



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MECÁNICA**

**DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA EL DISEÑO DE**  
**VIGAS CARRILERAS PARA PUENTES GRÚA SEGÚN LA**  
**ESPECIFICACIÓN CMAA**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar por el grado académico de:

**INGENIERA MECÁNICA**

**AUTOR:**

**CAROLINA ESTEFANÍA LOGROÑO ROMERO**

Riobamba-Ecuador

2024



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MECÁNICA**

**DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA EL DISEÑO DE**  
**VIGAS CARRILERAS PARA PUENTES GRÚA SEGÚN LA**  
**ESPECIFICACIÓN CMAA**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar por el grado académico de:

**INGENIERA MECÁNICA**

**AUTOR: CAROLINA ESTEFANÍA LOGROÑO ROMERO**

**DIRECTOR: ING. JAVIER ORNA**

Riobamba-Ecuador

2024

© 2024, Carolina Estefanía Logroño Romero

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de la Autora.

Yo, Carolina Estefanía Logroño Romero, declaro que el presente trabajo de integración curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 20 de junio 2024

**Carolina Estefanía Logroño Romero**

**C.I: 060534832-5**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA MECÁNICA**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, **DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN PARA EL DISEÑO DE VIGAS CARRILERAS PARA PUENTES GRÚA SEGÚN LA ESPECIFICACIÓN CMAA**, realizado por la señorita: **CAROLINA ESTEFANÍA LOGROÑO ROMERO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Miguel Aquino <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	_____	2024-06-20
Ing. Javier Orna <b>DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>	_____	2024-06-20
Ing. Natalia Layedra <b>ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>	_____	2024-06-20

## **DEDICATORIA**

A Dios porque gracias a su amor y bondad pude concluir mis estudios universitarios, a mis padres porque fueron mi guía y apoyo en todo momento, dedico esta tesis con mucho amor a mi tío Jorge por siempre estar al pendiente en mi día a día y ser un ejemplo de fuerza y constancia, a mis hermanas y mis sobrinos por sus palabras de aliento y compañía, a Ariel quien con su infinito amor y paciencia me ayudó a enfrentar con sabiduría los obstáculos de la vida.

Y a todos quiénes de una u otra forma me apoyaron y alentaron en la realización de mi trabajo de titulación.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco en primer lugar a Dios , por permitirme estar con vida y cumplir mis sueños , a mis padres por su amor incondicional , a mis hermanas y sobrinos por su apoyo en todo momento y en especial a mis tíos Jorge y Nancy por permanecer a lo largo de mi vida con su amor y preocupación en cada paso de mi vida estudiantil.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvii
RESUMEN.....	xviii
SUMMARY.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	1

### CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Formulación del problema.....	3
1.3. Justificación.....	3
1.3.1. <i>Justificación teórica</i> .....	3
1.3.2. <i>Justificación metodológica</i> .....	4
1.3.3. <i>Justificación socioeconómica</i> .....	4
1.4. Alcance.....	4
1.5. Objetivos.....	4
1.5.1. <i>Objetivo General</i> .....	4
1.5.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	4

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Normativas de la CMAA.....	6
2.1.1. <i>Normativas y Estándares de la CMAA</i> .....	6
2.1.2. <i>Historia y Evolución de las Normativas de la CMAA</i> .....	6
2.1.3. <i>Comparativa con Normativas Internacionales</i> .....	6
2.2. Diseño y análisis de puentes grúa.....	6
2.2.1. <i>Ingeniería de Puentes Grúa</i> .....	6
2.2.2. <i>Software de Diseño Estructural</i> .....	6
2.3. Desarrollo de software.....	7
2.3.1. <i>Programación y Desarrollo de Software</i> .....	7

