño adecuado, que cumpla con las necesidades propias del sitio de construcción y requerimientos estructurales, se debe discernir cuales códigos se aplican con base en esos parámetros. Entre esas necesidades especiales según el sitio de construcción se encuentra las fuerzas naturales que afectan o pueden afectar la edificación, como son las cargas por sismo, viento, nieve, entre otras. Con respecto a los requerimientos estructurales, se debe conocer qué clase de esfuerzos serán inducidos en la estructura a causa de la grúa viajera. Por esto resulta importante la correcta aplicación de códigos de diseño, que consideren estos parámetros.

Códigos de diseño en Costa Rica

En Costa Rica, el diseño de estructural se rige en primer lugar por el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR 2002). Este documento establece los lineamientos generales de definición de cargas y requerimientos en las estructuras. Por lo tanto, se aplica para determinar la carga de sismo probable en la estructura, según la zona geográfica. Además, se definen los procedimientos de diseño que se deben seguir para acero estructural.

Así que, resultan aplicables por parte del CSCR 2002 los siguientes capítulos:

- Capítulo 2: Demanda Sísmica.
- Capítulo 3: Consideraciones Generales.
- Capítulo 4: Clasificación de las estructuras y sus componentes.
- Capítulo 5: Coeficiente Sísmico.
- Capítulo 6: Cargas y factores de participación.
- Capítulo 7: Métodos de análisis y desplazamientos límite.
- Capítulo 10: Requisitos para acero estructural.

En el capítulo 10 se hace mención a otros códigos internacionales que se deben utilizar como referencia, en la siguiente sección se hace un recuento de esos códigos.

Además del CSCR 2002, rige el Reglamento de Construcciones como normativa para la construcción y diseño de obras civiles en general. El mismo contiene especificaciones para el cálculo de cargas tal como la que produce el viento en las edificaciones. Además, hace referencia al diseño de estructuras de acero. Se deben aplicar los siguientes capítulos:

- Capítulo 20: Diseño de estructuras de edificios.
- Capítulo 22: Estructuras de acero.
- Capítulo 23: Materiales de construcción.

Códigos de diseño internacionales

Para el diseño de estructuras de acero, que contengan en su configuración grúas viajeras, se encuentra un vacío en los códigos de diseño nacionales. Es por esto que los mismos códigos nacionales remiten la búsqueda a códigos y lineamientos de diseño internacionales.

American Institute of Steel Construction (AISC) es una entidad reconocida a nivel internacional, que se encarga de dictar especificaciones de diseño para estructuras de acero. En el CSCR 2002 y el Reglamento de Construcciones se hace referencia directa a esta organización, dando por entendido que en el diseño de estructuras de acero se deben cumplir los requerimientos que establece.

Por parte de esta organización se cuenta con:

- Manual of Steel Construction: Load & Resistance Factor Design.
 - o Volume I: Structural Members, Specification & Codes.
 - o Volume II: Connections.

Este documento incluye lineamientos de diseño para elementos en estructuras de acero, características de los perfiles, propiedades de los materiales, entre otra información. En este documento, la información relacionada específicamente con grúas viajeras es limitada. Sin embargo, la institución cuenta con una serie de publicaciones que resultan útiles. Se destacan las siguientes:

- Crane Runway Loadings for Industrial Facilities – Vertical, Lateral and Longitudinal. A review of International Codes and Standards³
- Design of Crane Runway Beam with Channel Cap.⁴
- New Fatigue Provisions for the Design of Crane Runway Girders.⁵

En estos documentos se encuentran procedimientos de diseño para los elementos de la grúa viajera, así como una recopilación de las cargas que se deben utilizar según códigos internacionales que se refieren al tema. Además, según el AISC, cuáles de esos códigos internacionales deben ser aplicados.

Además de las publicaciones mencionadas, el AISC cuenta con guías de diseño para temas específicos que no cubren sus reglamentos. Con respecto a grúas viajeras se cuenta con:

- Design guide 7: Industrial Buildings, Roofs to Anchor Rods.

Esta guía de diseño incluye en sus contenidos las cargas que deben tomarse en cuenta para el diseño de estructuras de soporte de grúas, así como los procedimientos de diseño para las vigas y columnas. También incluye aspectos constructivos y estándares al fabricar la estructura.

Se identifica la Asociación Estadounidense de Fabricantes de Grúas (Crane Manufacturers Association of America – CMAA) como uno de los referentes en normativa de diseño de grúas viajeras. Esta asociación agrupa los fabricantes de grúas de Estados Unidos, y tiene entre sus funciones la normalización y estandarización en la fabricación de grúas. Además se encarga de dictar especificaciones con las que deben cumplir estructuras de soporte para grúas, los mecanismos de funcionamiento de la grúa y el diseño electromecánico. Para

³ (Bohm & Hodgins, 2007)

⁴ (Ellifritt & Lue, 1998)

⁵ (Fisher & Van de Pas, 2002)

estas especificaciones hay dos documentos emitidos por la organización que resultan fundamentales en el diseño. Estos son:

- Specification N°70: Specifications for Top Running Bridge & Gantry Type Multiple Girder Electric Overhead Traveling Cranes.
- Specification N°74: Specifications for Top Running and Under Running Single Girder Electric Overhead Cranes Utilizing Under Running Trolley Hoist.

El primer documento se refiere al diseño de grúas viajeras que cuentan con múltiples vigas de puente, mientras que el segundo se refiere al diseño de grúas con una única viga de puente.

Canadian Institute of Steel Construction (CISC) es otra de las instituciones indicadas como referencia por parte del AISC, gracias a la publicación de una guía de diseño de estructuras de soporte para grúas viajeras, titulado:

- Guide for the Design of Crane-Supporting Steel Structures.

Este documento consiste en una amplia guía donde se explican las cargas que deben tomarse en cuenta en el análisis estructural, criterios de diseño y aspectos constructivos importantes.

Association for Iron and Steel Technology (AIST) es una más de las instituciones a las que hace referencia el AISC. Esta asociación cuenta con una serie de reportes técnicos que tratan temas relacionados con hierro y acero, con respecto a sus propiedades, sus usos como materiales de construcción y el diseño de infraestructura utilizando estos materiales. De la serie de reportes técnicos, resultan aplicables los siguientes:

- AIST Technical Report N°6: Specification for Electric Overhead Traveling Cranes for Steel Mill Service.
- AIST Technical Report N°13: Guide for the Design and Construction of Mill Buildings.

American Society of Civil Engineers (ASCE) se incluye también entre las instituciones con publicaciones aplicables al tema de las grúas viajeras. En este caso la publicación se titula:

- ASCE 07-05: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures

Este documento explica los tipos y magnitudes de carga que se deben considerar en el diseño de varios tipos de estructuras.

El AISC incluye entre las posibles referencias códigos europeos y de Japón, sin embargo, se considera que los códigos

norteamericanos reflejan una realidad más cercana a la costarricense, por eso serán los consultados y aplicados en el presente trabajo.

Los códigos mencionados repiten temas y se usan como referencia entre sí, en algunos criterios coinciden y en otros difieren. Por esto el documento de AISC “Design guide 7: Industrial Buildings, Roofs to Anchor Rods” será aplicado como la referencia principal, y en caso de haber diferencias entre códigos, se aplicará lo que este indique. No obstante, cabe rescatar que este documento no es más que una recopilación de las especificaciones emitidas por los anteriormente mencionados AISC y ASCE, lo cual indica que son las referencias aplicadas por el AISC y por lo tanto las aplicables para nuestro país, según lo mencionado en códigos nacionales.

Análisis de estructuras con grúas viajeras

Al analizar una estructura con mecanismos especiales como una grúa viajera, se debe revisar cuáles son las cargas que se deben tomar en cuenta para un adecuado estudio del comportamiento de la estructura. En los códigos y documentos mencionados en la sección anterior se indican las cargas que se deben modelar con la estructura.

Cargas en estructuras con grúas viajeras

Determinar las cargas que actúan sobre una estructura es fundamental para procurar un adecuado diseño y posterior funcionamiento. Con el fin de considerar varios criterios, se presentan los tipos de carga, forma de definir las y combinaciones de carga según dos entes internacionales, primero según CMAA y posteriormente según AISC.

Cargas según CMAA

Según la especificación N°70 de CMAA, las cargas que actúan en una grúa viajera de puente se clasifican de la siguiente manera:

Cargas principales

Carga muerta (Dead Load – DL)

Corresponde al peso de toda la estructura de la grúa (viga puente), y maquinaria y equipo que este fijado a ella. Esta información la debe brindar el fabricante de la grúa.

Carga del carretillo (Trolley Load – TL)

Consiste en el peso del carretillo y todo el equipo que este contiene. Esta información debe ser suministrada por el fabricante de la grúa.

Carga nominal (Lifted Load – LL)

Es la carga de trabajo (carga nominal), y el peso de los mecanismos para levantar la carga tales como el bloque de carga, balde, magneto o cualquier otro dispositivo que sea utilizado.

Fuerzas verticales de inercia (Vertical Inertia Forces – VIF)

Estas fuerzas incluyen las que se deben al movimiento de los componentes de la grúa, por el movimiento al levantar y bajar la carga. Estas cargas adicionales se incluyen de manera simplificada, al aplicar por separado factores a la carga muerta y a la carga levantada, que toman en cuenta los esfuerzos que provocan en los elementos.

- Factor de carga muerta (Dead Load Factor – DLF): este factor toma en cuenta la carga muerta y la carga del carretillo. Se calcula de la siguiente manera:

$$DLF = 1.1 \leq 1.05 + \frac{\text{Travel Speed (FPM)}}{2000} \leq 1.2$$

Ecuación 1

Donde:

Travel Speed: velocidad máxima de desplazamiento para el puente o carretillo (Pies por minuto)

Este factor se calcula tanto para el puente de la grúa como para el carretillo, pues ambos pueden tener una velocidad máxima diferente.

- Factor de carga nominal (Hoist Load Factor – HLF): este factor aplica al movimiento de la carga nominal en dirección vertical, y cubre las fuerzas de inercia y la fuerza de las masas causadas por un levantamiento

repentino de la carga. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$HLF = 0.15 \leq 0.005 \times \text{Hoist Speed (FPM)} \leq 0.5$$

Ecuación 2

Donde:

Hoist Speed: velocidad de elevación de la carga (pies por minuto).

Cargas de inercia debido al manejo de la grúa (Inertia Forces from Drives – IFD)

Las fuerzas de inercia ocurren debido a la aceleración o desaceleración en los movimientos de la grúa, dependen del manejo de ésta y del torque al aplicar los frenos en cada ciclo.

La carga lateral debida a la aceleración o desaceleración debe ser un porcentaje de la carga vertical y será calculado como 7.8 veces la tasa de aceleración o desaceleración (pies/s²), pero no puede ser menos de 2,5% de la carga vertical. Este porcentaje de la carga se debe aplicar en la carga muerta y nominal.

La carga nominal debe ser localizada en la misma posición que se coloca cuando se calcula el momento máximo. La carga lateral deberá ser dividida entre las dos vigas carrileras, y el momento de inercia de la sección de la viga con respecto al eje vertical será utilizado para calcular el esfuerzo debido a la carga lateral. Las cargas deben ser calculadas con el carrito colocado en la posición más crítica para el componente que se está analizando.

Cargas adicionales

Carga operacional de viento (Operating Wind Load – WLO)

La carga lateral que provoca el viento, en condiciones de operación normal, en grúas colocadas a la intemperie debe ser considerada como 5 libras por pie cuadrado, en la proyección del área expuesta al viento. La carga del viento en el carrito debe dividirse en partes iguales en las vigas puente. Donde existan múltiples superficies expuestas al viento, tal como en las vigas puente, donde la distancia horizontal entre las superficies es mayor que el espesor de la viga, el área a considerar para viento debe ser

1.6 veces el área proyectada de la viga más larga.

En casos donde es una superficie la expuesta al viento, tal como cabinas de operadores, o carcasas de maquinaria, el área a considerar para el viento será 1.2 veces el área proyectada, para tomar en cuenta presiones negativas en la zona a sotavento de la estructura.

Cargas de desgaste (Forces due to Skewing – SK)

Al tener dos ruedas girando a lo largo del riel, las fuerzas horizontales, perpendiculares al riel que tienden a desgastar la estructura, deben ser tomadas en consideración. Las fuerzas horizontales se obtienen de multiplicar la carga vertical ejercida en cada rueda, por el coeficiente S_{sk} , el cual depende de la relación entre el claro del puente con la distancia entre ejes de las ruedas. Se obtiene del siguiente gráfico (Ampliado en sección de apéndices, apéndice 1).

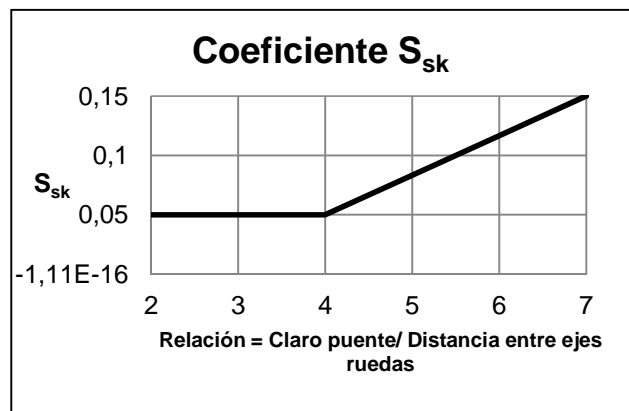


Figura 1. Gráfico para obtener coeficiente S_{sk} ⁶

Fuerzas de colisión (Collision Forces – CF)

Este tipo de carga resulta del choque de las vigas puente con el parachoques. Debe ser calculada con la grúa viajando a 0.4 veces la velocidad nominal, suponiendo que el sistema de parachoques es capaz de absorber la energía que provocaría en choque. Las cargas ya izadas

⁶ (Crane Manufacturers Association of America, 2000)

y que pueden oscilar libremente no deben tomarse en cuenta.

Fuerzas de torsión y momento

Debido a la puesta en marcha y parada de los motores del puente

El momento torsionante debido a la puesta en marcha y parada de los motores del puente es ocasionado por el torque inicial del motor, que se considera como el 200% de la máxima capacidad de torque del motor, esto multiplicado por la relación de transmisión entre el motor y el eje transversal.

Debido a cargas verticales

El momento torsional debido a fuerzas verticales que actúan excéntricamente con respecto al eje neutro vertical de la sección de las vigas, se considerará como esas fuerzas verticales multiplicadas por la distancia horizontal entre la línea de acción de las fuerzas y el centro de cortante de la viga.

Debido a cargas laterales

El momento torsional debido a fuerzas laterales que actúan excéntricamente con respecto al eje neutro horizontal de la sección de la viga, se considerará como las fuerzas horizontales multiplicadas por la distancia vertical entre la línea de acción de las fuerzas y el centro de cortante de la viga.

Combinaciones de carga

Las combinaciones de carga al evaluar una estructura tienen la finalidad de considerar los efectos de distintas cargas actuando de manera simultánea y con diferentes grados de participación.

Para grúas viajeras, el CMAA en la especificación N°70 indica tres combinaciones de carga, una para uso normal de la grúa bajo las cargas principales; la segunda pretende analizar un uso regular, con las cargas principales y adicionales y la tercera considera el efecto que

provoca en la estructura la grúa al ser frenada en los extremos de la viga carrilera. Son las siguientes:

$$\text{Comb. 1} = DL(DLF_B) + TL(DLF_T) + LL(1 + HLF) + IFD \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}$$

$$\text{Comb. 2} = DL(DLF_B) + TL(DLF_T) + LL(1 + HLF) + IFD + WLO + SK \dots \dots \dots \text{Ecuación 2}$$

$$\text{Comb. 3} = DL + TL + LL + CF \dots \dots \dots \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- DL: Carga muerta.
- DLF_B : factor de carga muerta para puente.
- TL: Carga del carretillo.
- DLF_T : Factor de carga muerta para carretillo.
- LL: Carga levantada.
- HLF: Factor de carga levantada
- IFD: Cargas de inercia debido al manejo de la grúa.
- WLO: Carga operacional de viento.
- SK: Cargas de desgaste.
- CF: Cargas de colisión.

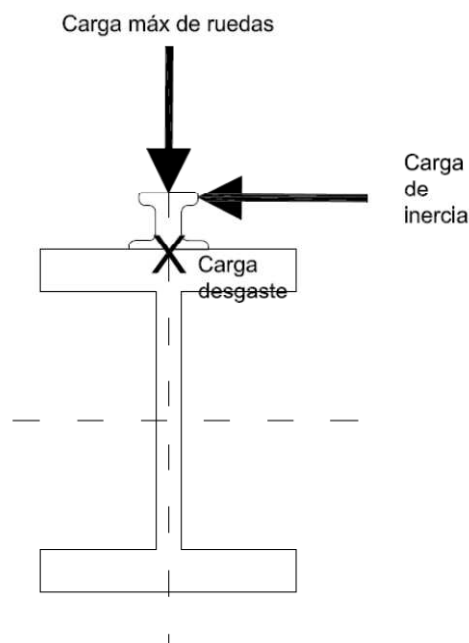


Figura 2. Cargas CMAA en la sección transversal de la viga.

Los diagramas de ubicación de cada una de las cargas ampliados en la sección de apéndices. (Apéndice 2)

Cargas según AISC

El AISC en su documento “Design Guide 7: Industrial Buildings, Roofs to Anchor Rods” define las cargas y combinaciones que se deben tomar en cuenta en grúas viajeras. El documento hace referencia a lo establecido por dos instituciones, AISE y ASCE, las cuales se considerarían las recomendadas a aplicar por AISC. Las cargas son las siguientes:

Impacto vertical

El impacto vertical es considerado como el efecto que provocan las cargas verticales en la viga carrilera, al ser levantadas, así como el efecto del desplazamiento del carretillo de carga.

La magnitud del impacto vertical se calcula con base en la carga máxima de las ruedas. Esta se define como la carga que produce en las ruedas de la grúa el peso del puente, sumado a la capacidad nominal de la grúa junto con el peso del carretillo, colocado este en la posición más crítica del puente.

El valor del impacto vertical se obtiene de multiplicar un factor con la carga máxima de ruedas.

Según AISE, este factor debe ser un 25% de la carga máxima de ruedas para todos los casos, excepto cuando la grúa se coloque en un cuarto de motores, donde el factor debe ser de un 20%.

Según ASCE, el factor de carga de impacto vertical se obtiene del siguiente cuadro.

Tipo de grúa	Porcentaje de carga máxima de ruedas
Grúa monocarril (con motor)	25
Grúa puente operación remota	25
Grúa puente operación con control colgante	10
Grúas puente o monocarril operadas manualmente (sin motor)	0

Empuje lateral

En la estructura de una grúa se producen fuerzas horizontales que deben ser consideradas. Estas son debido a:

- Desalineamiento del carril.
- Aceleración del carretillo de carga.
- Frenado del carretillo de carga.
- Movimiento de la grúa.

El valor de la carga que se debe tomar como empuje lateral se obtiene a partir de un porcentaje que se multiplica por el peso de la grúa.

Según ASCE, este porcentaje es de un 20%, que se multiplica a la suma de: capacidad nominal de la grúa más el peso del carretillo y el gancho. Esta carga obtenida se debe aplicar de manera perpendicular a la viga carrilera y se distribuye en la misma en función de la rigidez de la estructura de soporte.

De acuerdo con AISE, el valor del empuje lateral será el mayor de tres criterios:

- 20% de la carga nominal de la grúa más el peso del carretillo.
- 10% de la carga nominal de la grúa más el peso del puente.
- Aplicando los factores mostrados en la siguiente tabla:

⁷ (Fisher J. , 2004)

Cuadro 2. Porcentajes de carga de empuje lateral según AISE⁸	
Tipo de grúa (según aplicación)	Porcentaje aplicado a la carga nominal
Grúas en fábricas	40
Grúas de distribución	40
Grúas de cucharón o imán	100
Grúas para proceso de remojo de metales (Soaking Pit)	100
Grúas de desensamble	100
Grúas en talleres de mantenimiento	30
Grúas para apilamiento (Stacker cranes)	200

Carga longitudinal o de tracción

Esta carga se aplica de manera longitudinal a lo largo la viga carrilera y se provoca debido al movimiento de la grúa (puente) y el frenado de la misma.

Según ASCE, esta carga será equivalente al 10% del valor de la carga máxima de ruedas.

AISE dice que el factor es de un 20% y se aplica de igual manera a la carga máxima de ruedas.

La carga se coloca en la superficie a tensión de la viga carrilera, en dirección paralela a esta. Además solo aplica para grúas que funcionan mediante motor, en grúas manuales no se debe aplicar.

Fuerzas del parachoques

La magnitud de la fuerza que produce al puente de la grúa al ser frenado por el parachoques depende directamente de la capacidad de absorción de energía que puede proveer el parachoques mismo.

Tanto el parachoques, como el puente, la viga carrilera, las uniones y columnas deben

estar diseñados para transmitir el impacto de la fuerza del parachoques a los cimientos.

La magnitud de la fuerza del parachoques debe ser suministrada por parte del proveedor de la grúa. Esta es en función de la velocidad de tránsito de la grúa y el peso de sus componentes.

Combinaciones de carga

En la guía de diseño 7 del AISC, se indican seis combinaciones de carga que se deben revisar al realizar el diseño de una estructura de soporte para la grúa viajera. Las combinaciones son las siguientes:

Comb. 1: $D + C_{VS} + 0,5 * C_{SS} + C_i$Ecuación 3

Comb. 2: $D + L + C_{VS} + C_i + C_{SS} + C_{IS}$Ecuación 4

Comb. 3: $D + L + C_{VS} + C_i + W$Ecuación 5

Comb. 4: $D + L + C_{VS} + C_i + C_{SS} +$

$0,5W$Ecuación 6

Comb. 5: $D + L + C_{VS} + C_i + 0,67C_{bs}$Ecuación 7

Comb. 6: $D + L + C_D + E$Ecuación 8

Donde:

D: carga muerta.

L: carga viva.

C_{VS} : cargas verticales.

C_i : cargas de impacto.

C_{SS} : cargas laterales.

C_{IS} : cargas longitudinales.

C_{bs} : cargas del parachoques.

W: carga de viento.

E: carga de sismo.

⁸ (Fisher J. , 2004)

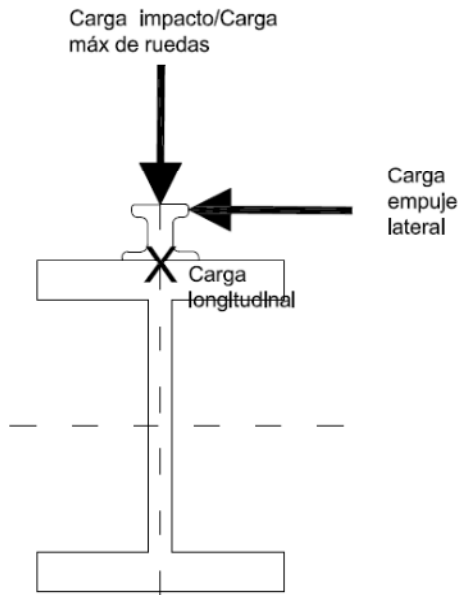


Figura 3. Cargas AISC en la sección transversal de la viga

Los diagramas de ubicación de cada una de las cargas ampliados en la sección de apéndices. (Apéndice 3)

Cargas de sismo

El cálculo de la carga de sismo a la que puede estar expuesta la estructura se hace aplicando el Código Sísmico de Costa Rica 2002 (CSCR 2002).

Uno de los parámetros utilizados para el cálculo de la carga sísmica en una estructura es el peso total de la misma. En el caso de una estructura de soporte para una grúa viajera, surge el cuestionamiento de si se debe o no tomar en cuenta la carga nominal que levanta la grúa para el cálculo de ese peso total. Para obtener respuesta a esa interrogante se analiza la siguiente perspectiva que consiste en la diferencia de periodos de oscilación que existe entre ambos elementos (carga nominal levantada y estructura).

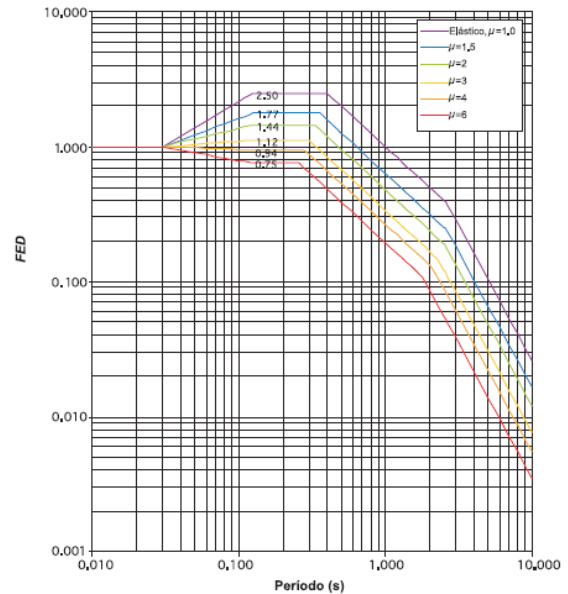


Figura 4. Factor espectral dinámico para sitios tipo S1 en Zona II, según el CSCR 2002.

Según se puede observar en la figura 4, tomada del Código Sísmico de Costa Rica, el factor espectral dinámico tiende a 0 conforme aumenta el valor del período de oscilación de la estructura. En este caso, haciendo una analogía del concepto, se puede observar que para un periodo de 10 segundos, el valor del FED es aproximadamente 1×10^{-2} . Valor que al utilizarse para calcular el coeficiente sísmico y posteriormente la carga sísmica, daría como resultado un valor de escasa magnitud. Es por esto que la carga nominal suspendida en la grúa no debe considerarse dentro del cálculo de la carga sísmica, su período de oscilación es muy grande con respecto al de la estructura, por lo que su movimiento durante un evento sísmico no provoca un efecto en la estructura.

Análisis estructural

Al analizar una estructura que es afectada con cargas móviles, se debe considerar el efecto que producen en los puntos más críticos de la estructura. Para considerar este análisis se debe aplicar el método de líneas de influencia. Las líneas de influencia representan la variación de la reacción, de la fuerza cortante, del momento flexionante o de la deflexión en un punto

específico de un miembro cuando una fuerza concentrada se mueve sobre el mismo. (Hibbeler, 1997)

Este análisis debe efectuarse para cada estructura en específico, no obstante el soporte para grúas viajeras generalmente tiene forma geométrica similar, compuesto por marcos en acero, que brindan soporte al puente de la grúa.

Sin embargo, a pesar de que teóricamente el análisis de líneas de influencia se puede aplicar, este se puede obviar en el análisis de las estructuras en cuestión. Esto se debe a que la carga móvil en la grúa es única y tiene un valor constante para el análisis. Por esto, en lugar de realizar el análisis de líneas de influencia, se puede colocar el carretillo de carga en el punto más crítico para la viga carrilera y sus respectivas columnas. Este punto es cuando el carretillo de carga está lo más cerca posible de la viga carrilera, pues se produce una reacción mayor para ese lado del puente, siendo el más crítico que se pueda producir. Se ilustra en la Figura 5.

Una vez que se sabe el punto más crítico en el que el efecto de la carga de la grúa será mayor sobre los elementos, se deben calcular los esfuerzos que provoca la carga sobre la viga carrilera y columnas. Este procedimiento se puede calcular de forma 'manual', sin embargo con el fin de procurar una mayor exactitud en los resultados se recomienda utilizar algún software de análisis estructural. En el problema ejemplo que se presenta más adelante, el software utilizado es SAP2000 en su versión 14. Este programa es de la compañía Norteamericana Computers & Structures, INC.

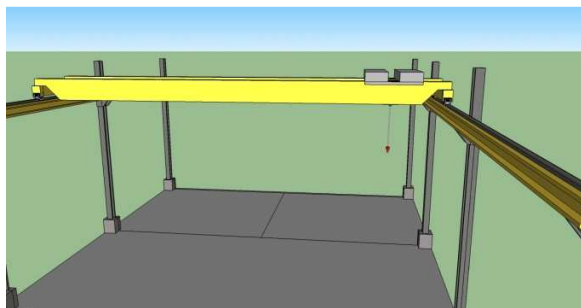


Figura 5. Carga crítica en la grúa.

Al conocer el valor de los esfuerzos presentes en los elementos de la estructura, se procede a la etapa de diseño de los mismos.

Esfuerzos en consideraciones por fatiga

Como parte del diseño de una estructura de soporte para una grúa viajera, mecanismo que expone los elementos a constantes fluctuaciones de los esfuerzos que deben soportar, se deben calcular en ciertas partes de la estructura esfuerzos específicos, producidos por las cargas de servicio, para compararlos con los esfuerzos de fatiga de diseño que se mencionan en la sección de diseño.

Las partes de la estructura que se deben analizar para la posibilidad de falla por fatiga son: el ala en tensión debido a esfuerzos de flexión, la soldadura entre el ala a tensión y el alma y la soldadura en rigidizadores intermedios:

- Ala en tensión: el esfuerzo de fatiga que se debe revisar, es el que provoca la flexión. Se toma en cuenta únicamente el momento flexionante que provocan las cargas vivas. Se calcula como:

$$f_{sr} = \frac{M_L(h-\bar{y})}{I_x} \dots \dots \dots \text{Ecuación 9}$$

Donde:

M_L = Momento flexionante debido a cargas vivas.

h = peralte de la viga sin incluir espesor del ala inferior.

y = distancia al centroide desde el ala superior

I_x = inercia de la sección con respecto al eje x.

- Soldadura entre alma y ala en tensión: este tipo de soldadura generalmente es de tipo filete, y debe ser diseñada para soportar adecuadamente el flujo de cortante en esta zona. Para el cálculo del tipo de soldadura se utiliza el rango de esfuerzo de diseño de fatiga (F_{SR}).

El flujo de cortante se calcula mediante la expresión:

$$q = \frac{VQ}{I} \dots \dots \dots \text{Ecuación 10}$$

Donde:

q = flujo de cortante

V = cortante en la sección

Q = primer momento de área.

I = Inercia de la sección.

- Rigidizadores intermedios: Se debe revisar el esfuerzo en la parte de abajo del rigidizador, con el fin de compararlo con el rango de esfuerzo de diseño. Para determinar este esfuerzo se utiliza el momento flexionante ocasionado únicamente por la cargas vivas, mediante la siguiente fórmula:

$$F_{bx} = \frac{M_c}{I_x} \dots \dots \dots \text{Ecuación 11}$$

Donde:

F_{bx} = esfuerzo en los rigidizadores.

M_c = momento flexionante debido a la carga viva.

I_x = Inercia de la sección respecto al eje x.

En la sección de diseño por fatiga, en el capítulo de diseño, se encuentra el procedimiento para el cálculo de los esfuerzos de diseño, lo cuales son con los que se deben comparar los calculados anteriormente.

Diseño de estructuras de acero para soporte de grúas viajeras

Al comparar el diseño de la estructura de soporte de una grúa viajera, con respecto a cualquier otra estructura convencional, con elementos en tensión, compresión, flexión, y demás, se concluye que las diferencias son pocas, y que salvo algunas consideraciones, el procedimiento de diseño es el mismo.

Se presenta una guía del procedimiento de diseño a seguir en los elementos de la grúa, específicamente la viga carrilera, columnas, ménsulas y unión entre la ménsula y las columnas.

La metodología de diseño aplicada será la de resistencia última, conocida por sus siglas en inglés como LRFD.

Diseño de la viga carrilera

Como resultado de las cargas analizadas en el capítulo anterior, la viga carrilera debe ser diseñada para esfuerzos de flexión en ambos ejes, cortante, flexotensión. Adicional a esto se deben tomar en cuenta consideraciones debido a la fatiga el elemento, puesto que se encuentra expuesto a la fluctuación de esfuerzos, que se producen por el movimiento del puente de grúa.

El procedimiento de diseño para cada uno de estos esfuerzos se presenta a continuación.

Flexión

El esfuerzo a flexión para el cual es diseñada la viga carrilera debe ser igual o mayor al esfuerzo que provoca el resultado de las combinaciones de carga.

El primer paso para el diseño es seleccionar alguna sección que pueda cumplir con los requerimientos del momento último (M_u).

Una vez elegida la sección, se debe definir si la sección es compacta o no compacta.

$$\lambda \leq \lambda_p \text{ Sección compacta}$$

Para formas de I:

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} \dots \dots \dots \text{Ecuación 1.1}$$

Para formas de C:

$$\lambda = \frac{b_f}{t_f} \dots \dots \dots \text{Ecuación 2}$$

Para pandeo del ala

$$\lambda_p = \frac{65}{\sqrt{f_y}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 3.1}$$

$$\lambda_r = \frac{141}{\sqrt{f_y - 10}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 4.1}$$

Para pandeo del alma

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \dots \dots \dots \text{Ecuación 1.2}$$

$$\lambda_p = \frac{640}{\sqrt{f_y}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 3.1}$$

$$\lambda_r = \frac{970}{\sqrt{f_y}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

λ = parámetro de esbeltez

b_f = ancho del ala (pulg o cm).

t_f = espesor del ala (pulg o cm).

t_w = espesor del alma (pulg o cm)

f_y = esfuerzo de fluencia del acero a utilizar (Ksi).

Una vez que se define si la sección que se pretende utilizar en la viga es compacta o no compacta, se procede a aplicar las ecuaciones del cuadro 1, para obtener el momento nominal que resiste la viga propuesta.

La simbología es la siguiente:

L_b = Longitud libre entre apoyos

L_p = longitud de arriostamiento plástico

L_r = longitud de arriostamiento elástico

$M_n = M_p$ = Momento nominal (kg-cm)

Φ_b = factor de reducción, $\Phi_b = 0,90$ para flexión

Z = Módulo de sección plástico (cm³)
 F_y = esfuerzo de fluencia (kg/cm²)
 M_r = Momento residual
 λ = parámetro de esbeltez
 λ_p = parámetro de esbeltez plástica
 λ_r = parámetro de esbeltez elástica

E = Módulo de elasticidad (E=2100000 kg/cm²)
 I_{x,y} = Inercia con respecto al eje x, y (cm⁴)
 J = Constante de torsión (cm⁴)
 G = Módulo de cortante (G=787500 kg/cm²)
 C_w = Constante de alabeo (cm⁶)

Cuadro 1. Fórmulas para diseño a flexión

Relación claro / Tipo de sección	Compacta	No compacta
$L_b \leq L_p$	$M_n = \phi_b * Z * F_y$	$M_n = \phi_b * M_p - \phi_b (M_p - M_r) * \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}\right)$
$L_p < L_b \leq L_r$	$M_n = \phi_b * M_p - \phi_b (M_p - M_r) * \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right)$	Igual que compacta
$L_b > L_r$	$M_n = \phi \left(\frac{\pi}{L_b}\right) \sqrt{EI_y G J + \left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2 I_y C_w}$	Igual que compacta

Algunas fórmulas complementarias para calcular parámetros utilizados en el cuadro 1 son las siguientes:

$$M_r = S_x (F_y - F_r) \dots \dots \dots \text{Ecuación 5}$$

Donde:

M_r = Momento residual (kg-cm)
 S_x = Módulo de sección respecto a eje x (cm³)
 F_r = Esfuerzo residual
 700 kg/cm² perfiles laminados
 1125 kg/cm² perfiles soldados
 F_y = Esfuerzo de fluencia del acero (kg/cm²)

$$L_p = \frac{300r_y}{\sqrt{F_y}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 6}$$

Donde:

L_p = longitud de arriostamiento plástico (cm)
 r_y = radio de giro con respecto al eje y (cm).

$$L_r = \frac{r_y X_1}{(F_y - F_r)} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 (F_y - F_r)^2}} \dots \text{Ecuación 7}$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{E G J A}{2}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 8}$$

$$X_2 = \frac{4 C_w}{I_y} \left(\frac{S_x}{G J}\right)^2 \dots \dots \dots \text{Ecuación 9}$$

Donde:

L_r = Longitud de arriostamiento elástico
 r_y = radio de giro con respecto al eje y (cm).
 F_r = Esfuerzo residual
 700 kg/cm² perfiles laminados
 1125 kg/cm² perfiles soldados
 F_y = Esfuerzo de fluencia del acero (kg/cm²)
 S_x = Módulo de sección respecto a eje x (cm³)
 E = Módulo de elasticidad (E=2100000 kg/cm²)
 J = Constante de torsión (cm⁴)
 G = Módulo de cortante (G=787500 kg/cm²)
 C_w = Constante de alabeo
 I_y = momento de inercia respecto al eje y.

Coefficiente de flexión, C_b

El coeficiente de flexión considera un aumento que se da en la resistencia de la viga cuando la magnitud del momento flexionante que actúa sobre la misma no es constante a lo largo de su longitud. Este factor aplica únicamente para secciones de viga compactas.

El factor se aplica directamente al resultado del momento nominal, siempre y cuando este no sea mayor al calculado cuando L_b < L_p.

C_b se calcula mediante la ecuación:

$$C_b = \frac{12.5 M_{m\acute{a}x}}{2.5 M_{m\acute{a}x} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \dots \text{Ecuaci3n 10}$$

Donde:

C_b = coeficiente de flexi3n.

$M_{m\acute{a}x}$ = Momento m\acute{a}ximo en el claro.

M_A = Momento calculado a $\frac{1}{4}$ de L_b .

M_B = Momento calculado a $\frac{1}{2}$ de L_b .

M_C = Momento calculado a $\frac{3}{4}$ de L_b .

Una vez que se calcula el momento nominal que resiste la viga, tomando todas las consideraciones aplicables, se compara con el momento \acute{u}ltimo resultante de las combinaciones de carga para verificar el cumplimiento de la secci3n. Si la secci3n elegida inicialmente no cumple, se elige otra e inicia nuevamente el proceso.

Flexi3n en el eje d\acute{e}bil

El dise\~no por flexi3n para el eje d\acute{e}bil se hace mediante la siguiente f3rmula:

$$M_{ny} = F_y * Z_y \leq 1,5 * F_y * S_y \dots \text{Ecuaci3n 11}$$

Cortante

En pocas ocasiones, el esfuerzo por cortante es la condici3n que rige el dise\~no de una viga. El procedimiento de dise\~no es por lo tanto, una vez que se ha dise\~nado la secci3n para soportar los esfuerzos de flexi3n, probarla para que cumpla en la resistencia al cortante.

La falla por cortante se puede ocasionar debido a dos condiciones, falla por plastificaci3n del alma o falla por pandeo del alma, este de tipo inel\acute{a}stico o el\acute{a}stico.

Para comprobar en qu\acute{e condici3n de falla se encuentra la secci3n utilizada se revisa seg\~un ciertos l\acute{imites, en la relaci3n ancho-espesor. Con respecto al tipo de falla, cambia la f3rmula que se utiliza para el c\`alculo del cortante nominal que soporta la viga. Esto se presenta en el cuadro 2.

La simbolog\`ia es la siguiente:

h = altura del alma (cm).

t_w = espesor del alma (cm).

F_y = esfuerzo de fluencia del acero (kg/cm^2).

V_n = cortante nominal (kg)

Φ_v = factor de reducci3n para cortante (adimensional). $\Phi_v = 0,60$.

A_w = \`area del alma (cm^2)

El \`area del alma es:

$$A_w = d * t_w \dots \text{Ecuaci3n 12}$$

Donde:

d = peralte total de la viga (cm)

Cortante en la direcci3n d\acute{e}bil

La resistencia a cortante que posee un elemento en la direcci3n "d\acute{e}bil" de la secci3n transversal se debe calcular como:

$$V_n = 0,6 \Phi_v F_y A_w \dots \text{Ecuaci3n 13}$$

Donde:

Φ_v = factor de reducci3n (adimensional). $\Phi_v = 0,90$.

F_y = esfuerzo de fluencia del acero (kg/cm^2)

A_w = \`area del alma (cm^2)

Flexotensi3n

Se considera necesaria la revisi3n del esfuerzo en flexotensi3n, pues las fuerzas longitudinales que se generan en la viga carrilera con el movimiento de la gr\~ua son simult\`aneas con respecto a la flexi3n que generan las cargas de las ruedas del puente. Para considerar este esfuerzo se debe verificar el cumplimiento de una ecuaci3n de interacci3n, donde se toman en cuenta la fuerza axial, y el momento flexionante en ambos ejes de la secci3n.

Se utilizan dos ecuaciones de interacci3n diferentes, en funci3n de la relaci3n de la fuerza de tensi3n en el elemento y la resistencia nominal del mismo.

Para

$$\frac{P_u}{\Phi P_n} \geq 0.2$$

Se utiliza la siguiente ecuaci3n:

$$\frac{P_u}{\Phi P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\Phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\Phi_b M_{ny}} \right) \leq 1.0 \dots \text{Ecuaci3n 14}$$

$$\frac{P_u}{\Phi P_n} < 0.2$$

Se utiliza la siguiente ecuaci3n:

$$\frac{P_u}{2\phi P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1.0 \dots \text{Ecuación 15}$$

El momento nominal se obtiene tal y como se define anteriormente en esta sección. Para calcular la resistencia axial nominal, se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_n = F_y A_g \dots \dots \dots \text{Ecuación 16}$$

Donde:

F_y = esfuerzo de fluencia del acero (kg/cm²)

A_g = área bruta de la sección (cm²)

Flexión biaxial

Para considerar el efecto de momentos flexionantes en los dos ejes principales simultáneamente, se debe verificar el cumplimiento de la siguiente ecuación de interacción:

$$\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1.0 \dots \dots \text{Ecuación 17}$$

Cuadro 2. Fórmulas para diseño de cortante

Condición de falla	Relación ancho / espesor	Fórmula a utilizar
Plastificación del alma	$\frac{h}{t_w} \leq \frac{418}{\sqrt{F_y}}$	$V_n = \phi_v F_y A_w$
Pandeo inelástico del alma	$\frac{418}{\sqrt{F_y}} < \frac{h}{t_w} < \frac{523}{\sqrt{F_y}}$	$V_n = \phi_v F_y A_w \frac{\frac{418}{\sqrt{F_y}}}{\frac{h}{t_w}}$
Pandeo elástico del alma	$\frac{523}{\sqrt{F_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 260$	$V_n = \frac{132000 A_w}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2}$

Consideraciones de fatiga⁹

¹
En estructuras expuestas a constantes fluctuaciones en los esfuerzos que deben soportar, se deben tomar y revisar las consideraciones necesarias para evitar una falla por fatiga en los elementos.

El daño por fatiga se puede definir como un agrietamiento progresivo debido a la fluctuación de esfuerzos en el miembro.

Las grietas por fatiga inician como pequeños defectos o imperfecciones en el material base o en la soldadura. Esas imperfecciones se comportan como amplificadores de los esfuerzos elásticos aplicados y provocan pequeñas zonas donde los esfuerzos se convierten en plásticos. Conforme

se dan los ciclos de carga, esas zonas de esfuerzos plásticos avanzan, hasta que el material se agrieta. En ese momento, la zona de esfuerzos plásticos se traslada a la punta de la grieta y el proceso se repite.

Eventualmente, la grieta se vuelve lo suficientemente grande para que el efecto de la misma combinado con los esfuerzos aplicados exceda la resistencia del material y se produce la fractura final. Las fallas por fatiga son el resultado de la repetida aplicación de cargas de servicio, que producen el inicio de la grieta, la propagación y la fractura final. La variable dominante es el rango de esfuerzos a tensión impuesto por la repetida aplicación de cargas vivas, y no el máximo esfuerzo provocado por la carga viva más la carga muerta.

Cambios abruptos en la sección transversal, discontinuidades geométricas tales como trozos de soldadura, discontinuidades involuntarias producto de falta de precisión en la fabricación y efectos de la corrosión son algunas

⁹ (Fisher & Van de Pas, 2002)

de las causas que pueden provocar la iniciación de la grieta.

El daño por fatiga se desarrolla en tres etapas, iniciación de la grieta, crecimiento estable de la grieta y crecimiento inestable de la grieta hasta la fractura. De las tres, la iniciación de la grieta utiliza alrededor de un 85% de la vida útil en fatiga del elemento, por lo tanto cuando las grietas son de un tamaño detectable, se considera que la vida útil de fatiga está prácticamente agotada y se deben tomar acciones correctivas de inmediato.

Con el fin de calcular los efectos de la fatiga en diversos elementos se definen varias categorías y características, según el tipo de unión y material. La primera clasificación es dividir en secciones los diferentes tipos de uniones que se pueden dar entre elementos. Se establecen ocho¹⁰:

1. Materiales lisos sin soldadura.
2. Conexiones entre materiales con uniones mecánicas.
3. Uniones soldadas entre elementos fabricados (built-up members).
4. Uniones soldadas con soldadura tipo filete.
5. Uniones soldadas en dirección transversal a los esfuerzos.
6. Base de metal en miembros soldados transversalmente.
7. Base de metal con accesorios pequeños.
8. Uniones misceláneas.

Además de la clasificación en secciones de las uniones, se establecen adicionalmente categorías de esfuerzo, que van desde la categoría A hasta la F, que varían según el tipo de unión y el grado de esfuerzo al que se exponen. Estas ya están establecidas por parte del AISC.

Estas clasificaciones son necesarias para obtener el parámetro C_f , utilizado en las fórmulas de esfuerzos de fatiga. Este se obtiene de la tabla A-K3.1, del LRDF Specification for Structural Steel Buildings (1999), publicado por AISC. (Ver anexo 1)

Con el fin de calcular parámetros de fatiga, existen varias ecuaciones, que se aplican según condiciones específicas de cada tipo de unión. Se presentan por esto únicamente los criterios que pueden ser utilizados en estructuras de soporte de grúas viajeras.

El rango de esfuerzo en el punto de la estructura en que se está analizando la fatiga, producido por las cargas de servicio, no debe exceder los límites calculados de la siguiente manera:

Para las categorías de carga A, B, B', C, D, E y E' el rango de esfuerzo de diseño se calcula:

$$F_{SR} = \left(\frac{C_f}{N}\right)^{0.333} \geq F_{TH} \dots \dots \text{Ecuación 18}$$

Para el sistema métrico:

$$F_{SR} = \left(\frac{C_f \times 327}{N}\right)^{0.333} \geq F_{TH} \dots \dots \text{Ecuación 19}$$

Para la categoría de esfuerzo F, el rango de esfuerzo de diseño se calcula:

$$F_{SR} = \left(\frac{C_f}{N}\right)^{0.167} \geq F_{TH} \dots \dots \text{Ecuación 20}$$

Para el sistema métrico:

$$F_{SR} = \left(\frac{C_f \times 11 \times 10^4}{N}\right)^{0.167} \geq F_{TH} \dots \dots \text{Ecuación 21}$$

Donde:

- F_{sr} = Rango de esfuerzo de diseño (ksi o Mpa)
- C_f = Constante obtenida de la tabla A-K3.1 (Ver Anexo 1)
- N = Número de fluctuaciones de esfuerzo durante la vida útil.
- F_{TH} = Rango máximo de esfuerzo para una vida útil indefinida. Tabla A-K3.1 (ksi o Mpa)

Para obtener el número de fluctuaciones de esfuerzo durante el ciclo de vida, se multiplica el número de fluctuaciones por día, por 365 días, por la cantidad de años de la vida útil.

Además de la comparación en el esfuerzo máximo, se compara el rango de esfuerzo de diseño con el esfuerzo de fatiga de servicio:

$$f_{sr} \leq F_{sr} \dots \dots \dots \text{Ecuación 22}$$

Donde:

- f_{sr} = esfuerzo de fatiga debido a las cargas de servicio, obtenido de manera analítica y considerando las propiedades de la sección utilizada en el miembro, en el punto donde se está analizando el efecto de la fatiga.
- F_{sr} = Rango de esfuerzo de diseño, obtenido con alguna de las ecuaciones 18, 19, 20 o 21.

¹⁰ (American Institute of Steel Construction , 1999)

Diseño de columnas

Las columnas son elementos verticales, que tienen como función principal soportar cargas verticales. Sin embargo, es muy común que estos elementos estén expuestos a esfuerzos de flexión adicionales. En el caso de columnas para estructuras de soporte de grúas viajeras, deberán en todos los casos ser diseñadas para soportar cargas de compresión axial, junto con flexión, pues las cargas laterales que se consideran en el diseño de grúas viajeras inducen esa clase de esfuerzos. Por lo tanto, la columna debe ser diseñada para soportar esfuerzos de compresión axial, y flexocompresión.

La resistencia a flexión del elemento se calcula como se explica más arriba en este capítulo, en la sección de diseño de vigas. La resistencia a compresión axial se presenta a continuación.

Compresión Axial

La resistencia a compresión axial de un elemento depende básicamente de dos factores, la longitud efectiva y la relación de esbeltez del elemento.

Los elementos cargados en compresión axial, se pueden clasificar según la susceptibilidad o resistencia que tiene al pandeo. Esta característica depende directamente de la esbeltez del elemento, que se puede definir como la relación entre la sección transversal con respecto a la longitud libre entre los apoyos. Entre mayor sea esta relación, menor resistencia al pandeo tendrá la columna, y viceversa. Entonces se establecen tres clasificaciones: columnas cortas, columnas intermedias y columnas esbeltas. Las columnas cortas cuentan con un área transversal grande con respecto a la longitud libre y fallan por fluencia o aplastamiento; las columnas esbeltas, al contrario, cuentan con una sección transversal pequeña respecto a la longitud libre y su falla se da por pandeo en el rango elástico del material; en el caso de las columnas intermedias, como su nombre indica, son una condición intermedia entre ambos tipos y su falla puede ser por pandeo o por fluencia del material. (Rojas, 2009).