2.3.2.	<i>Automatización y Simulación</i> .....	7
2.4.	<b>Evaluación de usabilidad y efectividad</b> .....	7
2.4.1.	<i>Pruebas y Validación</i> .....	7
2.4.2.	<i>Retroalimentación de Usuarios</i> .....	7
2.5.	<b>Puente grúa</b> .....	7
2.6.	<b>Ingeniería estructural</b> .....	8
2.6.1.	<i>Normativas y regulaciones</i> .....	8
2.6.2.	<i>Software de ingeniería estructural</i> .....	8
2.7.	<b>Automatización y simulación</b> .....	8
2.7.1.	<i>Usabilidad y experiencia del usuario</i> .....	9
2.7.2.	<i>Validación de pruebas</i> .....	9
2.8.	<b>Desarrollo de Software</b> .....	9
2.8.1.	<i>Matriz para un elemento viga</i> .....	10
2.8.2.	<i>Matriz de rigidez basada en la teoría de la Viga de Euler Bernoulli</i> .....	10

## CAPÍTULO III

3.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	13
3.1.	<b>Metodología TDD</b> .....	13
3.1.1.	<i>Principios del TDD</i> .....	13
3.1.1.1.	<i>Las pruebas deben escribirse primero</i> .....	13
3.1.1.2.	<i>Las pruebas deben fallar al principio</i> .....	13
3.1.1.3.	<i>El código debe escribirse para pasar las pruebas</i> .....	13
3.1.1.4.	<i>El código debe refactorizarse</i> .....	13
3.1.2.	<b>Ciclo de desarrollo del TDD</b> .....	14
3.1.2.1.	<i>Escribir una prueba</i> .....	14
3.1.2.2.	<i>Implementar el código</i> .....	14
3.1.2.3.	<i>Refactorizar el código</i> .....	14
3.1.3.	<b>Herramientas y frameworks para TDD</b> .....	14
3.1.3.1.	<i>Herramientas de pruebas unitarias</i> .....	14
3.1.3.2.	<i>Frameworks de TDD</i> .....	15
3.1.3.3.	<i>Herramientas de automatización de Pruebas</i> .....	15
3.2.	<b>Normas aplicadas para el diseño de los rieles</b> .....	15
3.2.1.	<b>CISC: Guía para el Diseño de Estructuras de Acero para Puentes Grúa. Segunda Edición</b> .....	15

3.2.2. <i>AISCLRFD: Especificación de cálculo de los factores de carga y resistencia para edificios de acero estructural</i> .....	16
3.3. <b>Diseño de la interfaz de usuario UI (Front End)</b> .....	16
3.3.1. <i>Diseño de interfaz para inicio de sesión (Main page)</i> .....	16
3.3.2. <i>Diseño de la interfaz de ingreso de datos</i> .....	18
3.3.3. <i>Diseño de la interfaz de resultados</i> .....	20
3.3.3.1. <i>Resultado de cargas</i> .....	21
3.3.3.2. <i>Resultado para el diseño de la viga y riel</i> .....	21
3.4. <b>Lectura y escritura de base de datos mediante SQL Server</b> .....	21
3.4.1. <i>Conexión a la Base de Datos</i> .....	21
3.4.2. <i>Consultas SQL</i> .....	22
3.4.3. <i>Inserción y Actualización de Datos</i> .....	23
3.4.4. <i>Transacciones</i> .....	23
3.4.5. <i>Cierre de conexiones</i> .....	24
3.5. <b>Diseño de la arquitectura interna (Back End)</b> .....	24
3.5.1. <i>Gestión de inicio de sesión y registros de usuarios</i> .....	24
3.5.1.1. <i>Interfaz de inicio de sesión</i> .....	24
3.5.1.2. <i>Creación de base de Datos para Usuarios Registrados</i> .....	25
3.5.1.3. <i>Implementación de la lógica de inicio de sesión</i> .....	25
3.5.1.4. <i>Implementación de la lógica de registro</i> .....	26
3.5.2. <i>Procesamiento de datos de entrada</i> .....	27
3.5.3. <i>Validación de datos y cálculos estructurales</i> .....	28
3.5.4. <i>Conexión con la base de datos</i> .....	28
3.5.5. <i>Generación de resultados</i> .....	28
3.6. <b>Proceso de diseño</b> .....	29
3.6.1. <i>Obtención de los datos de diseño</i> .....	29
3.6.1.1. <i>Datos</i> .....	29
3.6.1.2. <i>Cargas de trabajo</i> .....	30
3.6.1.3. <i>Seguridad y ergonomía del puente grúa</i> .....	30
3.6.1.4. <i>Clase de servicio del puente grúa</i> .....	31
3.6.2. <i>Preselección de la viga carrilera y el riel</i> .....	32
3.6.2.1. <i>Preselección de la viga carrilera</i> .....	32
3.6.2.2. <i>Preselección del riel</i> .....	33
3.6.3. <i>Cálculo de las cargas de diseño</i> .....	33
3.6.3.1. <i>Carga de empuje lateral</i> .....	33