Con el fin de calcular la resistencia a compresión axial, se calcula en primer lugar el

parámetro de esbeltez mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{KL}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \dots\dots\dots \text{Ecuación 23}$$

Donde:

- λ = relación de esbeltez.
- K = factor de longitud efectiva.
- L = Longitud libre de la columna.
- r = radio de giro del eje más débil de la sección.
- F_y = esfuerzo de fluencia del acero.
- E = Módulo de elasticidad del acero.

Para el cálculo del factor de longitud efectiva se manejan dos opciones según AISC. Una aplicable a cualquier columna, y la segunda que puede ser utilizada para columnas que forman parte de marcos continuos. El factor de longitud efectiva depende directamente de los apoyos que tiene la columna en sus extremos. En función de la rigidez y restricción de movimiento que le dan los apoyos para deformarse, se obtiene el valor del factor de longitud efectiva a utilizar. La primera manera para obtener este factor es mediante un cuadro dado por AISC, donde según el tipo de apoyo en los extremos de la columna, se determina el valor de K a utilizar. Este cuadro se presenta en el Anexo 2.

La segunda opción para el cálculo del factor K, es mediante un nomograma (ver Anexo 3) donde, basado en el parámetro G, el cual se calcula para ambos extremos, se obtiene gráficamente el valor del factor de longitud efectiva.

$$G = \frac{\sum I_c}{\sum I_g} \dots\dots\dots \text{Ecuación 24}$$

Donde:

- I_c = inercia de la columna que llega al nudo.
- L_c = longitud de la columna que llega al nudo.
- I_g = inercia de la viga que llega al nudo.
- L_g = longitud de la viga que llega al nudo.

Para obtener el factor G de los extremos de la columna se aplica la ecuación anterior, haciendo la sumatoria de la relación inercia-longitud, de todos los elementos que llegan al punto.

Una vez obtenido el factor de longitud efectiva, se calcula la relación de esbeltez correspondiente a la columna en estudio. Con la relación de esbeltez se calcula el valor del

esfuerzo crítico de pandeo, en el cual se utiliza una de dos ecuaciones, en función del valor de la relación de esbeltez, esto se muestra a continuación:

Si $\lambda \leq 1.5$ entonces el pandeo de la columna es inelástico y el esfuerzo crítico se calcula como:

$$F_{cr} = (0,658\lambda^2)F_y \dots \dots \dots \text{Ecuación 25}$$

Si $\lambda > 1.5$ entonces el pandeo de la columna es elástico y el esfuerzo crítico se calcula como:

$$F_{cr} = \left(\frac{0,877}{\lambda^2}\right)F_y \dots \dots \dots \text{Ecuación 26}$$

Una vez que se calcula el esfuerzo crítico de pandeo, se puede obtener la resistencia nominal de la columna a una carga axial. Esto mediante la siguiente ecuación:

$$P_n = \phi A_g F_{cr} \dots \dots \dots \text{Ecuación 27}$$

Donde:

P_n = resistencia nominal que soporta la columna (kg)

Φ = factor de reducción de carga axial, $\Phi=0,85$ (adimensional)

A_g = área nominal de la sección transversal (cm^2)

F_{cr} = esfuerzo crítico de pandeo (kg/cm^2)

Flexocompresión

El diseño a flexocompresión de columnas implica la utilización de ecuaciones de interacción, que consideren el efecto de ambos tipos de esfuerzo, compresión y flexión en uno o los dos ejes principales.

Según AISC para flexocompresión se pueden aplicar las ecuaciones 12 y 13, utilizadas en la sección de flexotensión, ya mencionadas en este capítulo. Sin embargo, el efecto de la compresión en los elementos es distinto al de la tensión, pues la carga axial en compresión provoca pandeo a la columna, y esto a su vez induce momentos de segundo orden, gracias a la excentricidad que se provoca entre la carga y la deformación del eje principal de la sección transversal. Esta deformación es la que se provoca en el eje con mayor deflexión.

Para considerar los momentos de segundo orden en la interacción, se deben amplificar los momentos en los ejes principales. La amplificación del momento se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$M_u = \beta_1 M_{nt} + \beta_2 M_{lt} \dots \dots \dots \text{Ecuación 28}$$

Donde:

M_u = momento último para utilizar en interacción.

β_1 = factor de amplificación sin desplazamiento lateral

M_{nt} = momento máximo sin desplazamiento lateral. Se conoce como momento de no traslación.

β_2 = factor de amplificación con desplazamiento lateral.

M_{lt} = momento máximo causado por desplazamiento lateral, se conoce como momento de traslación lateral. En un marco arriostrado tiene un valor de 0.

Los factores de amplificación se calculan de la siguiente forma:

$$\beta_1 = \frac{C_m}{\left(1 - \frac{P_u}{P_e}\right)} \geq 1.0 \dots \dots \dots \text{Ecuación 29}$$

Donde:

C_m = coeficiente del análisis elástico de primer orden asumiendo que no hay traslación lateral.

$C_m = 0,85$ si los extremos están restringidos a rotación.

$C_m = 1,0$ si los extremos no están restringidos a rotación.

P_u = carga axial última que actúa sobre la columna.

P_e = carga crítica de Euler

$$P_e = \frac{A_g F_y}{\lambda^2} \dots \dots \dots \text{Ecuación 30}$$

$$\beta_2 = \frac{1}{\left(1 - \frac{\sum P_u}{\sum P_e}\right)} \geq 1.0 \dots \dots \dots \text{Ecuación 31}$$

Donde:

$\sum P_u$ = suma de toda la carga axial última en cada una de las columnas de la estructura en el piso o nivel que está en análisis.

$\sum P_e$ = suma de la carga crítica de Euler, para cada una de las columnas de la estructura en el piso o nivel que está en análisis.

Con la amplificación calculada, se utiliza la ecuación de interacción (ecuaciones 11 y 12 de este capítulo), y se verifica su cumplimiento con la sección utilizada.

Diseño de ménsulas

Las ménsulas deben soportar esfuerzos al cortante y a flexión, ocasionados por la viga carrilera de la grúa. Las ménsulas pueden tener diversas formas geométricas, se abarca en la presente sección el diseño de ménsulas de forma triangular. El AISC, en el capítulo 12, explica cómo obtener los esfuerzos nominales de carga axial y momento flexionante que soporta la ménsula por sí misma. Para carga axial se utiliza la siguiente ecuación:

$$\phi P_n = 0.85 F_y z b t \dots \dots \dots \text{Ecuación 32}$$

$$z = 1.39 - 2.2 \left(\frac{b}{a}\right) + 1.27 \left(\frac{b}{a}\right)^2 - 0.25 \left(\frac{b}{a}\right)^3 \dots \dots \dots \text{Ecuación 33}$$

Donde:

- b = ancho de la ménsula (pulgadas)
- a = altura de la ménsula (pulgadas)
- t = espesor de la placa (pulgadas)
- F_y = esfuerzo a fluencia del acero (ksi)

Para obtener el esfuerzo a flexión se aplica la ecuación:

$$\phi M_n = 0.90 F_y S_x \dots \dots \dots \text{Ecuación 34}$$

Donde:

S_x = Módulo de sección con respecto al eje x

Para obtener el esfuerzo de ruptura a flexión de la ménsula (en el caso de ménsulas fijadas con pernos), se aplica la siguiente ecuación:

$$\phi M_n = 0.75 F_u S_{net} \dots \dots \dots \text{Ecuación 35}$$

Donde:

S_{net} = Módulo de sección neto F_u = Esfuerzo de ruptura del acero (ksi)

El módulo de sección neto toma en cuenta la disminución de inercia en la placa debido a los agujeros de los pernos. Se calcula mediante:

$$S_{net} = \frac{t}{6} \left[a^2 - \frac{s^2 n(n^2 - 1)(d_b + 0.125 \text{ pulg})}{a} \right] \dots \dots \dots \text{Ecuación 36}$$

Donde:

- t = espesor de la placa (pulgadas).
- a = altura de la ménsula (pulgadas).
- s = espaciamiento de los pernos (pulgadas)
- n = cantidad de pernos en una fila vertical
- d_b = diámetro nominal de los pernos (pulgadas)

Se debe comprobar el pandeo local en la ménsula, el cual no ocurrirá si se cumple con:

Para 0.5 < b/a < 1.0

$$\frac{b}{t} \leq \frac{250}{\sqrt{F_y}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 37}$$

Para 1.0 ≤ b/a ≤ 2.0

$$\frac{b}{t} \leq \frac{250}{\sqrt{F_y}} \left(\frac{b}{a}\right) \dots \dots \dots \text{Ecuación 38}$$

Donde:

- b = ancho de la ménsula (pulgadas)
- a = altura de la ménsula (pulgadas)
- t = espesor de la placa (pulgadas)
- F_y = esfuerzo a fluencia del acero (ksi)

Para que este enfoque simplificado del pandeo lateral se cumpla, se deben acatar dos asunciones, la primera, que el centroide de la carga aplicada debe estar aproximadamente a 0.6*b (b = ancho de la ménsula) de la línea de soporte. Segundo que el movimiento lateral de la parte que sobresale de la ménsula debe ser prevenido.

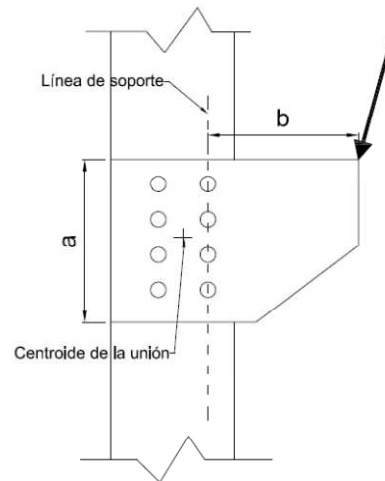


Figura 1. Ménsula unida con pernos

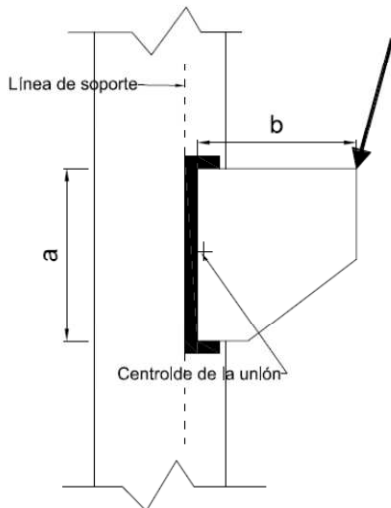


Figura 2. Ménsula unida con soldadura

Diseño de conexiones excéntricas para ménsulas

Una conexión se considera excéntrica cuando la carga aplicada no pasa por el centro de gravedad de los pernos o soldadura. La excentricidad es la distancia perpendicular que hay entre la línea de acción de la carga aplicada con respecto al centroide del área de corte de los pernos o soldadura de la unión.

Análisis elástico para pernos

Se debe determinar cuánta carga soporta cada uno de los pernos. Existen dos enfoques para obtener la carga, el análisis elástico y el análisis de resistencia última. Sin embargo, se evaluará y aplicará el elástico.

El método de análisis elástico considera tomar la carga excéntrica y colocarla en el centroide de los pernos, y para considerar la excentricidad agregar un par calculado como:

$$M = Pe$$

Donde:

M = momento equivalente.

P = carga excéntrica.

e = excentricidad.

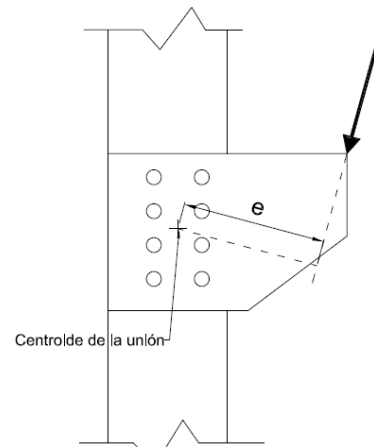


Figura 3. Ménsula cargada excéntricamente

Al realizar este cambio equivalente, la carga pasar a ser concéntrica en la unión y de esta manera se puede considerar que todos los pernos deben tomar la misma fracción carga.

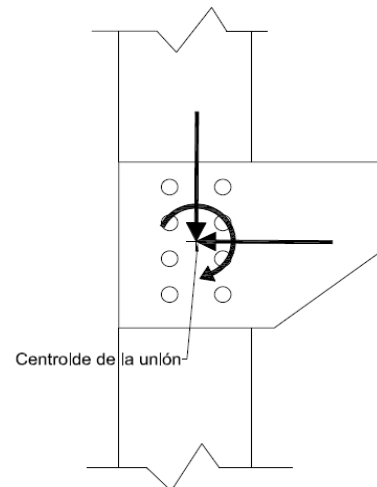


Figura 4. Traslado de cargas equivalentes.

Inicialmente, es más conveniente factorizar la carga excéntrica en componentes (en caso de que las tenga). Una vez expresada en componentes, se puede obtener la fuerza cortante que le corresponde a cada perno con la siguiente expresión:

$$P_{cx,cy} = \frac{P_{x,y}}{n} \dots \dots \dots \text{Ecuación 39}$$

Donde:

$P_{cx,cy}$ = Fuerza cortante en cada perno, en ambos ejes.

$P_{x,y}$ = Componentes en ambos ejes de la carga excéntrica.

n = número de pernos en la unión.

A la fuerza de cortante en cada perno, se le debe sumar el efecto que provoca el momento par, equivalente a la excentricidad. Este efecto se suma linealmente a la fuerza de cortante y se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_{mx} = \frac{M_{\bar{y}}}{\sum(X^2+Y^2)} \dots\dots\dots \text{Ecuación 40}$$

$$P_{my} = \frac{M_{\bar{x}}}{\sum(X^2+Y^2)} \dots\dots\dots \text{Ecuación 41}$$

Donde:

$P_{mx,my}$ = Fuerza cortante en cada perno provocada por el par equivalente a la excentricidad.

M = Momento equivalente a la excentricidad.

x,y = distancia al centroide con respecto al eje de referencia.

$\sum X,Y$ = sumatoria de las distancias en ejes principales de cada perno al centroide de la unión.

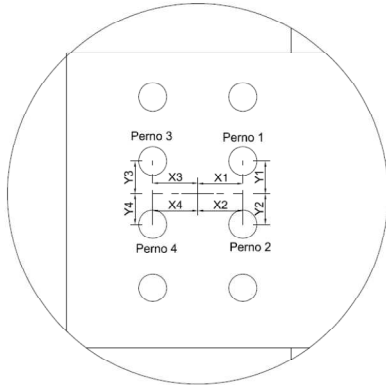


Figura 5. Coordenadas de cada perno

Entonces la carga para la que se debe diseñar cada perno se obtiene a partir de ambas componentes, de la siguiente manera:

$$p = \sqrt{(\sum P_x)^2 + (\sum P_y)^2} \dots\dots\dots \text{Ecuación 42}$$

Donde:

$$\sum P_x = P_{cx} + P_{mx}$$

$$\sum P_y = P_{cy} + P_{my}$$

Coefficiente C para conexiones excéntricas con pernos

Con el fin de facilitar el análisis elástico de la conexión, AISC cuenta con el coeficiente C para las conexiones con pernos cargadas excéntricamente. El análisis elástico se considera conservador con respecto al coeficiente C, pues no considera la ductilidad del grupo de pernos y redistribución de cargas que ocurre al cargar la conexión. Esas consideraciones son analizadas con el coeficiente C. Este coeficiente es un método mediante el cual, en función de la distribución de los pernos en la conexión, se obtiene el valor del coeficiente C, que al multiplicarlo por la resistencia individual de cada perno, da como resultado la resistencia total de la conexión.

$$\phi R_n = C \times \phi r_n \dots\dots\dots \text{Ecuación 43}$$

Donde:

ϕR_n = resistencia última de la conexión.

C = coeficiente C

ϕr_n = resistencia última de cada uno de los pernos.

Para obtener la resistencia última de cada perno individual, se calcula como:

$$\phi r_n = F_t \times A_b \dots\dots\dots \text{Ecuación 44}$$

Donde:

F_t = esfuerzo de fluencia del perno (ksi)

A_b = área transversal del perno (pulgadas²)

El valor del coeficiente C se encuentra tabulado en la tabla 8-18 del AISC, y se determina con los siguientes parámetros:

- Separación entre filas de pernos
- Excentricidad de la carga con respecto al centroide del grupo de pernos
- Ángulo con respecto a la vertical de la carga
- Separación entre columnas de pernos
- Número de filas de pernos

Análisis elástico para soldadura

En el caso de la soldadura, la carga será soportada por el área de soldadura presente en la unión. La carga excéntrica somete la soldadura a un cortante directo y a un cortante torsionante. Como en la soldadura todos los elementos que la

componen resisten la misma porción de cortante directo, este esfuerzo se calcula mediante:

$$f_1 = \frac{P}{L} \dots \dots \dots \text{Ecuación 45}$$

Donde:

P = carga excéntrica.

L = longitud total de soldadura.

Para facilitar el diseño se considera siempre que la soldadura tiene un ancho de garganta unitario (1 pulgada), por lo que bajo esta consideración la longitud total de soldadura es igual al área de cortante.

Al dividir la carga excéntrica en componentes, la expresión para el esfuerzo de cortante directo es:

$$f_{1x} = \frac{P_x}{L} \dots \dots \dots \text{Ecuación 46}$$

$$f_{1y} = \frac{P_y}{L} \dots \dots \dots \text{Ecuación 47}$$

Donde P_x y P_y son las componentes de la carga excéntrica.

Las ecuaciones para obtener el valor del esfuerzo cortante torsionante, con base en las componentes de la carga excéntrica son:

$$f_{2x} = \frac{My}{J} \dots \dots \dots \text{Ecuación 48}$$

$$f_{2y} = \frac{Mx}{J} \dots \dots \dots \text{Ecuación 49}$$

Donde:

M = momento equivalente a la excentricidad.

x = distancia en eje x al punto donde se está calculando el esfuerzo a cortante

y = distancia en eje y al punto donde se está calculando el esfuerzo a cortante.

J = momento polar de inercia del área de soldadura.

Se tiene que el momento polar de inercia del área de soldadura es equivalente a:

$$J = I_y + I_x$$

Donde:

I_y = Momento de inercia respecto al eje y, del área de cortante.

I_x = Momento de inercia respecto al eje x, del área de cortante.

Para obtener el esfuerzo total a cortante en la soldadura, en el punto de interés se utiliza la siguiente ecuación:

$$f_v = \sqrt{(\sum f_x)^2 + (\sum f_y)^2} \dots \dots \text{Ecuación 50}$$

Donde:

f_v = esfuerzo a cortante en el punto de interés.

$\sum f_x$ = suma de los esfuerzos f_{1x} y f_{2x} .

$\sum f_y$ = suma de los esfuerzos f_{1y} y f_{2y} .

Con el esfuerzo al que estará sometida la unión calculada, se deben revisar dos condiciones: que el metal base y la soldadura tengan la resistencia adecuada.

El metal base se comprueba mediante la ecuación:

$$\phi R_n = \phi F_{BM} t \dots \dots \dots \text{Ecuación 51}$$

Donde:

ϕR_n = resistencia del metal base.

ϕ = factor de reducción $\phi=0,54$.

F_{BM} = esfuerzo de fluencia del metal base.

t = espesor de la placa en la unión.

Para comprobar la resistencia de la soldadura se aplica la ecuación:

$$\phi R_n = 0.707 \times w \times L \times \phi F_w \dots \dots \dots \text{Ecuación 52}$$

Donde:

ϕR_n = resistencia de la soldadura (kilo-libras).

w = ancho de la soldadura (Pulgadas)

L = longitud de soldadura (Pulgadas)

ϕF_w = resistencia de la soldadura (Kilo-libras/pulgada²)

Manual de usuario de herramienta de diseño

La herramienta “*Diseño de Estructuras de Acero para soporte de grúas viajeras tipo puente*” pretende abarcar el procedimiento que se debe seguir a la hora de diseñar una estructura con ese fin. Se automatizan los cálculos y se muestran guías de cómo hacer los pasos que no lo están .

Este manual mostrará la utilidad de la aplicación en un caso específico de ingeniería civil, y cómo utilizar los componentes que contiene y su funcionamiento.

Diseño de Estructuras de Acero para soporte de grúas viajeras tipo puente fue creado con el objetivo de brindar al profesional en ingeniería una herramienta que le ayude a elaborar el diseño de una estructura con esa función de manera ágil y prácticamente automática. Es importante antes y/o durante la utilización del programa consultar este manual con el fin de ser guiado en los resultados que el mismo arroja y tener una correcta interpretación de estos.

Conocimientos mínimos para usar la herramienta

El usuario de la herramienta de diseño debe tener conocimientos mínimos en:

- Análisis estructural
- Diseño de estructuras de acero
- Microsoft Excel versión 2007

Partes del programa

La interface principal del programa está contenida en la hoja nombrada “Portada”. En esta hoja se debe incluir la información solicitada y se muestran los resultados obtenidos del diseño.

Además contiene botones que refieren a hojas complementarias, donde se muestran los

procedimientos realizados para llegar al resultado del diseño mostrado en la “Portada” u hojas donde se contiene información que el usuario debe leer para incluir como dato en la “Portada”, para que se puedan hacer los cálculos respectivos.

Las celdas en las que el usuario debe incluir información solicitada están marcadas en color blanco, con el fin de que se puedan distinguir adecuadamente. Además, estas son las únicas en las que el usuario tiene opción de elegir en la hoja de cálculo.

Información general de la grúa	
Marca	
Modelo	
Datos técnicos de la grúa	
Capacidad nominal de la grúa	5 Ton
Peso del puente	2,274 Ton
Peso del carretillo + gancho	1,053 Ton
Separación entre ruedas	1,9 mts
Ancho del carretillo	0,7 mts
Longitud puente	12,5 mts
Claro de viga carrilera	6 mts
Altura de colocación de viga	5 mts
Velocidad máxima del carretillo	0,29464 m/s
Clasificación de la grúa	

Figura 1. Celdas donde se debe digitar información

Las celdas que muestran resultados relevantes del diseño, tales como resultados de comparaciones de esfuerzos nominales contra esfuerzos últimos, estarán siempre marcadas de un color diferente.

Comprobación de esfuerzos

Resistencia en Flexión Mn = 23,99 Ton-m

Resistencia en Cortante eje X Vn = 33,38 Ton

Resistencia en Cortante eje Y Vn = 30,04 Ton

Resistencia en flexo-tensión Resultado Interacción = 0,88

Resistencia en flexión biaxial Resultado Interacción = 4,00

Figura 2. Celdas con resultados de comparaciones

Además, el programa tiene también funciones en las que el usuario debe elegir de una lista o de botones de opción el parámetro que desea utilizar.

Ala en tensión Rigidizadores

Esfuerzo 1 kg/cm² 1 kg/cm²

Constante de fatiga 2500000000 adim 12000000000 adim

Número de fluctuaciones 25550 adim 25550 adim

Categoría de Esfuerzo A

Diseño de los elementos

Viga carrilera

Elemento a utilizar W8x48

Acero a utilizar

Grado de acero

Acero 36 ksi (2530 kg/cm²)

Acero 50 ksi (3513 kg/cm²)

Figura 3. Listas de selección y botones de opción.

En algunos casos la utilización de botones de opción está vinculada a imágenes, que cambian según el parámetro seleccionado, con el fin de ilustrarle al usuario el contenido deseado.

Datos de la ménsula

Forma de ménsula Rectangular Trapezoidal Triangular

Ancho de la ménsula (b) 35 cm

Altura de la ménsula (a) 20 cm

Ancho inferior (bm) 20 cm

Fijada a la columna con Pernos Soldadura

Cantidad de pernos en fila vertical 2

Separación de pernos (pulg) 3

Diámetro nominal pernos (pulg) 1

Ménsula trapezoidal

Figura 4. Imagen vinculada a botón de opción.

Para finalizar, se incluyen cuadros de lista, donde al seleccionar un valor, este se utiliza para los cálculos respectivos.

Uniones

Ménsula - columna

Unión con pernos

Columnas de pernos

Separación entre columnas (pulg)

1 0

2 3

3 4

4 5 1/2

Figura 5. Cuadros de lista.

Funcionamiento del programa

En general el funcionamiento del programa resulta sencillo. Ciertas funciones deben ser ejecutadas mediante botones de acción con solamente darle un clic. Algunas otras funciones se ejecutan automáticamente al cambiar el valor de alguna celda.

Funciones con botones

Las funciones que se deben ejecutar mediante botones se encuentran en la hoja de "Portada" del programa. Estas son:

- Cambio de hojas: estos botones permiten pasar directamente a la hoja del programa que lleva por nombre el botón.

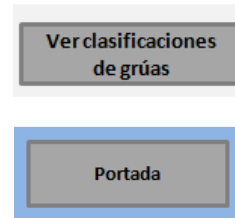


Figura 6. Botones para cambio de hoja.

- Cambio de hoja según selección en botones de opción: se aplica específicamente en el botón "Ver guía de Análisis Estructural", donde el botón mostrará al usuario la hoja de cálculo seleccionada según el botón de opción de los códigos de diseño.

Resultados del análisis estructural

Análisis Estructural

Según AISC

Según CMAA

Figura 7. Cambio de hoja según botón de opción.

- Ejecutar macro de búsqueda: se utiliza en el botón “Buscar Factor C”, donde se realiza la búsqueda de ese factor en las tablas correspondientes según los parámetros elegidos en los cuadros de lista.

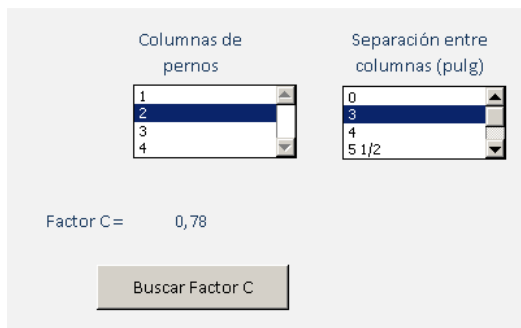


Figura 8. Ejecutar macro de búsqueda.

- Botones de opción: se utilizan en varias ocasiones para definir entre opciones predeterminadas de parámetros necesarios para el diseño de la estructura. Se aplican en la selección del acero a utilizar en los elementos, la forma de las ménsulas y el tipo de conexión para unir las a las columnas, así como la forma de la soldadura en el diseño de la misma.

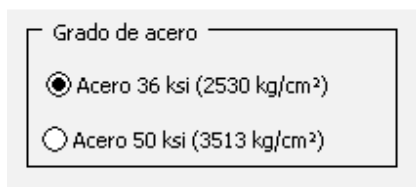


Figura 9. Botones de opción

Funciones con cambio de valores

Las funciones con cambio de valores son las que calculan resultados conforme se cambian los valores en las celdas. Estas se ejecutan automáticamente al cambiar el valor de la celda por el deseado.

- Comprobación de esfuerzos: se aplica en el diseño de la viga carrilera, columnas, ménsulas y uniones. Esta comprobación ocurre al insertar el valor correspondiente a los esfuerzos a los que está expuesto el elemento y al elegir la sección que se pretende utilizar en la lista.

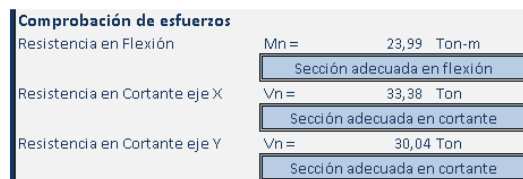


Figura 10. Comprobación de esfuerzos

Cálculos que realiza el programa

El objetivo fundamental de la herramienta es automatizar lo más que se pueda los cálculos estructurales y de diseño que se requieren para dimensionar la estructura.

Por esto los cálculos que realiza se dividen en dos ramas: cálculos estructurales y dimensionamiento de los elementos.

Cálculos estructurales

Para un adecuado diseño de la estructura de soporte de la grúa, es necesario considerar todos los efectos que provoca la grúa sobre la estructura. El programa realiza el cálculo completo de las acciones que provocan las cargas de la grúa sobre la viga carrilera. Estas acciones se calculan considerando la grúa y sus componentes colocados en la posición más crítica posible. Es por esto que en la hoja de “Portada” del programa, las celdas que contienen esos resultados se encuentran bloqueadas, pues no es necesaria ninguna acción por parte del usuario.

Viga carrilera		Ver guía de Análisis Estructural
Cortante máximo eje X	4,60 Ton	
Cortante máximo eje Y	2,00 Ton	
Momento máximo eje X	9,32 Ton-m	
Momento máximo eje Y	4,10 Ton-m	
Carga axial en tensión	0,70 Ton	

Figura 11. Resultados del análisis de la viga carrilera.

Además de la viga carrilera, el programa está diseñado para calcular las acciones sobre las ménsulas provocadas por la grúa y cargas muertas. Sin embargo, el usuario sí debe incluir el valor de la excentricidad que tiene la línea de acción de la carga con respecto al centroide de la unión utilizada (pernos o soldadura).

Ménsulas

Cortante directo (carga excentrica) _____ 4,60 Ton
Excentricidad _____ 0,1 m

Figura 12. Resultados del análisis de las ménsulas.

Con respecto a las columnas, el usuario debe incluir el resultado final de las acciones que las afectan (ya factorizados por todas las combinaciones de carga), pues estas están influenciadas por el comportamiento global de la estructura y cargas que no están dentro del alcance del programa. Lo que incluye el programa son las cargas que debe considerar el usuario en las columnas debido funcionamiento de la grúa. Con el fin de que sean adicionadas a las obtenidas del análisis global de la estructura.

Columnas

Carga axial en compresión _____ 5 Ton
Momento máximo eje X _____ 9 Ton-m
Momento máximo eje Y _____ 2 Ton-m

Figura 13. Datos a incluir para el diseño de las columnas.

Los resultados mostrados para la viga carrilera y para las ménsulas están calculados según el código de diseño seleccionado previamente en los botones de opción.

Además del dimensionamiento de los elementos, el programa contempla un análisis de los requerimientos que tienen las secciones para cumplir con las condiciones de fatiga que se pueden dar en la estructura. En esta sección el usuario debe brindar los datos de esfuerzos en la zona en estudio (en el capítulo de Análisis Estructural se muestra como calcularlos). Adicional al esfuerzo, el usuario debe brindar la constante de fatiga, que se obtiene de la tabla A-K3.1 del AISC. Esta tabla se muestra en el botón "Elegir parámetros de fatiga".

Consideraciones de Fatiga

Ala en tensión	Rigidizadores
Esfuerzo _____ 1 kg/cm ²	_____ 1 kg/cm ²
Constante de fatiga _____ 2500000000 adim	_____ 12000000000 adim
Número de fluctuaciones _____ 25550 adim	_____ 25550 adim
Categoría de Esfuerzo _____ A	_____ A

Elegir parámetros de fatiga

Figura 14. Parámetros a incluir para consideraciones de fatiga.

Dimensionamiento de los elementos

Una vez que se tienen los datos de acciones estructurales que deben soportar los elementos, se deben escoger las secciones adecuadas para satisfacerlos.

El procedimiento de diseño en el programa resulta sencillo, pues la única función que debe hacer el usuario es elegir la sección que desea utilizar y el grado de acero, para el elemento que está diseñando y revisar que las comprobaciones de esfuerzo sean positivas.

Viga carrilera

Elemento a utilizar _____ W8X48

Acero a utilizar

Grado de acero

Acero 36 ksi (2530 kg/cm²)

Acero 50 ksi (3513 kg/cm²)

Figura 15. Elección de la sección y grado de acero

La comprobación de esfuerzos en el elemento se hace de manera automática, de tal manera que se presentan de manera inmediata los resultados de la misma.

Comprobación de esfuerzos

Resistencia en Flexión	Mn = 23,99 Ton-m
	Sección adecuada en flexión
Resistencia en Cortante eje X	Vn = 33,38 Ton
	Sección adecuada en cortante
Resistencia en Cortante eje Y	Vn = 30,04 Ton
	Sección adecuada en cortante
Resistencia en flexo-tensión	Resultado interacción = 0,88
	Sección adecuada en flexo-tensión
Resistencia en flexión biaxial	Resultado interacción = 0,88
	Sección adecuada en flexión biaxial
Consideraciones de fatiga	Ala en tensión
	Fsr = 46,06 kg/cm ²
	Sección adecuada en Fatiga
	Rigidizadores intermedios
	Fsr = 77,70 kg/cm ²
	Sección adecuada en Fatiga

Figura 16. Comprobación de esfuerzos

Una vez que se han seleccionado elementos que cumplen con todos los requerimientos estructurales, se deben diseñar las ménsulas y las uniones de estas con la estructura.

Para el diseño de la ménsula, se debe elegir en primer lugar el espesor de placa que se utilizará en su fabricación, seguido de la forma que tendrá, entre las opciones de rectangular, trapezoidal y triangular. Con la forma definida se

indican las dimensiones que se pretenden utilizar y el tipo de unión que utilizará.

Ménsulas
 Espesor de placa a utilizar Lámina de 5/16" (7,93 mm)

Datos de la ménsula

Forma de ménsula
 Rectangular
 Trapezoidal
 Triangular

Ancho de la ménsula (b) 35 cm
 Altura de la ménsula (a) 20 cm
 Ancho inferior (bm) 20 cm

Fijada a la columna con
 Pernos
 Soldadura

Cantidad de pernos en fila vertical 2
 Separación de pernos (pulg) 3
 Diámetro nominal pernos (pulg) 1

Figura 17. Diseño de las ménsulas

Con la información suministrada, solamente queda revisar que las comprobaciones de esfuerzo estén cumpliendo con los requerimientos.

Comprobación de esfuerzos

Resistencia en carga axial Pn = 5,36 Ton
La ménsula soporta la carga axial

Resistencia en flexión Mn = 1,61 Ton-m
La ménsula soporta la flexión

Pandeo local b/a = 1,75 adim
b/t = 44,09 adim
Limite 1 = 41,67
Limite 2 = 72,917
La ménsula satisface el pandeo local

Figura 18. Comprobación de esfuerzos en ménsulas.

Para el diseño de la unión entre las ménsulas y las columnas se presentan dos opciones: con pernos o soldadura. En el caso de los pernos, el usuario únicamente debe seleccionar entre varios parámetros de cuadros de lista la forma de los pernos, cantidad y separación, oprimir el botón de "Buscar factor C" e inmediatamente obtendrá los resultados de la comparación de esfuerzos.

En el caso del diseño de soldadura, el usuario debe elegir la forma geométrica que la misma tendrá, brindar la información solicitada de

longitud y espesor, y el programa le indicará la resistencia mínima de electrodo a utilizar para que la soldadura resista los esfuerzos.

Unión con soldadura

Forma de la soldadura
 Soldadura lineal
 Soldadura en "C"

Base (E) 0,5 cm
 Altura (H) 20 cm
 Espesor (E) 0,5 cm
 Angulo 30 °
 Excentricidad de la carga 10 cm

Resistencia de electrodo requerida
Fw = 15,833 Ksi

Figura 19. Diseño de unión con soldadura.

Con los elementos estructurales seleccionados, las ménsulas y conexiones de ménsula-columna definidas, se finaliza el diseño de la estructura de soporte en acero para grúas viajeras tipo puente y la utilidad de *Diseño de Estructuras de Acero para soporte de grúas viajeras tipo puente*®.

Especificaciones de diseño y constructivas

Con el fin de que inicialmente el diseño y posteriormente la construcción de la grúa cumplan con todos los requerimientos establecidos por los códigos consultados, se deben acatar las siguientes especificaciones. Todas son tomadas de CMAA¹¹.

Especificaciones de diseño

- Los planos de diseño deben incluir la siguiente información: el claro de la grúa, criterio utilizado para definir las cargas de la grúa, posiciones relativas de análisis, capacidad nominal de la grúa, carga muerta de la viga puente, carretillo de carga y mecanismos que contiene, valor de la carga máxima de ruedas, velocidad del puente, cargas de impacto en los “bumper” al final de la viga carrilera y el criterio utilizado para los cálculos de fatiga.
- No se recomienda utilizar vigas continuas o en voladizo, sin antes realizar una cuidadosa revisión de problemas debido a asentamientos diferenciales de los soportes, elevación de los soportes y la dificultad para reforzar o reemplazar alguna viga.
- No se deben utilizar ménsulas para el apoyo de la viga carrilera cuando las reacciones sin factorizar que provocan sean mayores a 25 toneladas.
- Cuando la columna de soporte de la estructura está conformada por dos o más elementos, estos deben ser unidos de tal manera que funcionen en conjunto.
- Si la columna de soporte de la viga carrilera no está unida a la columna de la estructura, debe considerarse el acortamiento axial de la columna de la viga carrilera.
- Si la estructura experimenta inclinaciones debido a las cargas laterales inducidas por la grúa, se debe implementar un sistema de refuerzo horizontal, ya sea en o sobre el nivel de la viga carrilera.
- No se recomienda que el refuerzo horizontal para las inclinaciones debido a cargas laterales sea compuesto por el diafragma del techo.
- No se recomienda utilizar largueros de arriostre para las columnas de soporte de la viga carrilera.
- Excentricidades causadas por la grúa, tales como rieles no centrados dentro de la tolerancia permitida, y flexión en el eje débil de las columnas, deben ser tomados en consideración.
- El empuje lateral de la grúa debe ser distribuido en función de la rigidez lateral de la estructura de soporte.
- El análisis estructural debe realizarse para considerar efectos en tres dimensiones.
- La deflexión vertical máxima permitida para la viga carrilera, sin incluir impacto, es la fracción del claro acorde con el cuadro 1:

Cuadro 1. Deflexión vertical máxima para viga carrilera.	
Ciclos durante vida útil (en miles)	Deflexión permitida
20	$1/600$
40	$1/600$
100	$1/600$
400	$1/800$
1000	$1/1000$
Mayores a 1000	$1/1000$

- La deflexión horizontal máxima permitida para la viga carrilera, es la fracción del claro acorde con el cuadro 2.

¹¹ (Crane Manufacturers Association of America, 2000)

Cuadro 2. Deflexión horizontal máxima para viga carrilera.

Ciclos durante vida útil (en miles)	Deflexión permitida
20	$1/400$
40	$1/400$
100	$1/400$
400	$1/400$
1000	$1/400$
Mayores a 1000	$1/400$

- El desplazamiento lateral máximo permitido para toda la estructura a la altura de la viga carrilera, debido a las cargas sin factorizar, no debe exceder la fracción del peralte de la columna según el cuadro 3.

Cuadro 3. Desplazamiento lateral máximo para la estructura.

Ciclos durante vida útil (en miles)	Deflexión permitida
20	$1/240$
40	$1/240$
100	$1/240$
400	$1/400$
1000	$1/400$
Mayores a 1000	$1/400$

- Para vigas carrileras o vigas de la estructura que tengan más de 20 metros de claro, la deflexión permitida se calculará con la carga muerta, más un 50% de la carga viva, sin considerar impacto.
- Si la estructura va a estar expuesta a temperaturas mayores a los +150 °C y menores a los -30 °C deben investigarse los efectos que pueden darse.
- El extremo de las vigas carrileras simplemente apoyadas debe estar libre de restricciones para rotación en el plan paralelo al alma de la viga.
- Cuando el desplazamiento lateral de la viga carrilera está restringido, el desplazamiento relativo entre la viga y la estructura de soporte debe ser considerado.
- Soportes longitudinales entre las columnas, que estén colocados por debajo de la viga

carrilera, deben ser diseñados para cargas de fatiga debido a la flexión en la parte inferior de viga carrilera.

Especificaciones de materiales

- Se debe utilizar soldadura de penetración completa y con refuerzo en la unión del alma con el ala superior.
- Los empalmes entre el ala y el alma que estén sujetos a fatiga, deben hacerse con soldadura de penetración completa.
- La soldadura por electro-escoria o electro-gas no es recomendada para empalmes expuestos a fatiga.
- Soldadura intermitente de filete no es recomendable para placas de cubierta.
- La soldadura de la viga carrilera entre el alma y el ala superior debe ser capaz de soportar la carga máxima de ruedas, distribuida a través del riel y el ala superior.
- Los rigidizadores de la viga carrilera deben ser adecuadamente distribuidos. Se deben fijar con soldadura de penetración completa.
- El detallado y la instalación de los rieles de la grúa deben ser hechos conforme a prácticas generalmente aceptadas para disminuir el desgaste de la viga carrilera y la grúa.
- No se recomienda que los rieles sean fijados a la carrilera por debajo del ala.
- Los pernos del riel deben proveerle soporte lateral.
- Los factores de cargas de impacto deben aplicarse a la viga carrilera, sus conexiones y elementos de conexión, incluyendo las ménsulas, pero sin considerar columnas y sus fundaciones.
- Las conexiones sometidas a cargas repetidas o vibraciones deben diseñarse como conexiones pernadas para deslizamiento crítico.
- Se recomienda utilizar pernos pretensados de alta resistencia en todos los elementos de refuerzo y de techo.
- El uso de conexiones con pernos comunes para elementos secundarios es aceptado.
- Donde pueda ocurrir aplastamiento del alma, los esfuerzos en los apoyos deben ser por debajo del rendimiento, para prevenir el pandeo del alma.

- Es recomendado utilizar empaques de hule en los pernos de los rieles.

Especificaciones constructivas

Los estándares para la soldadura de la viga carrilera y sus conexiones a la estructura de soporte son los siguientes:

- Empalmes de soldadura en áreas sometidas a tensión del ala superior o el alma, deben ser inspeccionados con radiografías o ultrasonidos, en la medida porcentual mostrada en el cuadro 4.

Cuadro 4. Inspección en soldadura con radiografía o ultrasonido para tensión.	
Ciclos durante vida útil (en miles)	Porcentaje a inspeccionar
20	15
40	25
100	50
400	100
1000	100
Mayores a 1000	100

- Los empalmes de soldadura en áreas sometidas a compresión en las alas o el alma, deben ser inspeccionados con radiografías o ultrasonidos, en la medida porcentual mostrada en el cuadro 5.

Cuadro 5. Inspección en soldadura con radiografía o ultrasonido para compresión.	
Ciclos durante vida útil (en miles)	Porcentaje a inspeccionar
20	0
40	0
100	0
400	25
1000	25
Mayores a 1000	50

- La soldadura entre el ala y el alma, que sea de tipo de penetración completa, debe ser inspeccionada por radiografías o ultrasonidos, en la medida porcentual mostrada en el cuadro 6.

Cuadro 6. Inspección en soldadura con radiografía o ultrasonido para unión ala - alma.	
Ciclos durante vida útil (en miles)	Porcentaje a inspeccionar
20	0
40	0
100	50
400	100
1000	100
Mayores a 1000	100

- La soldadura entre el ala y el alma, que sea de tipo filete, debe ser inspeccionada en un 100% mediante líquidos penetrantes o partículas magnéticas.

Con respecto a la fabricación de la grúa y las tolerancias permitidas para el posicionamiento de sus elementos se debe cumplir con lo siguiente (adicionalmente ver anexo 5):

- Para la fabricación de la grúa, la tolerancia en el centrado del riel sobre la viga carrilera es tal que la excentricidad del riel no debe ser más de $\frac{3}{4}$ partes del grosor del alma de la viga carrilera.
- Al construir la grúa, la distancia de centro a centro entre los rieles, no debe exceder la distancia mostrada en mm en el cuadro 7 con respecto a la distancia teórica a 20°C.

Cuadro 7. Tolerancia en la distancia centro a centro de los rieles.	
Ciclos durante vida útil (en miles)	Tolerancia (mm)
20	±10
40	±10
100	±10
400	±8
1000	±6
Mayores a 1000	±6

- La parte superior de vigas carrileras adyacentes, debe estar nivelada con las tolerancias mostradas en el cuadro 8.

Cuadro 8. Tolerancia en la nivelación entre vigas carrileras adyacentes.

Ciclos durante vida útil (en miles)	Tolerancia (mm)
20	3
40	3
100	3
400	2
1000	2
Mayores a 1000	2

- Los roles de la grúa en la viga carrilera deben ser fabricados, detallados y ensamblados de tal manera que se coloquen hasta después del alineamiento final. La brecha en el alineamiento no puede ser mayor de 1 mm. Cualquier propuesta diferente para su instalación debe seguir las tolerancias requeridas y ser presentada al diseñador para su aprobación.
- El ala de la viga carrilera, en una distancia de 500 mm de su final, no puede estar deformada de manera curva en la sección transversal, y debe ser perpendicular al alma, en una relación de 1 mm por cada 300 mm.

Además de las tolerancias en la colocación de los elementos, se presentan otros requisitos adicionales que debe tener la grúa al construirse:

- La capacidad nominal de la grúa es determinada por el fabricante. Esa capacidad debe estar marcada en ambos lados del puente de la grúa, y debe ser legible desde el piso.
- Una vez finalizada la construcción, se debe probar la grúa, esto se hace según indicaciones del fabricante.

Resultados

El objetivo principal del presente trabajo, es la creación de una herramienta que facilite el diseño de estructuras de soporte para grúas viajeras tipo puente. Por esta naturaleza, los resultados que se pueden mostrar en esta sección son los obtenidos del diseño ejemplo de la grúa para RECOPE, en el plantel de Siquirres, utilizando los dos códigos de diseño en estudio y haciendo una comparación directa entre los resultados, con el fin de determinar cuál resulta más conservador.

Con el fin de aplicar los procedimientos descritos en capítulos anteriores, y demostrar su correcta aplicación, se presenta a continuación un caso ejemplo de diseño.

Grúa puente de RECOPE, plantel de Siquirres

Como parte de la ampliación de las instalaciones de la estación de bombeo ubicada en Siquirres, Limón, es necesaria la construcción de un taller mecánico para el mantenimiento de partes electromecánicas de la estación, así como el mantenimiento de camiones y otros automotores.

Con base en esos requerimientos se diseñó una distribución de planta con medidas de 21 x 14,5 metros, con cuatro marcos de acero con una luz de 12,5 metros y colocados cada 6 metros. Por lo tanto, la grúa tipo puente tendrá una luz de 12,5 metros.

La estructura tendrá una altura libre por debajo de la grúa de 5,30 metros, y hasta el final de las columnas de 6,65 metros. Los techos serán a dos aguas, en el sentido de la longitud menor, con una pendiente de un 15%.

El diseño de la estructura de soporte contempla las vigas carrileras, columnas y ménsulas. La viga puente forma parte de la grúa como equipamiento, por lo que ya está diseñada.

Características requeridas de la grúa

El primer paso para el diseño de la estructura de soporte de una grúa viajera, es precisamente elegir la grúa que se pretende instalar. El parámetro principal para seleccionarla es la carga nominal que debe ser capaz de levantar. Sin embargo, hay más características que deben definirse para que el proveedor pueda brindar las opciones convenientes. (Arguedas Álvarez, 2011)

Esas características son:

- Carga nominal de la grúa: 5 toneladas.
- Claro máximo de puente: 12,5 metros.
- Altura máxima a izar la carga: 4 metros.
- Altura bajo la viga carrilera: 5,5 metros.
- Altura sobre la viga carrilera: 1 metro.

Con las características nombradas, es información suficiente para obtener los modelos de grúa que se adecuan a las necesidades de la estructura. Con la grúa escogida, se procede al diseño de la estructura que la soportará.

En el caso de estudio, la grúa por la que se optó es de dos marcas comerciales, para el carrito de carga se utilizará una marca Yale Global King, modelo GB3M05-025S20-2, y para los motores, marca Shaw-Box. Además que es una grúa tipo puente, de puente sencillo, es decir solamente requiere 1 viga puente. Cuando se compra una grúa al distribuidor o fabricante, esta generalmente incluye:

- Los soportes del puente (trucks).
- La viga puente.
- Los rieles que se deben instalar en la viga carrilera.
- El carrito de carga y todos sus componentes, incluyendo motores, gancho, entre otros.
- Todo el sistema de electrificación y control de la grúa.

El distribuidor consultado en el país para está grúa es Capris, ubicado en la Uruca.

Para el diseño de la estructura y cálculo de las cargas que produce, es necesario obtener alguna información técnica, que es obligación del fabricante brindar. Esa información consiste en:

- Peso del puente: 2274 kg.
- Peso del carretillo de carga: 1053 kg.
- Separación entre ruedas: 1,9 metros.
- Ancho del carretillo: 0,70 metros.
- Velocidad máxima del carretillo de carga: 55 pies por minuto.
- Velocidad máxima de la grúa: 100 pies por minuto.

Una vez que se cuenta con la información técnica de la grúa, lo siguiente que se debe definir son los ciclos de carga a los cuales estará expuesta. Esta información es necesaria para clasificar la grúa y así definir los parámetros de fatiga con los que debe cumplir.

Los ciclos de carga se deben calcular en función de la vida útil de diseño de la grúa. Para determinar la vida útil se debe considerar el uso que tendrá el equipo, y si fuera del caso alguna normativa que se tenga que cumplir. En nuestro caso de diseño se considerará una vida útil de 20 años.

Una vez que se conoce este dato, se debe obtener una aproximación de la cantidad de veces que en promedio será utilizada la grúa en condiciones normales de operación. Entre más utilizada sea la grúa, mayor importancia cobra esta estimación, pues de ello depende que la grúa este diseñada para soportar el constante cambio en las cargas. Con la estimación de ciclos diarios, estos se multiplican por 365 días al año, y a su vez por la cantidad de años de vida útil, y así se obtienen los ciclos de carga de la grúa.

En este caso se debe considerar que la grúa será utilizada en el mantenimiento de partes de la estación de bombeo que tienen mantenimiento cada vez que es necesario, es decir la frecuencia no está determinada. Además de partes de la estación la grúa, también se utilizará para mantenimiento o reparaciones de camiones de la empresa. Con base en eso se supone que los ciclos de la grúa son dos por semana. Considerando siete días por semana, el promedio de ciclos diarios es de 0,285 ciclos. Haciendo los cálculos respectivos obtenemos que la grúa tendrá 25.550 ciclos de carga durante su vida útil. Con base en las clasificaciones del CMAA, la grúa se considera tipo A.

Análisis estructural

El primer paso para dar inicio al análisis estructural de la grúa es elegir cuál código se utilizará para determinar las cargas. En el presente trabajo se manejan dos opciones, calcularlas según los lineamientos de AISC o según las consideraciones de CMAA.

Para cumplir con el objetivo de demostrar el adecuado procedimiento de diseño, se presentan los análisis según ambos códigos.

Cargas según AISC

Las cargas definidas por AISC para el diseño de estructuras de soporte de grúas son las siguientes:

- Cargas de impacto.
- Cargas de empuje lateral.
- Carga longitudinal.
- Carga del parachoques.

El cálculo de cada una de ellas es de la siguiente manera:

- Carga de impacto: se calcula con base en un porcentaje de la carga máxima de ruedas. Se presentan dos opciones según AISC o según ASCE. En este caso se opta por calcularlas según ASCE. Según el tipo de grúa que se tenga, se determina el porcentaje a utilizar (Cuadro 1, Capítulo Análisis de estructuras con grúas viajeras). En el caso en cuestión, se tiene una grúa monocarril con motor, porcentaje de carga de impacto igual a un 25%.
- Carga de empuje lateral: al igual que la anterior, es un porcentaje de la carga máxima de ruedas. Se deben verificar tres valores, y utilizar el que arroje el resultado mayor. Estos valores son:
 - o 20% de carga nominal más peso del carretillo.
 - o 10% de carga nominal de la grúa más peso del puente.
 - o Conforme al cuadro 2, Capítulo Análisis de estructuras con grúas viajeras.
- Carga longitudinal: De igual manera que los anteriores, es un porcentaje aplicado a la carga máxima de ruedas, de un 20% para la carga longitudinal.

- Carga del parachoques: esta la debe proveer el fabricante de la grúa en función de la velocidad, peso y absorción de energía del parachoques.

Estas cargas se aplican a la viga carrilera, y de ahí se deben distribuir al resto de la estructura. Se muestra además el cálculo para las vigas carrileras de ambos lados del puente, pues al hacer un análisis global de la estructura estas deben colocarse.

La carga máxima de ruedas es la reacción obtenida en las ruedas de la grúa cargada, con el carretillo colocado en la posición más crítica posible.

Aplicando lo anterior, se obtienen los siguientes resultados para la grúa de diseño.

Cuadro 1. Resultados de cargas según AISC		
Peso de puente :	2274,13	kg
Peso del carretillo :	1053	kg
Peso a levantar :	5000	kg
Ancho del carretillo	0,7	metros
Longitud del puente :	12,5	metros
Separación entre ruedas:	1,9	metros
Carga máxima de ruedas :	3510,29	kg
Carga mínima de ruedas :	653,27	kg
Carga de impacto		
Grúa monocarril (con motor)		
Factor de impacto :	25	
Cargas de impacto vertical1:	877,57	kg
Cargas de impacto vertical2:	163,32	kg
Carga de empuje lateral		
Grúas en talleres de mantenimiento		
Factor de carga lateral	30	%
Carga lateral 1:	1500,00	kg
Carga lateral 2:	1210,60	kg
Carga lateral 3:	727,41	kg
Carga de empuje a utilizar :	1500	kg
Cargas longitudinales		
Carga longitudinal 1:	702,06	kg
Carga longitudinal 2:	32,66	kg
Carga del parachoques		
Fuerza del parachoques	0	kg

En el apéndice 3 se muestra cómo se deben colocar las cargas en la viga carrilera.

Las combinaciones de carga que se deben utilizar con las cargas definidas son las siguientes (ver siglas en capítulo de diseño):

Cuadro 2. Combinaciones de carga según AISC	
Combinación 1:	$D + Cvs + 0,5 * C_{ss} + Ci$
Combinación 2:	$D + L + Cvs + Ci + C_{ss} + C_{is}$
Combinación 3:	$D + L + Cvs + Ci + W$
Combinación 4:	$D + L + Cvs + Ci + C_{ss} + 0,5W$
Combinación 5:	$D + L + Cvs + Ci + 0,67 C_{bs}$
Combinación 6:	$D + L + CD + E$

Las combinaciones de carga se deben aplicar a los esfuerzos compatibles provocados por cada una de las cargas y no a las cargas directamente, pues estas varían en dirección.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de cada combinación de carga, para cada uno de los esfuerzos que provocan en la estructura.

Cuadro 3. Resultado de combinaciones de carga AISC en viga carrilera.					
Comb. de carga	Cortante X (kg)	Cortante Y (kg)	Mx (kg-m)	My (kg-m)	Axial (kg)
Comb. 1	2172,57	1000,00	4335,65	2050,00	0,00
Comb. 2	4602,57	2000,00	9317,15	4100,00	702,05
Comb. 3	4602,57	0,00	9317,15	0,00	0,00
Comb. 4	4602,57	2000,00	9317,15	4100,00	0,00
Comb. 5	4602,57	0,00	9317,15	0,00	0,00
Comb. 6	2644,75	0,00	5303,62	0,00	0,00

Cargas según CMAA

Según CMAA las cargas que deben considerarse en la estructura son:

- Carga muerta
- Carga del carretillo
- Carga levantada
- Carga de inercia
- Cargas de desgaste
- Cargas de colisión

El procedimiento para el cálculo de cada una de estas cargas es el siguiente:

- Carga muerta: está compuesta por el peso del puente de la grúa y el equipo que esté fijado.
- Carga del carretillo: Corresponde al peso del carretillo de carga y todos sus accesorios.
- Carga levantada: carga nominal para la que se diseña la grúa.
- Carga de inercia: se obtiene de calcular las cargas en las ruedas por 7,8 veces la tasa de aceleración o desaceleración, pero no puede ser menor al 2,5%.
- Cargas de desgaste: es el resultado de multiplicar la carga máxima de ruedas por el coeficiente de desgaste (Figura 1, capítulo Análisis de Estructuras con Grúas Viajeras).
- Cargas de colisión:

Las cargas muerta, del carretillo y levantada tienen su reacción en las ruedas de la grúa, por lo tanto componen la carga máxima de rueda. El resto de cargas se distribuyen en diversos puntos de la viga carrilera. En el apéndice 2 se muestra esta distribución.

Los resultados obtenidos para las cargas según CMAA se presentan a continuación.

Cuadro 4. Resultado de cargas según CMAA		
Peso de puente :	2274,125	kg
Peso del carretillo :	1053	kg
Peso a levantar :	5000	kg
Ancho del carretillo	0,7	metros
Longitud del puente :	12,5	metros
Separación entre ruedas:	1,9	metros
Cargas muertas		
Peso de puente:	2274,125	kg
Carga del carretillo		
Peso del carretillo:	1053	kg
Carga Levantada		
Carga nominal:	5000	kg
Carga de inercia		
Tasa de aceleración	2	pies/s ²
% Carga inercia	15,6	
Carga de inercia calculada	621,32	kg
Carga de inercia mínima	99,57	kg
Carga de inercia	621,32	kg
Carga de desgaste		
Relación claro/ruedas	6,58	
Coeficiente Ssk	0,136	
Carga de colisión		
Carga de colisión	0,00	kg

Las combinaciones de carga que deben aplicarse según CMAA se presentan en el cuadro 5. (Ver siglas en capítulo de diseño)

Cuadro 5. Combinaciones de carga según CMAA	
Combinación 1:	DL (DLFB) + TL (DLFT) + LL (1+HLF) + IFD
Combinación 2:	DL (DLFB) + TL (DLFT) + LL (1+HLF) + IFD + WLO + SK
Combinación 3:	DL + TL + LL + CF

El resultado de los esfuerzos para cada combinación de carga se presenta en el cuadro 6.

Cuadro 6. Resultado de combinaciones de carga CMAA en viga carrilera					
Comb. carga	Cortante X (kg)	Cortante Y (kg)	Mx (kg-m)	My (kg-m)	Axial (kg)
Comb. 1	3931,61	613,33	8059,80	1257,33	0,00
Comb. 2	3931,61	613,33	8059,80	1257,33	230,38
Comb. 3	3510,26	0,00	7196,03	0,00	0,00

Análisis de esfuerzos de fatiga

Los esfuerzos de fatiga no dependen de cuál código de diseño se utilice. Para el ejemplo de diseño se revisan en el ala en tensión de la viga carrilera y en la soldadura de los rigidizadores de la viga carrilera. Se aplican las ecuaciones 9 y 11 del capítulo de Análisis de estructuras con grúas viajeras.

Los resultados obtenidos son:

Ala en tensión: $58,8 \text{ kg/cm}^2$

Rigidizadores: $55,2 \text{ kg/cm}^2$

Con la información obtenida, se puede proceder a diseñar las secciones requeridas para los elementos.

El análisis estructural mostrado incluye únicamente el procedimiento realizado para la viga carrilera, y ménsulas (se utilizan las mismas cargas básicamente) y no para el resto de la estructura, pues esto no forma parte del alcance del trabajo. Sin embargo, se debe tener presente que el resto de la estructura, tal como columnas, vigas de amarre de la nave, largueros de techo y clavadores deben analizarse utilizando las cargas que les transmite la grúa (viva y muerta) y cualquier otra que actúe, tal como viento y sismo, así como aplicarse las combinaciones de carga del Código Sísmico de Costa Rica 2002. Se muestran por lo tanto únicamente los resultados de este análisis. Para lograr la transmisión de las cargas de la grúa al resto de los elementos, se incluyen estas cargas en el modelo estructural elaborado en SAP 2000. Para su revisión se incluye en el CD adjunto.

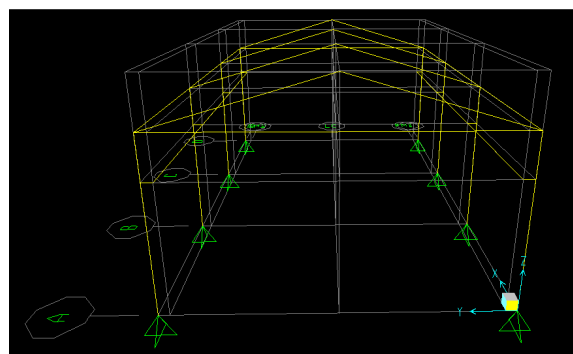


Figura 1. Modelo estructural en SAP 2000.

Cuadro 8. Resultados de cargas críticas en elementos.

Elemento	Axial (kg)	Cortante X (Kg)	Cortante Y (Kg)	Momento X (kg-m)	Momento Y (kg-m)
Columna	-9793	1238	288	1816	4754
Viga de amarre	1226	439	1910	3829	1507
Larguero	1429	0	804	1553	0

Los resultados mostrados en el cuadro 8 provienen de la herramienta de análisis estructural SAP2000 de Computers & Structures, en su versión 14.

Diseño estructural

Tal y como se menciona en el capítulo de *Diseño de estructuras de acero para soporte de grúas viajeras*, el diseño de la estructura de soporte, una vez pasado el análisis estructural, se resuelve como cualquier otra estructura de ese material.

A continuación se muestran de manera general los pasos seguidos en el diseño de cada uno de los miembros y el resultado obtenido.

Diseño de viga carrilera

Para el diseño de la viga carrilera se aplica la sección Diseño de Viga Carrilera, en el capítulo *Diseño de estructuras de acero para soporte de grúas viajeras*, donde se explican con detalle los procedimientos a seguir en el diseño de una viga, los tipos de esfuerzos que se deben considerar y las fórmulas que les asignan valores. Del capítulo mencionado se aplican para el diseño de la viga carrilera las ecuaciones desde la 1 hasta las 17, a

través de la herramienta de diseño. Las cargas utilizadas en el diseño son calculadas de dos maneras, por el código del AISC, y por el código de CMAA, por lo que más adelante se muestran las secciones obtenidas para ambos.

Diseño de fatiga

La viga carrilera, además de los esfuerzos comunes a los que está expuesta, debe dimensionarse también según la fatiga a la que estará expuesta durante su funcionamiento. El diseño para fatiga resulta menos común por lo que se presenta de una forma más explícita.

Las consideraciones de fatiga en la estructura no dependen del código usado en el análisis estructural. Los parámetros necesarios para el cálculo son la cantidad de fluctuaciones en el esfuerzo, es decir los ciclos durante la vida útil, y la constante de fatiga. La primera ya se obtuvo, y la segunda se obtiene a partir de la tabla A-K 3.1 del LRFD (Anexo 1). En esa tabla se debe buscar el caso que se asemeje al que se está analizando.

En el caso de diseño, se considera la fatiga en el ala en tensión y en los rigidizadores. Para la primera se considera que el caso es el equivalente al 1.2 de la tabla, en la sección de elementos lisos. Para los rigidizadores se considera que son del caso 5.7 de la tabla, en la sección de uniones soldadas en dirección transversal a los esfuerzos.

De la tabla A-K3.1, se obtiene que la constante de diseño para la fatiga en el ala en tensión es de $C_f = 120 \times 10^8$ y que para los rigidizadores es de $C_f = 44 \times 10^8$. Posterior a esto, es necesaria la cantidad de fluctuaciones en el esfuerzo que tendrá la sección durante su vida útil. Esto se considera igual al número de ciclos de la grúa, obtenido antes en este capítulo. Ciclos = 25.550. Con estos datos, es suficiente para que la herramienta de diseño realice el cálculo del esfuerzo de fatiga permisible para las dos zonas de la sección en análisis y compararlos con los reales en la estructura.

Diseño de las ménsulas

El procedimiento para el diseño de ménsulas se muestra de manera detallada en la sección con ese título, en el capítulo de diseño.

Básicamente primero se debe decidir la forma geométrica con que se pretende diseñar la ménsula, con el fin de obtener las propiedades necesarias para el diseño. Las fórmulas que se deben aplicar van de la 32 a la 52, y abarcan tanto el diseño de la ménsula, así como las uniones de está con la columna.

Resultados del diseño estructural

Estructura de soporte de la grúa

En los cuadros 9, 10 y 13 se muestran los resultados obtenidos en el diseño de la viga carrilera, utilizando los dos códigos de diseño en estudio. Además en los cuadros 11 y 12 se muestran los resultados para el cumplimiento de la normativa en deformaciones

Cuadro 9. Combinaciones críticas para viga carrilera.					
Comb.	Axial (kg)	Cortante X (Kg)	Cortante Y (Kg)	Momento X (kg-m)	Momento Y (kg-m)
2- AISC	702,05	4602,57	2000,00	9317,15	4100,00
2 - CMAA	230,38	3931,61	613,33	8059,80	1257,33

Según se puede observar en el cuadro 9, de ambos códigos, el AISC da como resultado cargas con magnitudes mayores. En el cuadro 10 se puede observar porcentualmente, qué tan mayores son las acciones del AISC, con respecto al CMAA.

Cuadro 10. Comparación porcentual entre resultados de diseño.					
Comb.	Axial (kg)	Cortante X (Kg)	Cortante Y (Kg)	Momento X (kg-m)	Momento Y (kg-m)
2- AISC	67%	15%	69%	13%	69%

Para dar una mejor idea, se muestra en la figura 1 una comparación gráfica entre cada una de las acciones.

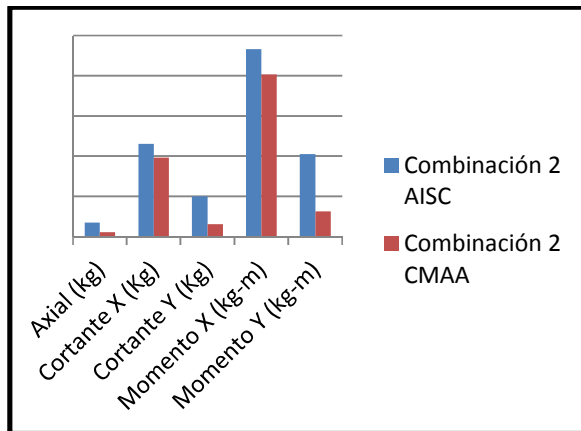


Figura 1. Comparación entre AISC- CMAA

Con base en los resultados de las combinaciones mostradas, se utiliza la herramienta de diseño para dimensionar la viga carrilera, para ambos códigos. Primero se revisan las deformaciones.

Cuadro 11. Deformaciones verticales de viga carrilera

Viga carrilera	Deformación máxima (m)	Permitida por CMAA (m)	Permitida por CSCR 2002 (m)
1	0,000763	0,01	0,0167
2	0,000763	0,01	0,0167
3	0,00393	0,01	0,0167
4	0,00978	0,01	0,0167
5	0,000763	0,01	0,0167
6	0,000763	0,01	0,0167

Cuadro 12. Deformaciones horizontales de viga carrilera

Viga carrilera	Deformación máxima (m)	Permitida por CMAA (m)	Permitida por CSCR 2002 (m)
1	0	0,015	0,0167
2	0	0,015	0,0167
3	0,0143	0,015	0,0167
4	0,0143	0,015	0,0167
5	0	0,015	0,0167
6	0	0,015	0,0167

Cuadro 13. Secciones obtenidas para viga carrilera

Código de diseño	Sección Obtenida	Peso (lb/ft)	Área (in ²)
AISC	W8x48	48	14,1
CMAA	W8x31	31	9,12

Una vez que está dimensionada la viga carrilera, se procede a dimensionar las ménsulas y sus uniones.

Cuadro 14. Diseño de ménsulas

Código de diseño	Espesor de lámina	Forma ménsula	Altura (cm)	Ancho (cm)
AISC	5/16"	Trapezio	30	50
CMAA	5/16"	Trapezio	25	50

Cuadro 15. Diseño de unión ménsula-columna

Código de diseño	Tipo unión	Ancho garganta (cm)	Longitud total (cm)	Electrodo (Fw)
AISC	Soldadura	2,5	35	E70
CMAA	Soldadura	2,5	25	E70

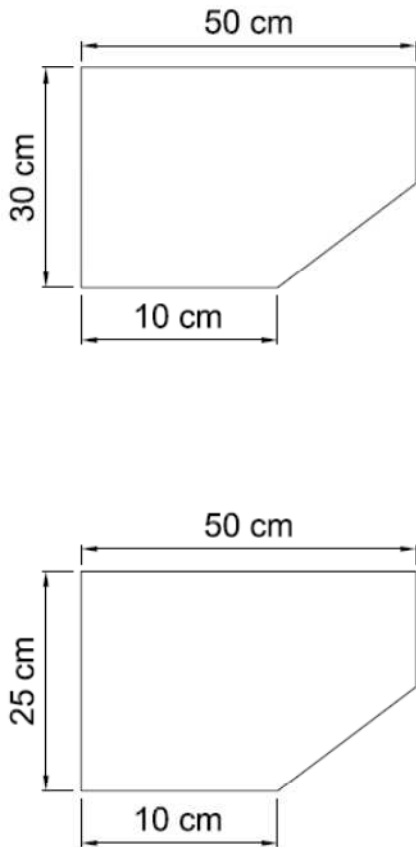


Figura 2. Ménsula trapezoidal AISC y CMAA respectivamente

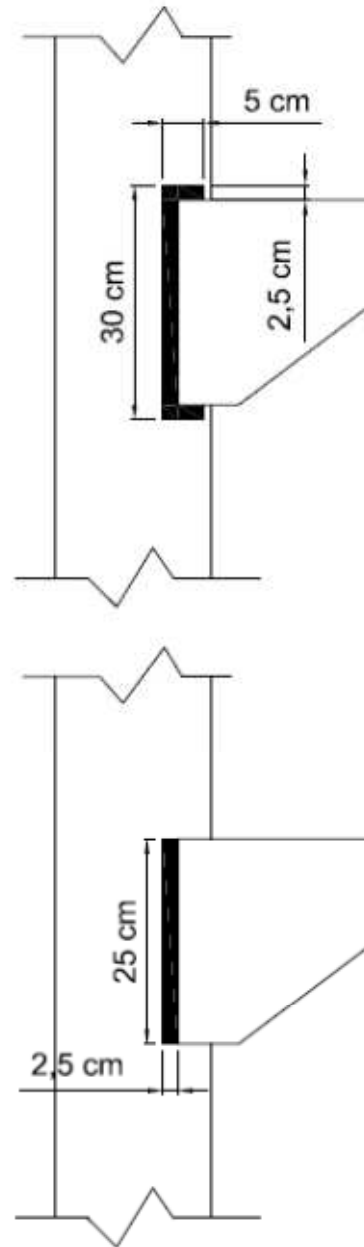


Figura 3. Detalle unión ménsula por AISC y CMAA respectivamente

Estructura de la nave industrial

El resto de la estructura, es decir columnas, vigas de amarre y largueros se diseña bajo los mismos conceptos de diseño que la estructura de soporte de la grúa, sin embargo las cargas se consideran de manera diferente. En lugar de aplicar los

códigos de CMAA y AISC, se utiliza el CSCR 2002. El resultado de las acciones que deben soportar se muestra en el cuadro 8. Las secciones obtenidas para cada uno se muestran en el cuadro 14.

Cuadro 16. Secciones de la estructura de la nave industrial.			
Elemento	Sección obtenida	Peso (lb/ft)	Área (in ²)
Viga de amarre	W8x24	24	7,08
Columnas	W12x53	53	15,6
Largueros	W5x19	19	5,56

En la figura 4 se muestra un esquema del diseño final de la estructura que soportará la grúa en Siquirres.

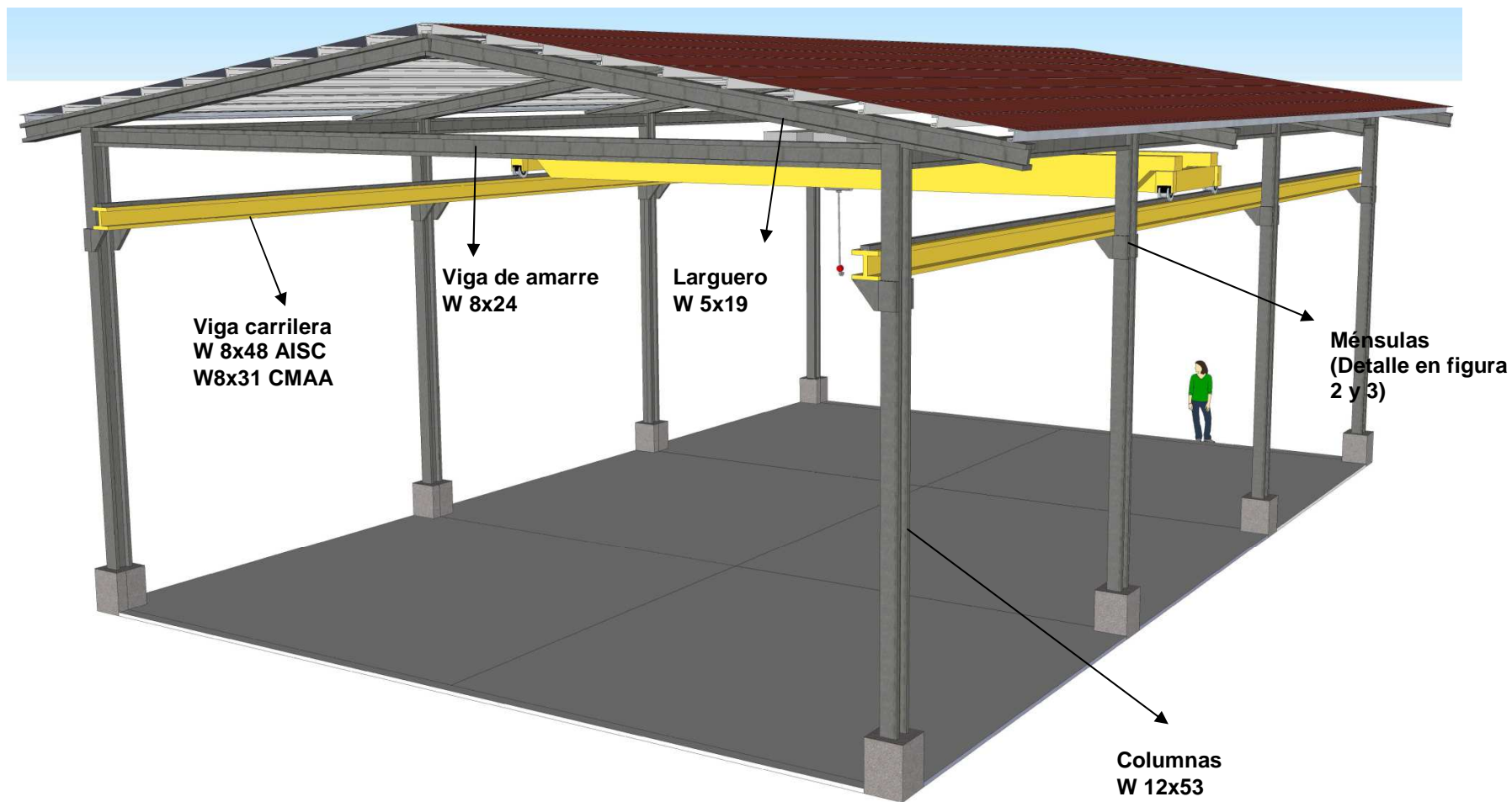


Figura 4. Esquema del diseño final, estructura de soporte grúa puente en Siquirres, RECOPE.

Análisis de los resultados

Por la naturaleza del objetivo principal del trabajo realizado, los resultados presentados anteriormente no se derivan directamente del mismo. Sin embargo, se obtienen a través de la herramienta de diseño. Es por esto que el primer punto a considerar es la real utilidad de la herramienta de diseño, como un complemento adecuado para un ingeniero que desee diseñar una grúa viajera.

La herramienta está estructurada de tal manera que el usuario debe, para iniciar, realizar una investigación del tipo de grúa que le funciona para sus necesidades. ¿Por qué no automatizar esto? Como resultado de la investigación realizada, se llega al criterio de que las características necesarias para escoger una grúa son inherentes a cada proyecto en específico, y antes de tratar de cubrir la mayor cantidad de posibilidades que se puedan dar, resulta más sencillo que el usuario utilice el ejemplo para guiarse y determine por sí mismo las características que la grúa debe tener.

Pasado por este cuestionamiento, se debe analizar y justificar por qué se dio la escogencia de los códigos del CMAA, y del AISE-ASCE. La decisión es basada en parte en el estudio "Crane Runway Loadings for Industrial Facilities- Vertical, Lateral and Longitudinal, A review of International Codes and Standards" (Bohm & Hodgins, 2007). En él se hace una recopilación de códigos internacionales que cubren de manera parcial o completa, el diseño de estructuras para grúas viajeras. En el documento (completo en el Anexo 4) se pueden observar los resultados de la comparación directa entre 13 códigos de diseño, de diferentes países. Paso a paso se muestran tabulados los distintos valores que cada código considera según la carga en cuestión, y posteriormente gráficos que muestran el resultado de cálculos hechos con cada código.

El primer razonamiento que se da con base en las tablas de comparación, y consiste en que no todos los códigos presentados cubren la totalidad de cargas que se deben usar en una grúa viajera. Esto limita la aplicación de los que están 'incompletos' pues augura resultados con la misma característica.

El segundo razonamiento es en función de los gráficos comparativos de resultados. (Ver Anexo 4). La figura 15, 16 y 17 del documento citado, muestra gráficos donde claramente se puede observar la diferencia entre magnitudes de los resultados al calcular las cargas con cada código en análisis. Para las cargas en impacto (Figura 15) el autor resalta que la diferencia entre sus comparaciones es poca, y se mantienen dentro de un promedio. Esto hace concluir que la carga de impacto es una de las más importantes a considerar en el diseño, pues todos los códigos le dan la misma importancia.

En la siguiente figura del documento (Figura 16), se muestra el resultado de la comparación para el cálculo de cargas laterales. En este caso las diferencias entre cada código son significativas. En algunos se puede apreciar hasta de un 100%. Se analiza que el código CMAA en la comparación se encuentra cerca de los resultados más bajos, mientras que AISE se encuentra entre los más altos. Con base en esa apreciación se determina que resulta conveniente para el usuario una herramienta que utilice códigos de ambos extremos de lo que se podría llamar una filosofía conservadora, contra una audaz. Eso da espacio a que el usuario aplique su criterio y defina qué tan importantes son para su proyecto en específico las cargas laterales, y con base en eso haga su escogencia de código.

Con base en el argumento anterior, se considera como una fortaleza de la herramienta que utilice dos códigos de diseño con enfoques diferentes, que permiten al usuario utilizar su criterio en la aplicación.

El siguiente punto que se debe analizar de la herramienta es la sección de Análisis estructural. La misma muestra paso a paso cómo se debe calcular cada una de las cargas que afectan la viga carrilera. Además, cuenta con un video que ubica al usuario con respecto a dónde debe colocar las cargas. Eso es positivo, sin embargo el alcance de la sección de análisis estructural, es a la vez una de sus limitaciones, permite el cálculo de las cargas que afectarán la viga carrilera, y a sus ménsulas y unión ménsula-columnas. El resto de los elementos que conforman la armazón donde se ubica la grúa no se analizan en esa herramienta. La razón es la variedad de efectos que pueden interferir en el comportamiento global de la estructura, que no se deben a la grúa. El cálculo de esos efectos, tales como cargas vivas adicionales, cargas naturales o cargas muertas, aparte de no ser parte del alcance del proyecto, tienen una variedad que resulta muy difícil de automatizar con los medios que se cuentan.

El análisis de fatiga que se muestra en la herramienta, es utilizado por ambos códigos. En la literatura se mencionan varias secciones de la viga carrilera donde la fatiga debe ser revisada. Sin embargo, se analizan los principales, soldaduras de unión en la sección y rigidizadores.

Con base en el procedimiento de diseño utilizado como ejemplo, se pudo determinar que la fatiga suele ser un factor importante en el diseño, conforme aumentan los ciclos de carga en la vida útil del elemento. Con recordar el concepto de fatiga, como esfuerzo acumulado en la estructura, se entiende el porqué de esa relación. Para el caso en ejemplo, al ser una grúa de clasificación Clase A (uso poco frecuente, según CMAA), la cantidad de ciclos durante su vida útil le resta importancia a la fatiga como parámetro de diseño. Sin embargo para casos de mayor utilización, una grúa en una industria por ejemplo, considerar la fatiga es fundamental para un diseño funcional.

La forma que utiliza la herramienta para la escogencia de las secciones adecuadas a utilizar en cada elemento resulta sencilla, y permite de manera instantánea al usuario considerar varias posibilidades. El procedimiento es básicamente iterativo y tiene la posibilidad de escoger la sección que cumpla de la manera más eficiente con los requisitos.

El diseño de la unión ménsula-columna presenta dos opciones: con pernos o soldadura.

En este caso la herramienta permite en la misma interfaz utilizar cualquiera de los dos. La investigación realizada no tiene entre sus resultados algún criterio para definir cuál de los dos mecanismos de unión es mejor utilizar.

Para iniciar con el análisis de los resultados del ejemplo numérico mostrado en el capítulo de Resultados, se analizan los mostrados en los cuadros 3 y 6. Se puede observar que las combinaciones de carga más críticas incluyen entre sus argumentos la carga muerta, carga viva y el efecto de impacto. Adicional a eso las combinaciones de carga que consideran el efecto del sismo no son críticas para el diseño. Esto debido a que el sismo no incluye la carga nominal que levanta la grúa para su cálculo, y esta es uno de los valores más altos de carga.

En el cuadro 10, del capítulo de Resultados se puede observar la confirmación de lo discutido anteriormente, en cuanto a la diferencia de enfoques que tienen ambos códigos de análisis de las cargas laterales. Se puede observar que la diferencia entre el momento alrededor del eje X (causado por cargas máximas de ruedas, incluyendo en impacto) es de apenas un 13%. Mientras que el momento alrededor del eje Y (causado por cargas laterales) es de un 69%. Es decir, las cargas laterales que considera el código CMAA, son bastante menores que las consideradas por AISE o ASCE. En el cuadro 11 se puede observar que, como es lógico esperar, esa diferencia entre los códigos se transmite al resultado final, la viga carrilera escogida. La viga que satisface los requisitos de AISE cuenta con un área transversal un 35% mayor que la que satisface a CMAA. Esta debe tomarse en cuenta y analizarse desde varias perspectivas. Diseñar con CMAA puede resultar más barato que diseñar con AISE, sin embargo se deben considerar las implicaciones del caso. Lo que se puede concluir es que CMAA considera que los efectos de las cargas laterales son disminuidos adecuadamente por los frenos del carretillo de carga, así como por los "bumper" en los extremos de la viga carrilera. Esto se puede observar en el la sección 70.1 de la "CMAA Specification N°70" (Crane Manufacturers Association of America, 2000).

El resto de elementos de la nave industrial, en el diseño ejemplo, deben considerar si la grúa les provoca algún efecto. Es definitivo que las columnas son las más afectadas por el

comportamiento de la grúa. Pero vigas de amarre y largueros también tienen algún efecto. Se considera que la mejor manera de medir esos efectos es hacer el análisis global de la estructura con algún software especializado, que pueda mostrar el comportamiento estimado de la misma.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- La herramienta de diseño de una estructura de soporte para una grúa viajera permite la escogencia de las secciones adecuadas para utilizar en la viga carrilera, la forma y tamaño de las ménsulas, y la forma de unir ménsula- columnas.
- La aplicación de una herramienta de diseño para una estructura de soporte de grúa viajera, disminuye el tiempo que se debe dedicar al diseño, pues incorpora los conceptos que deben considerarse y los aplica de manera automatizada.
- Los códigos de diseño consultados tienen diferentes enfoques, y se puede concluir que el diseño por medio de AISE resulta ser más conservador que el realizado por medio de CMAA.
- El código de diseño de CMAA, involucra valores de menor magnitud para las cargas laterales en comparación a AISE o ASCE, esto debido a que dentro de sus consideraciones tiene que las cargas son mejor absorbidas por el bumper y los frenos del carrito de carga.
- Con base en las especificaciones constructivas y de diseño recopiladas de los códigos consultados, se puede concluir que el tema de las uniones entre elementos es crucial para un adecuado comportamiento de la estructura.
- Las consideraciones de fatiga suelen ser importantes conforme mayor sea la cantidad de ciclos de carga que la grúa soporte durante su vida útil. Además, mientras más pequeña sea la sección transversal, mayor es el esfuerzo al que se ve sometida.

Recomendaciones

- Se debe ampliar el tema de las conexiones entre elementos, pues en el proyecto se tratan las uniones entre las ménsulas y las columnas, sin embargo hay mas tipos de conexiones en la estructura, con comportamientos diferentes al de una conexión con cortante excéntrico.
- A la hora de realizar el prediseño del proyecto, lo ideal es contar con algún estudio que respalde adecuadamente los ciclos de carga que se utilizarán en los cálculos de fatiga.
- Es necesario realizar el análisis de desplazamientos laterales para la estructura, para comprobar que eventualmente la grúa funcione de manera correcta.
- A pesar de que en la sección de Especificaciones de diseño y constructivas se indica que las vigas carrileras se deben diseñar simplemente apoyadas, se recomienda para casos donde la carga nominal a soportar por la grúa tenga valores excesivos (por arriba de las 50 Ton), utilizar vigas continuas, para disminuir la magnitud de los momentos a soportar.

Apéndices

Se presentan los apéndices del proyecto, que en su mayoría están compuestos por tablas e imágenes para ser consultadas necesitan ser ampliadas.

En total son 3 apéndices y se presentan a continuación.

Apéndice 1. Gráfico de coeficiente S_{sk}

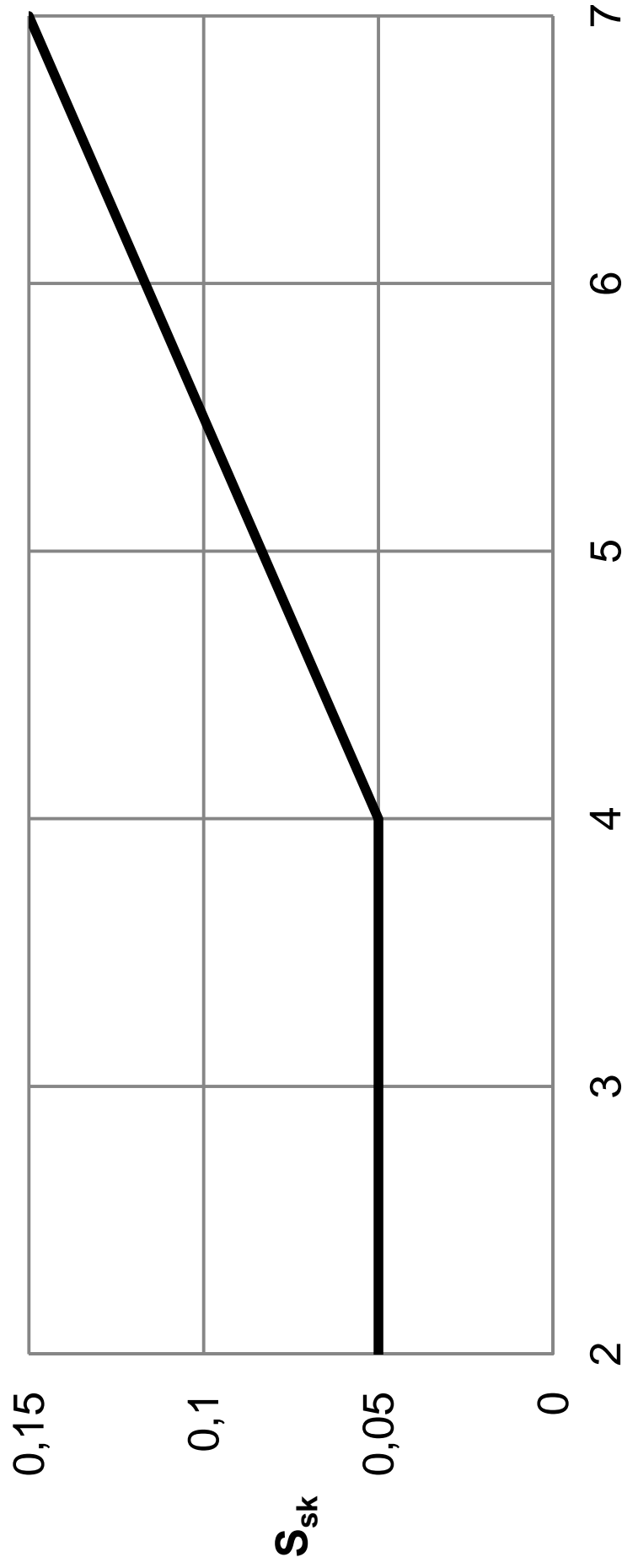
Apéndice 2. Ubicación de cargas según CMAA

Apéndice 3. Ubicación de cargas según AISC

Apéndice 4. Procedimiento de diseño de una estructura de soporte

Apéndice 1

Coeficiente S_{sk}



Relación = Claro puente/ Distancia entre ejes ruedas

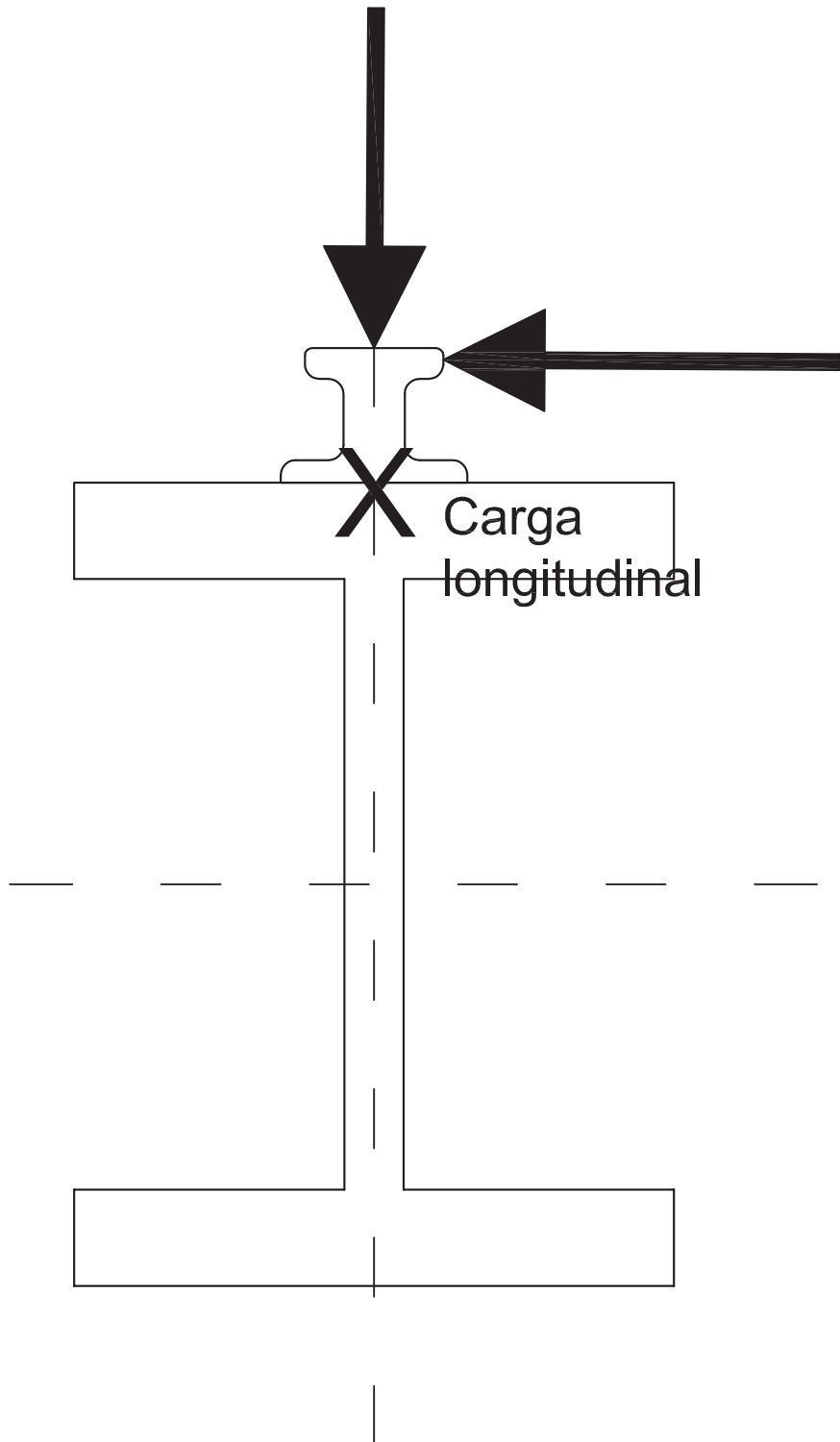
Apéndice 2

Carga impacto/Carga
máx de ruedas

Carga
empuje
lateral

Carga
longitudinal

Cargas AISC



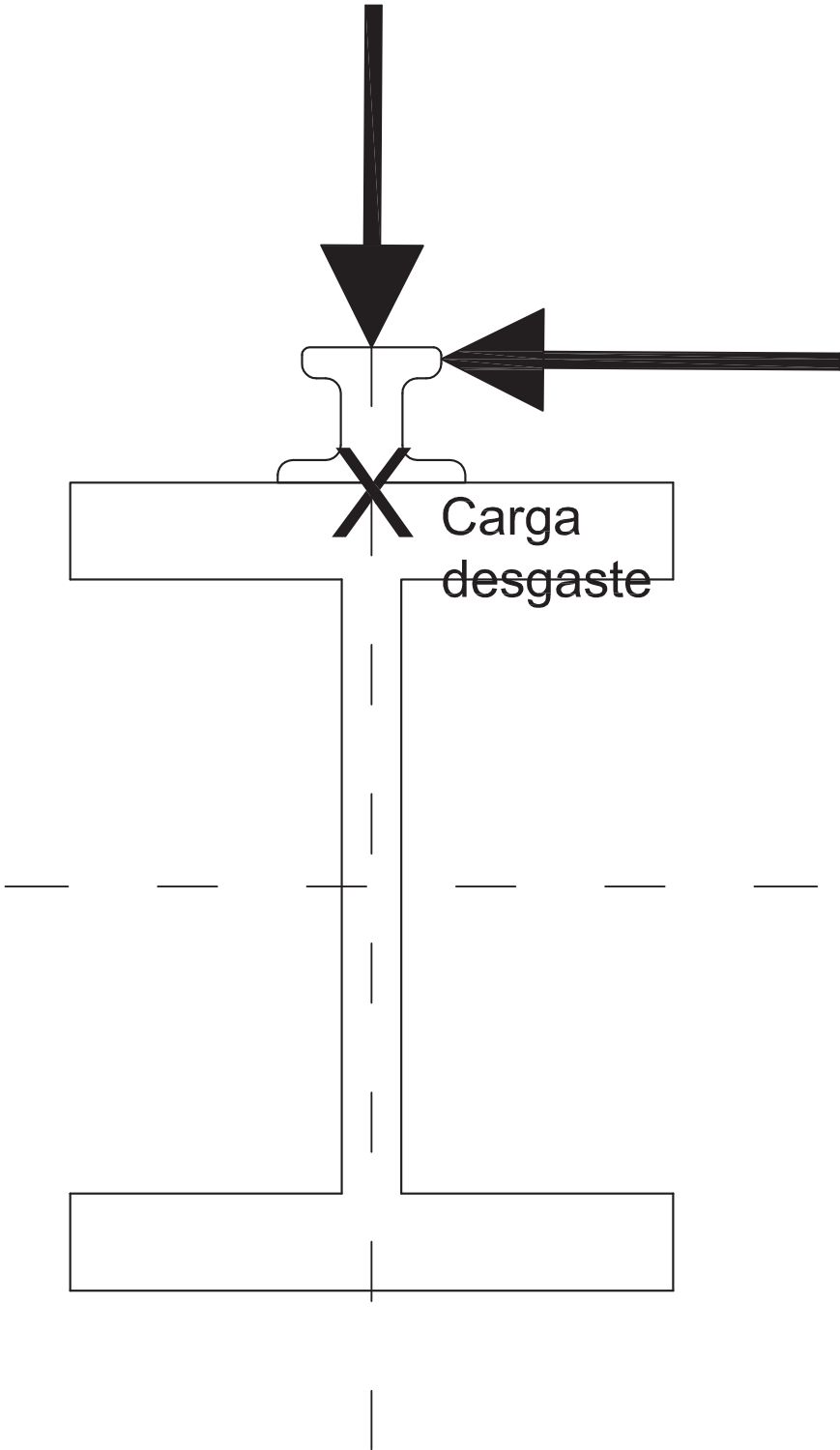
Apéndice 3

Carga máx de ruedas

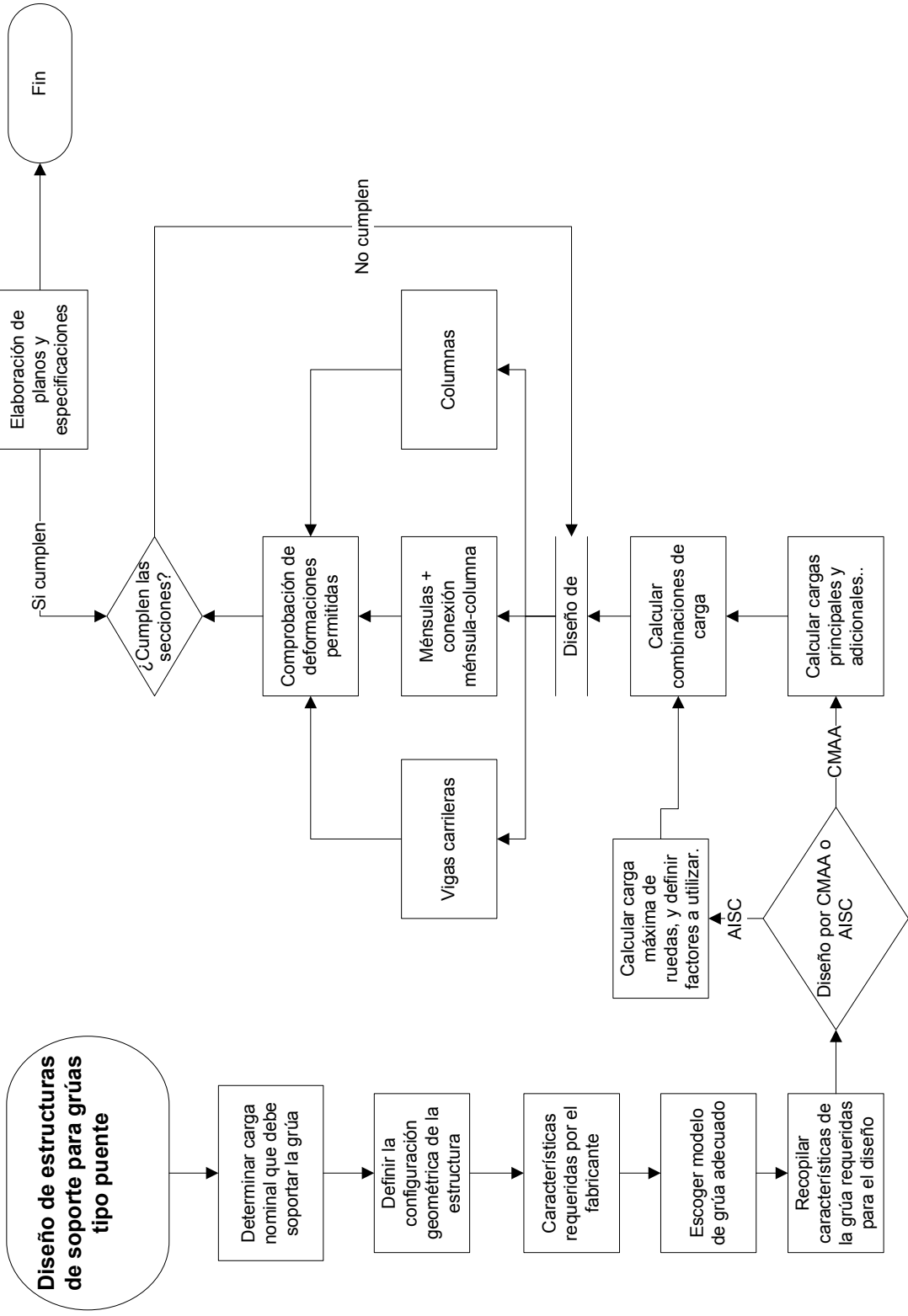
Carga de inercia

Carga desgaste

Cargas CMAA



Apéndice 4



Anexos

Se muestran los anexos utilizados en el proyecto.
Se enumeran en la siguiente lista.

Anexo 1: Tabla A-K3.1 LRFD, AISC

Anexo 2: Valores de K para longitud efectiva, columnas. LRFD, AISC

Anexo 3: Nomogramas para determinación de factor K. LRFD, AISC

Anexo 4: Crane Runway Loadings for Industrial Facilities- Vertical, Lateral and Longitudinal, A review of International Codes and Standards. AISC

Anexo 5. Figura 24 del CISC, tolerancias en deformaciones.

Anexo 1

Anexo 2

TABLE C-C2.1
K Values for Columns

Buckled shape of column is shown by dashed line.	(a) 	(b) 	(c) 	(d) 	(e) 	(f)
Theoretical K value	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Recommended design value when ideal conditions are approximated	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
End condition code	 <i>Rotation fixed and translation fixed</i> <i>Rotation free and translation fixed</i> <i>Rotation fixed and translation free</i> <i>Rotation free and translation free</i>					

K factors to equate the strength of a framed compression element of length L to an equivalent pin-ended member of length KL subject to axial load only. Other rational methods are available for evaluating the stability of frames subject to gravity and side loading and individual compression members subject to axial load and moments. However, the effective-length concept is the only tool currently available for handling several cases which occur in practically all structures, and it is an essential part of many analysis procedures. Although the concept is completely valid for ideal structures, its practical implementation involves several assumptions of idealized conditions which will be mentioned later.

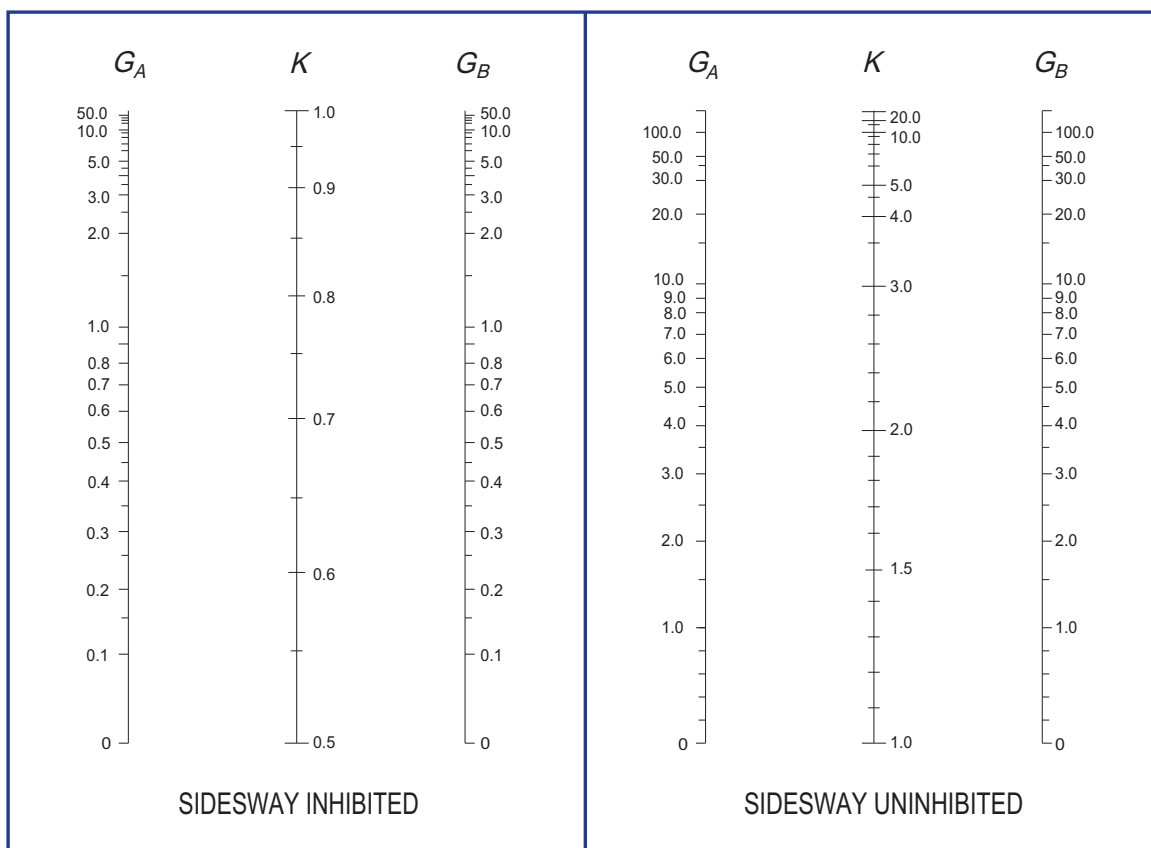
Two conditions, opposite in their effect upon column strength under axial loading, must be considered. If enough axial load is applied to the columns in an unbraced frame dependent entirely on its own bending stiffness for resistance to lateral deflection of the tops of the columns with respect to their bases (see [Figure C-C2.1](#)), the effective length of these columns will exceed the actual length. On the other hand, if the same frame were braced to resist such lateral movement, the effective length would be less than the actual length, due to the restraint (resistance to joint translation) provided by the bracing or other lateral support. The ratio K , effective column length to actual unbraced length, may be greater or less than 1.0.

The theoretical K values for six idealized conditions in which joint rotation and translation are either fully realized or nonexistent are tabulated in [Table C-C2.1](#).

Anexo 3

method for determining adequate K values. However, it should be noted that this alignment chart is based upon assumptions of idealized conditions which seldom exist in real structures (Galambos, 1988). These assumptions are as follows:

- (1) Behavior is purely elastic.
- (2) All members have constant cross section.
- (3) All joints are rigid.
- (4) For braced frames, rotations at opposite ends of beams are equal in magnitude, producing single-curvature bending.



The subscripts A and B refer to the joints at the two ends of the column section being considered. G is defined as

$$G = \frac{\Sigma(I_c / L_c)}{\Sigma(I_g / L_g)}$$

in which Σ indicates a summation of all members rigidly connected to that joint and lying on the plane in which buckling of the column is being considered. I_c is the moment of inertia and L_c the unsupported length of a column section, and I_g is the moment of inertia and L_g the unsupported length of a girder or other restraining member. I_c and I_g are taken about axes perpendicular to the plane of buckling being considered.

For column ends supported by but not rigidly connected to a footing or foundation, G is theoretically infinity, but, unless actually designed as a true friction-free pin, may be taken as "10" for practical designs. If the column end is rigidly attached to a properly designed footing, G may be taken as 1.0. Smaller values may be used if justified by analysis.

Fig. C-C2.2. Alignment chart for effective length of columns in continuous frames.

Anexo 4

Crane Runway Loadings for Industrial Facilities – Vertical, Lateral and Longitudinal A Review of International Codes and Standards

Steve Bohm
Assistant Division Manger
JNE Consulting Ltd
Hamilton, Ontario, Canada

Bill Hodgins
Manager – Civil EMT
Dofasco Inc.
Hamilton, Ontario, Canada

Abstract

Design criteria for crane runway systems vary widely between the numerous codes and standards that are currently in use. There are significant differences in magnitudes of loads, calculation methods and general design philosophy. The complexity of calculation methods varies greatly between different standards with some using simple factors, and other using more complex rational formulae to account for variations in operating speeds and conditions.

In this paper, vertical, lateral and longitudinal impact factors are compared for various North American, European and Asian standards. Vertical impact factors are applied to wheel loads and/or the lifted load to account for an increased vertical load due to crane travel and hoisting respectively. Lateral load factors are applied to the lifted load and/or trolley load to account for trolley travel and skewing of the crane. Longitudinal load factors are applied to wheel loads to account for acceleration and braking of the crane.

The aggregate effects of these load factors are also compared for two typical cranes; a 50 ton coil handling crane and a 25 ton rigid mast stacker crane. Longitudinal loads for all codes are fairly similar, but the vertical and lateral loads vary significantly between different standards. These differences arise from both the recommendations for the load factors and the suggested methods for calculating the total loadings.

INTRODUCTION

The purpose of this paper is to compare the loading requirements provided in AIST TR13 “Guide for the Design and Construction of Mill Buildings” (AIST TR13) with those of several North American and international standards. Vertical, lateral and longitudinal loadings are studied. The loadings from each standard are used to confirm the associated design requirements for 2 typical cranes. These results are compared and a rationale is developed to explain the loadings presented in AIST TR13.

The AIST Mill Buildings Operating Committee is a technical committee within the Association of Iron and Steel Technology (AIST). The committee includes representatives from the steel industry, as well as the design community. The mandate of the committee is to advance the design, application, and maintenance of Mill Buildings in the Iron and Steel Industry. The committee is also responsible for updating and revising AIST Technical Report 13 – Guide for the Design and Construction of Mill Buildings (AIST TR13).

Basic Mill Building Components:

As indicated in Figures 1 and 2, the major components that must be considered in the evaluation of a typical crane runway mill building consists of the following:

- crane/building column
- building column upper shaft
- crane runway girder
- crane bridge girder
- crane trolley
- lifted load

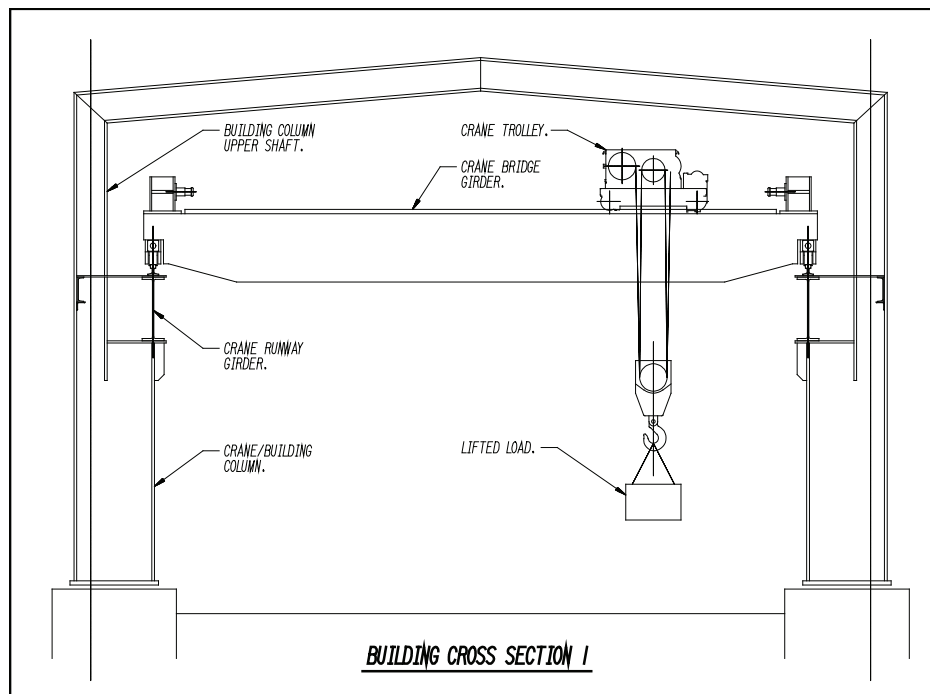


Figure 1

Fig. 1 depicts a mill building with a stepped column assembly, while Fig. 2 shows a laced column assembly. The heavier, lower portion of each column assembly is designed to resist the vertical crane loadings. The purpose of the building and crane runway system is to facilitate the crane support for the facility’s operations, as well as to act as an umbrella to protect the equipment from the exterior elements. These two functions are integrated as various components of the building structure support each function. The mill building is not a structure for its own sake, rather a structure to keep the line operating. This is supported by (photo #1) which depicts a typical laced column

crane runway system. The crane runway girders are simply supported and span between crane columns. The crane columns provide direct vertical support for the crane loads, but an elaborate roof bracing system is required to distribute lateral loads to adjacent building frames.

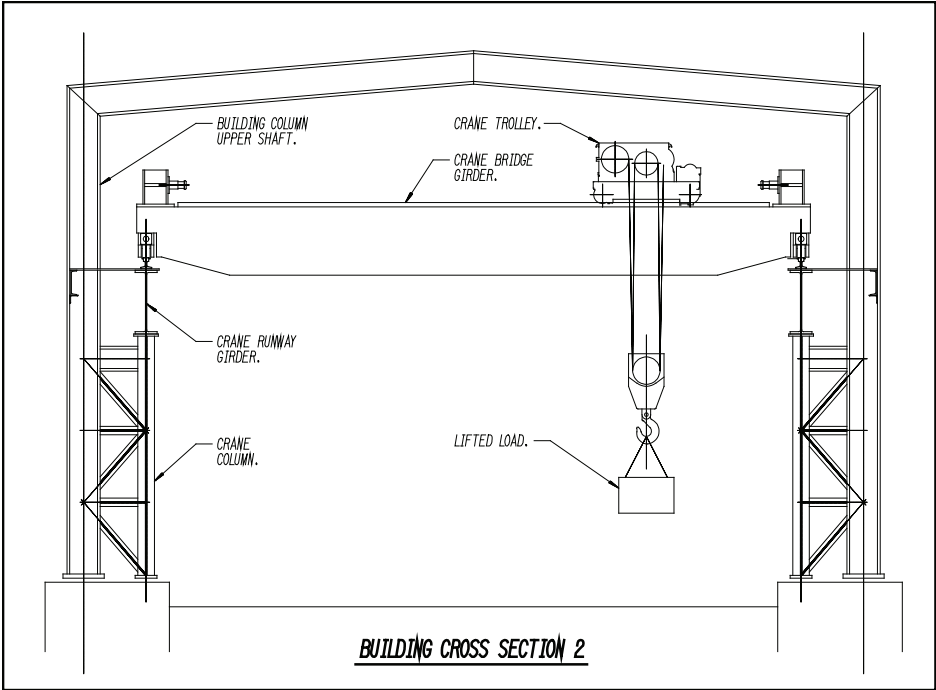


Figure 2



Photo 1 – Typical Laced Column Runway System

Fig. 3 indicates the bumper stop components. The crane buffer is mounted on the crane bumper (or in some instances mounted directly onto the crane). Longitudinal loads are transferred through the end truck into the crane buffer. The buffer is designed to limit the crane deceleration for safety and operator comfort and to absorb the impact energy caused by the rapid deceleration of the crane. The crane bumper is designed to resist the buffer forces and transfer those forces into the building structure. (Photo #2) shows a typical crane bumper arrangement.

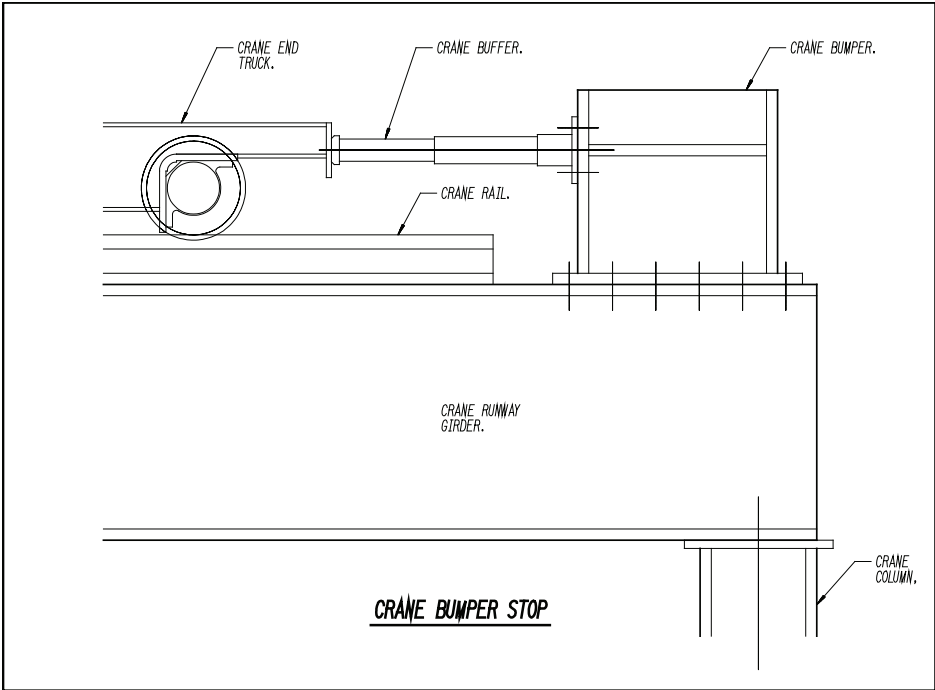


Figure 3



Photo 2 – Crane Runway Bumper Stop with Hydraulic Bumper

CURRENT CODES AND STANDARDS

Internationally crane design loads vary widely with respect to the following:

- magnitude of loads
- complexity of calculations
- load combinations
- fatigue and strength considerations
- methods of analysis

North American codes and standards are reasonably consistent with respect to design loads. Basic loads are prescribed but there is minimal guidance for load combinations. There is no differentiation between loadings used for fatigue and strength calculations. There is no guidance for multiple cranes and/or multiple aisles. American and Canadian codes typically rely on references to AIST TR13 or MBMA for these items. Both AIST TR13 and MBMA provide specific requirements for multiple cranes and aisles, and AIST TR13 gives details for fatigue and strength analysis. In the US the International Building Code (IBC) references ASCE7, and the commentary of ASCE 7 references AIST TR13 and MBMA. In Canada the provincial building codes reference CSA Standard S16.1 "Limit States Design of Steel Structures" (CSA S16.1). The commentary of CSA S16.1 references the CISC "Crane Supporting Steel Structures: Design Guide" (CISC) which in turn references AIST TR13.

This paper compares design criteria from the following crane standards, building codes, design standards and design guides:

- | | |
|---------------------|----------------------|
| - ASCE 7 | - Russia (SNIIP) |
| - AIST TR13 | - Germany (DIN15018) |
| - MBMA | - Japan |
| - CISC Design Guide | - UK |
| - CMAA 70 | - Sweden |
| - AIST 6 | - Australia (AS1418) |
| | - Poland |

The loadings considered are limited to vertical impact factors, lateral loads (or sidethrust) and longitudinal forces. Vertical impacts result from crane bridge movement and hoisting operations. Lateral loads result from trolley motion or skew, and longitudinal forces can result from acceleration or deceleration during bridging (which is the longitudinal movement of the crane bridge along the runway), or bumper impact.

Vertical Impact Factors

Vertical impact can result from a variety of sources (Fig. 4). Uneven rail splices or rail corrugation can create vertical impact as the crane moves along the crane runway. Similarly out-of-round wheels can result in impact forces as the wheel impacts the rail. Acceleration and deceleration of the lifted load during the hoisting operation can also create significant impact as well.

The comparison of vertical impact factors is shown in Fig. 5. The results for North American codes are reasonably consistent and are similar to the international average. It is important to note that many codes have specific requirements for application of the vertical impact factors. Most codes limit the application of the vertical impact factor to the design of the crane runway girder and its connections.

AIST TR6, as well as some European codes, specify a separate hoisting factor to be considered in addition to the previous vertical impact factor (Fig. 6). These factors vary significantly but are most significant in the design of the crane itself.

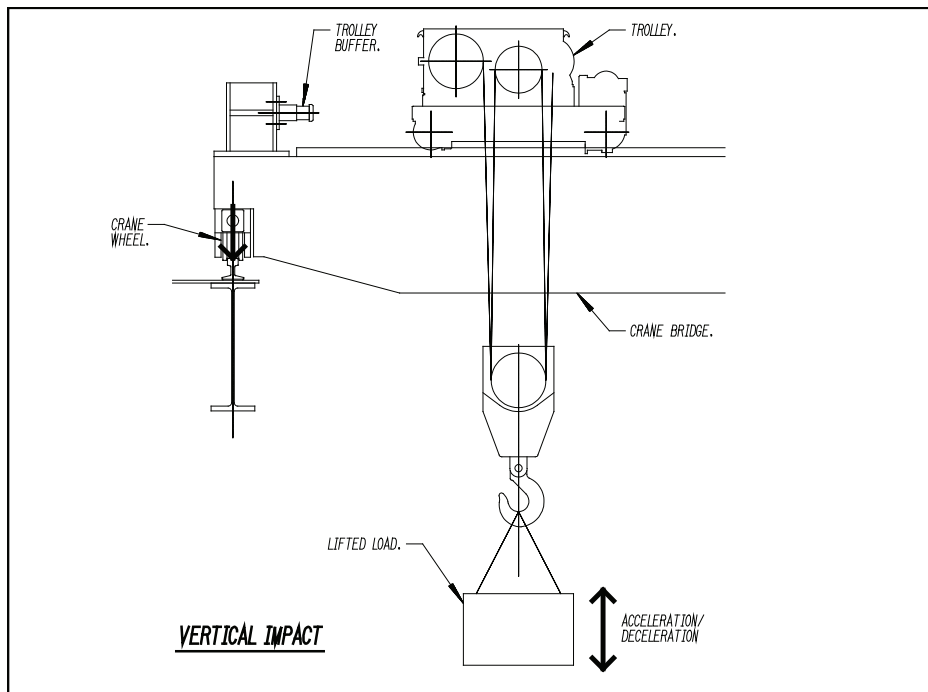


Figure 4

Document	Loading	Comments
AIST 13	25% (20% for maint.)	Girder and connections
CISC	25% (20% for maint.)	Girder and connections
ASCE 7	25%	Girder and connections
CMAA	10-20%	Based on bridge speed
AIST 6	25%	For wheel design
DIN	20% runway, 10% building	
SnIP	10%	Girder only – Not for fatigue
MBMA	25%	Girders, connections and supporting brackets
Japan	10-30%	Many variables – No guidance girder vs columns – Not fatigue
UK	25%	No guidance girder vs columns
Sweden	10-20%	Varies with speed and splice type
Australia	0-20%	Based on crane class
Poland	40% max.	

Figure 5 – Vertical Impact Factors

Document	Loading	Comments
AIST 13		
CISC guidelines		
ASCE 7		
AIST 6	25%	Not added to vertical impact factor
CMAA	15-50%	Added to vertical impact factor
DIN	30%	Added to vertical impact factor
SnIP		
MBMA		
Japan		
UK		
Sweden	30-120%	Varies, added to vertical impact factor
Australia	16-37%	Added to vertical impact factor
Poland		

Figure 6 – Hoisting Factors

Lateral loads

Lateral loads also result from a variety of motions. Trolley acceleration and deceleration, as well as trolley bumper impact, both result in a lateral load on the crane runway system (Fig.7). Runway misalignment or crane bridge skewing can also create lateral loads during crane bridging operations. Inconsistencies in crane bridge drive speeds and bridge acceleration with load off-centre are less common design criteria but can also contribute to lateral loads. In extreme cases off-vertical lifts (or side pulls) can contribute to lateral loads.

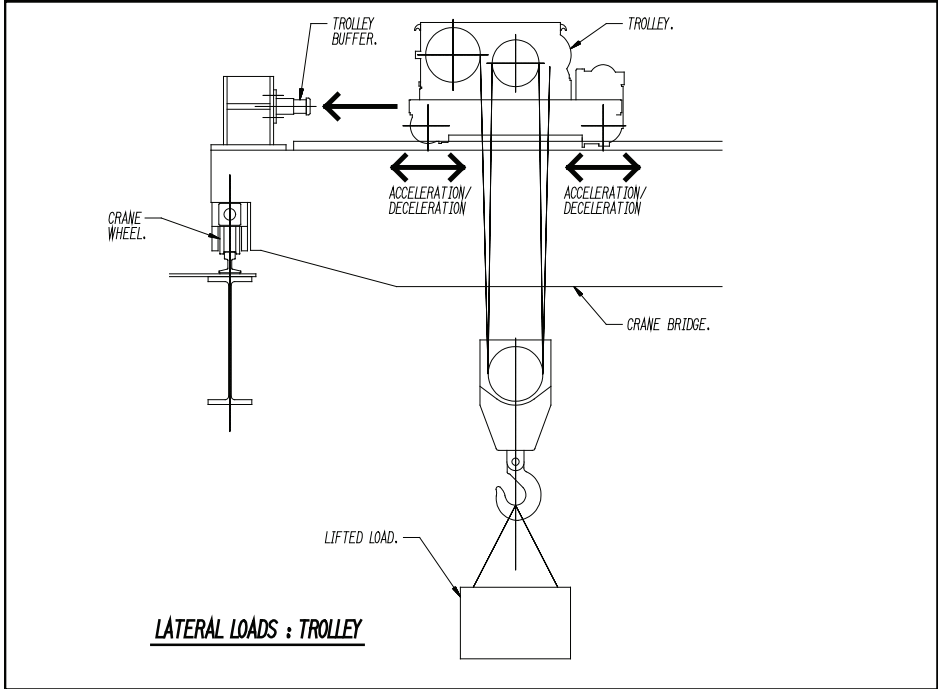


Figure 7

Document	Loading	Comments
AIST 13	30-200 of Load	Min. 20% of load, hoist, trolley
CISC guidelines	30-200 of Load	Min. 20% of load, hoist, trolley
ASCE 7	20% load, hoist, trolley	
AIST 6		
CMAA		
DIN	30% trolley weight	
SnIP	10%	
MBMA	20% load, hoist, trolley	
Japan	10% max wheel loads	15% for stiff mast
UK	5-20% of wheel loads	
Sweden	20% trolley weight	
Australia	15% load, hoist, trolley	
Poland		

Figure 8 – Lateral Loads (Total)

Fig. 8 indicates that the maximum lateral loads specified in AIST TR13 and CISC are consistently higher than the loads specified in the other codes that were studied. AIST TR13 and CISC lateral loads are based on the lifted load, whereas the other North American standards are based on the combined weight of the load, hoisting system and trolley. International codes vary as to whether the lateral load is based on lifted load or trolley/hoist loads. Only AIST TR13 and the Japanese code differentiate between different types of cranes. Both of these codes acknowledge the unique lateral load considerations for rigid mast cranes.

Some codes include a separate allowance for crane bridge skewing or runway misalignment as depicted in Figures 9 and 10. These skewing forces are generally applied with equal and opposite forces on all wheels and can be caused by oblique travel or runway misalignment. Skewing and alignment design criteria in the codes provides a maximum lateral load on one wheel (Fig. 11). The loads vary widely between codes. Some lateral loads are based on a percentage of the lifted load, while some are based on the unfactored wheel load and most vary with wheel base to span ratio.

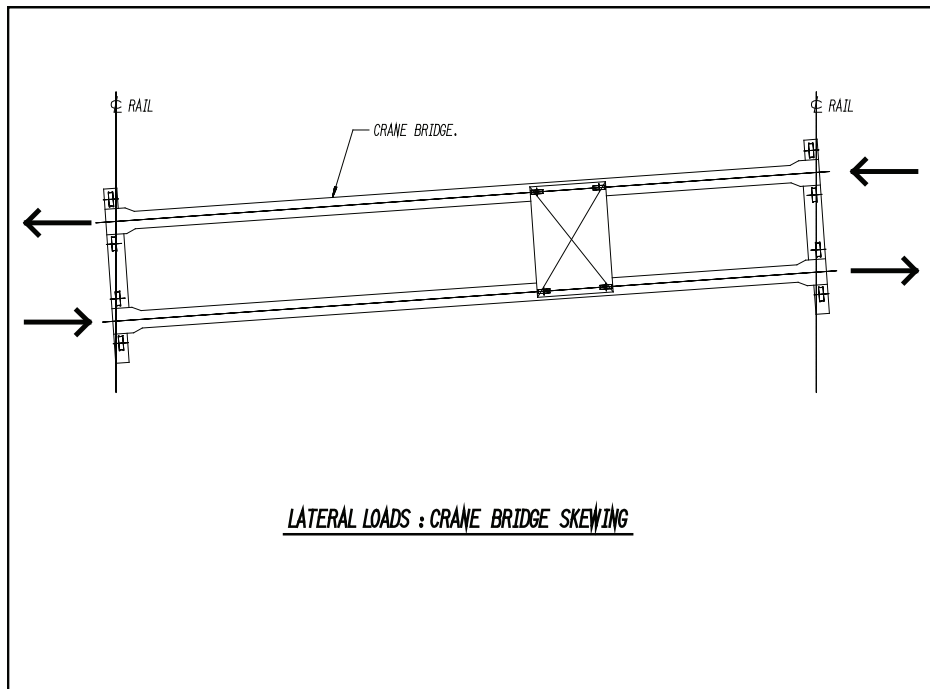


Figure 9

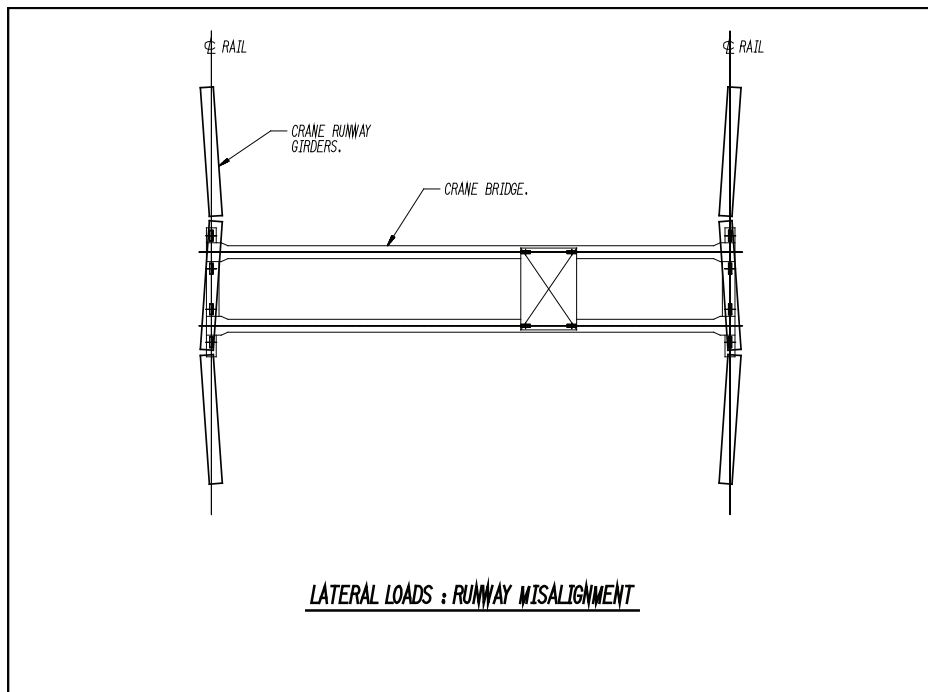


Figure 10

Document	Loading	Comments
AIST 13		
CISC guidelines		
ASCE 7		
AIST 6	Approx. 10% Load, hoist, trolley	Varies with wheel base to span ratio
CMAA	5-15% Wheel Load	Varies with wheel base to span ratio
DIN		
SnIP	10% Wheel Load	
MBMA		
Japan		
UK	Approx. 10% Factored Wheel Load	Varies with wheel base to span ratio
Sweden	10 to 20% Factored WL	
Australia	10% Load, Hoist, Trolley	
Poland	Up to 30% Wheel load	Varies with wheel base to span ratio

Figure 11 – Lateral Loads (One Wheel)

Longitudinal Forces

There are essentially two sources of longitudinal forces. As the crane bridge accelerates and decelerates along the crane runway longitudinal forces are generated (Fig. 12). Similarly when the crane bridge impacts the bumper additional longitudinal forces (and a moment) are generated on the girder (Fig. 13). Most international codes have reasonably consistent requirements for longitudinal traction forces (Fig. 14) and stipulate 20% of the drive wheel loads. Some codes stipulate 10% of all wheels which generally equates to 20% of the drive wheels.

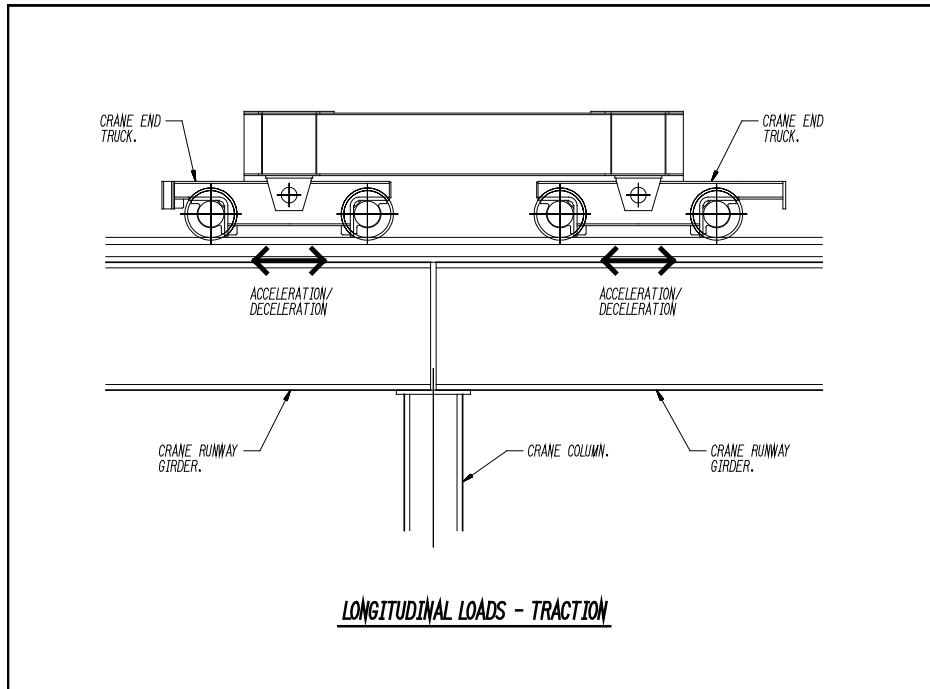


Figure 12

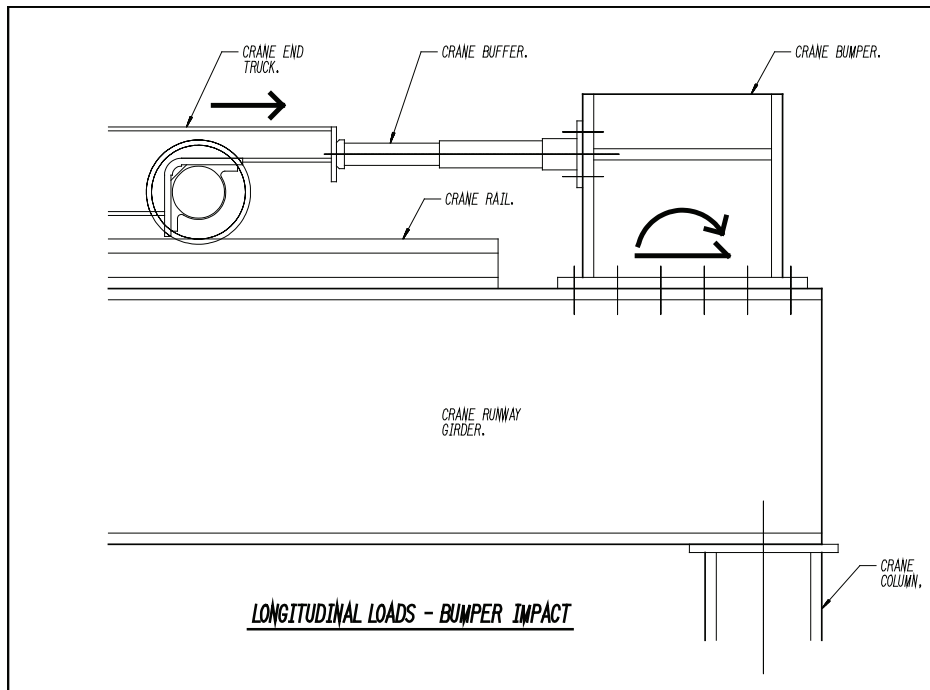


Figure 13

Document	Loading	Comments
AIST 13	20% drive wheels	
CISC guidelines	20% drive wheels	
ASCE 7	20% drive wheels	
AIST 6	20% drive wheels	
CMAA	2.5-18.7%	7.8 times acceleration
DIN		
SnIP		
MBMA	10% WL	All wheels
Japan	15% drive wheels	
UK	5% WL	All wheels
Sweden		
Australia		
Poland		

Figure 14 – Longitudinal Loads

Crane bumper are designed to stop the crane and absorb the impact energy. The stroke of the bumper is designed to limit the deceleration to 16 ft/sec². The magnitude of the forces is determined by basic physics. AIST TR13 recommends using the full bridge speed to design the entire bumper system.

Load Combinations

Building Codes and standards generally do not include cranes in their prescribed combinations, however, specific crane runway design codes are fairly consistent in prescribing load combinations. Combinations generally allow for multiple cranes, strength and serviceability, as well as limit states and fatigue considerations.

AIST TR13 provides extensive guidance on multiple cranes and multiple crane aisles. In addition TR13 stipulates the specific requirements for fatigue and strength combinations. No other North American codes provide that information. CMAA provides information on multiple cranes and aisles, as do many of the international codes.

PRACTICAL EXAMPLES

To demonstrate the similarities and differences in magnitudes of loading between international codes and standard, we have calculated the vertical impact factors, hoisting factors, total lateral loads and skewing loads (lateral load for 1 wheel) for 2 specific cranes.

The first crane considered was a 50 ton coil handling crane (Photo 3). This crane is typical of heavy service cranes in a mill environment.



Photo 3 – 50 Ton Coil Handling Crane

Example #1 50 ton capacity Coil Handling Crane

- load suspended from cables
- 96 foot bridge span
- CMAA Class D – “Heavy Service”
- 300 fpm bridge speed
- 180 fpm trolley speed
- remote operated
- 8 wheels total – double flanged

Results

The Vertical Impact results are shown in Fig. 15. The North American values are based on the wheel load alone. Some European codes use more complex calculations incorporating hoisting factors, rail splice type, crane speed and other information. For this example the AIST TR13 vertical impact factors are equal to those in the other North American codes and are consistent with the average across all codes and standards.

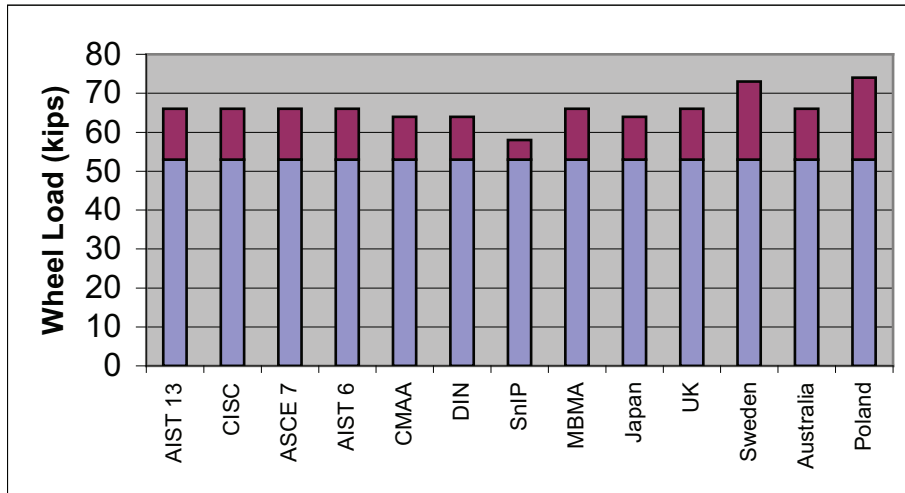


Figure 15 – Coil Handling Crane - Vertical Wheel Loads

The lateral load results are shown in Fig. 16. In contrast to the vertical impact factors, there is very little consistency. AIST TR13 and CISC recommend significantly higher lateral loads than the other codes and standards and are based on a percentage of the lifted load. Other North American codes and standards are next highest and are based on a percentage of the total load, hoist and trolley weight. European standards are more complex but typically produce lateral loads significantly less than the North American values.

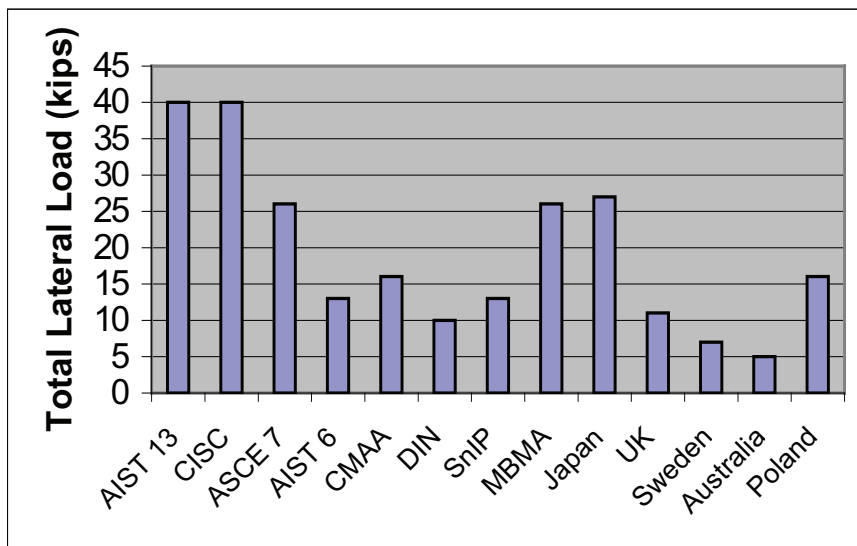


Figure 16 – Coil Handling Crane -Total Lateral Loads

The second crane considered was a 25 ton stacker crane (Photo 3). This type of crane causes significantly higher lateral stresses on the crane runway system due to its rigid mast.



Photo 4 – 25 ton Stacker Crane

Example #2 25 ton Stacker Crane

- load supported from rigid mast and fork(s)
- 90 foot bridge span
- CMAA E – “Severe Service”
- 360 fpm bridge speed
- 180 fpm trolley speed
- cab operated
- 8 wheels total – double flanged

Results

The AIST TR13 requirements for rigid mast cranes result in significantly higher lateral loads for this example. These lateral loads are shown in Figure 17. Most codes do not recommend any loading changes when dealing with rigid mast cranes. The Japan code, which is the only other code which has a specific allowance for rigid mast cranes, has a 50% increase in lateral load over that for a standard mill crane. The AIST increase for a rigid mast crane is 500% and is based on experience with crane runway performance for these types of cranes. Runways with rigid mast cranes have historically shown more deterioration and damage, especially at girder ends and girder seats.

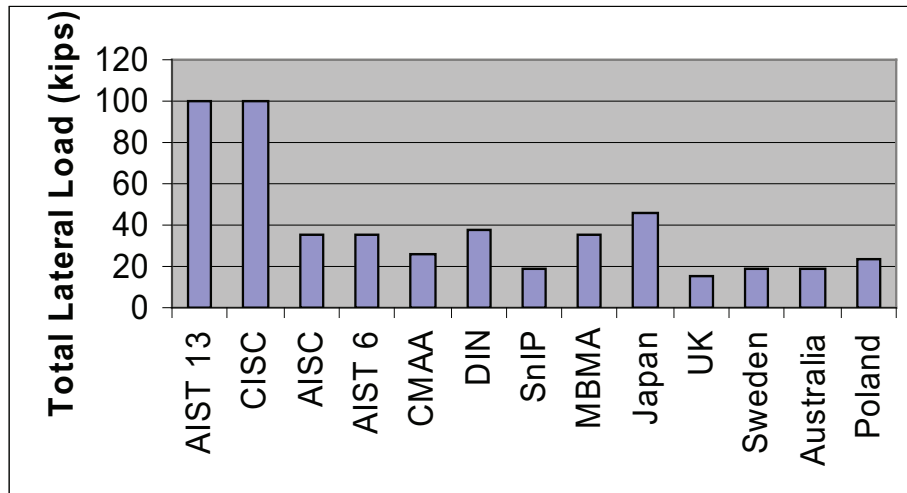


Figure 17 – Stacker Crane - Lateral Loads

DISCUSSION OF RESULTS

The review of international codes and standards has identified some significant differences. Longitudinal forces are essentially identical between all codes and standards. While the approach for vertical impact is different for some codes, the resulting design loads are reasonably consistent. The requirements for load combinations, where provided, are reasonably consistent as well. The lateral loads however were highly variable. There were numerous approaches that varied with crane type, size and speed. AIST TR13 consistently stipulated the largest lateral load requirement.

It important to note that in all cases there are other factors that must be considered for these loads to be valid. Proper structural detailing is critical to limit the actual loads. Deflection must be controlled and good dimensional tolerances maintained. Runway alignment must be maintained not only during initial erection but over the life of the crane runway. Crane rail and crane bumper maintenance must be performed. General crane maintenance, both mechanical and electrical, is also a critical factor in validation of the design loads.

AIST TR13 Design Criteria

The AIST TR13 design criteria is reasonably consistent with International codes for vertical and longitudinal loads. It is clearly conservative for lateral loads. However based on the criticality of the crane runway in its role to facilitate crane coverage and support to operations, in most cases this is appropriate for new mill building designs. The various sources of lateral loads, as well as the complex nature of the transfer of lateral loads, is cause for concern when some of the relatively minimal design loads from other international codes are considered. The AIST TR13 approach ensures the maximum serviceability and safety in an industry where life extension and frequent operational upgrades are the norm. For analysis of existing structures the application of AIST TR13 design criteria may prove to be cost prohibitive and as such AIST TR13 encourages the application of sound engineering judgment.

SUMMARY

There is a wealth of international information on crane runway loadings. For typical cranes most design loads are reasonably consistent. Lateral loadings are not only the most complex, but also the most variable. AIST TR13 is conservative, but provides a comprehensive design approach for new crane runway systems.

Anexo 5

Referencias

AISC. (1994). *Manual of Steel Construction : Load & Resistance Factor Design*. United States of America: American Institute of Steel Construction.

American Institute of Steel Construction . (1999). *Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago: American Institute of Steel Construction.

American Society of Civil Engineers. (2006). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Virginia: American Society of Civil Engineers.

Arguedas Álvarez, M. (13 de Abril de 2011). Solicitud de grúa tipo puente. (A. Porras Jiménez, Entrevistador)

Association of Iron and Steel Engineers. (2003). *Guide for the design and Construction of Mill Buildings*. Pennsylvania: Association of Iron and Steel Engineers.

Bohm, S., & Hodgins, B. (2007). Crane runway loadings for industrial facilities. A review of International Codes and Standards. *Engineering Journal* .

Comisión del Código Sísmico de Costa Rica. (2002). *Código Sísmico de Costa Rica*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Crane Manufacturers Association of America. (2000). *Specifications for top running bridge and gantry type multiple girder electric overhead traveling cranes*. Carolina del Norte : CMAA.

Ellifritt, D., & Lue, D.-M. (1998). *Design of Crane Runway with Channel Cap*. Milwaukee: Engineering Journal AISC.

Fisher, J. M., & Van de Pas, J. P. (2002). *New Fatigue Provisions for the Design of Crane Runway Girders*. Milwaukee: Engineering Journal AISC.

Fisher, J. (2004). *Steel Guide N°7: Industrial Buildings, Roof to Anchor Rods*. Milwaukee: American Institute of Steel Construction.

Hibbeler, R. (1997). *Análisis Estructural*. Distrito Federal: Prentice Hall.

McCrimmon, R. (2009). *Guide for the Design of Crane Supporting Steel Structures*. Ontario: Canadian Institute of Steel Construction.

Merritt, F. (1972). *Structural Steel Designers Handbook*. New York: McGraw Hill.

Rojas, G. (2009). *Notas de clase, Curso Estructuras de Acero*. Cartago: Escuela de Ingeniería de Construcción.

Whiting Corporation. (1967). *Crane Handbook*. Illinois: Whiting Corporation.