3.6.3.2. Carga vertical .....	35
3.6.3.3. Carga de tracción.....	35
3.6.3.4. Momento máximo producido .....	36
3.6.3.5. Cortante máximo producido .....	37
3.6.3.6. Cargas de diseño utilizadas para el diseño por la AISC (momentos y cortante) .....	37
3.6.3.7. Carga vertical impuesta a la columna.....	38
3.6.3.8. Carga de empuje impuesta a la columna.....	38
3.6.3.9. Carga de tracción impuesta a la columna.....	38
<b>3.6.4. Diseño en base a la norma AISC 360-10 .....</b>	<b>39</b>
3.6.4.1. Diseño por flexión .....	39
3.6.4.2. El método ASD .....	42
3.6.4.3. El método LRFD.....	42
3.6.4.4. Sección F2 de la AISC 360-10.....	42
<b>3.6.5. Validación del diseño por el criterio de rigidez .....</b>	<b>44</b>
3.6.5.1. Deformación máxima y permisible vertical .....	44
3.6.5.2. Deformación máxima y permisible horizontal .....	45
<b>3.6.6. Obtención de resultados .....</b>	<b>45</b>
<b>3.7. Ejercicios de aplicación .....</b>	<b>45</b>
<b>3.7.1. Ejercicio N°1 de aplicación (2 ruedas, inglés) .....</b>	<b>46</b>
3.7.1.1. Datos del puente grúa .....	46
3.7.1.2. Propiedades de la viga carrilera y del riel .....	46
3.7.1.3. Carga de empuje lateral de la grúa.....	48
<b>3.7.2. Cálculo de las cargas soportadas por el perfil de la viga carrilera .....</b>	<b>48</b>
3.7.2.1. Diseño por la norma AISC 360-10 .....	53
<b>3.7.3. Dimensiones generales para el cálculo .....</b>	<b>59</b>
<b>3.7.4. Datos del puente grúa.....</b>	<b>59</b>
3.7.4.1. Propiedades de la viga carrilera y del riel .....	59
3.7.4.2. Carga de empuje lateral de la grúa.....	61
<b>3.7.5. Cálculo de las cargas soportadas por el perfil de la viga carrilera .....</b>	<b>61</b>
3.7.5.1. Diseño por la norma AISC 360-10 .....	67
<b>3.7.6. Ejercicio N°2 de aplicación (4 ruedas, inglés) .....</b>	<b>72</b>
3.7.6.1. Datos del puente grúa .....	72
3.7.6.2. Propiedades de la viga carrilera y del riel .....	73
3.7.6.3. Carga de empuje lateral de la grúa.....	74
<b>3.7.7. Cálculo de las cargas soportadas por el perfil de la viga carrilera .....</b>	<b>74</b>

3.7.7.1. <i>Diseño por la norma AISC 360-10</i> .....	78
3.7.8. <i>Ejercicio N°3 de aplicación (4 ruedas, métrico)</i> .....	83
3.7.8.1. <i>Datos del puente grúa</i> .....	83
3.7.8.2. <i>Propiedades de la viga carrilera y del riel</i> .....	84
3.7.8.3. <i>Carga de empuje lateral de la grúa</i> .....	85
3.7.9. <i>Cálculo de las cargas soportadas por el perfil de la viga carrilera</i> .....	85
3.7.9.1. <i>Diseño por la norma AISC 360-10</i> .....	89

## CAPÍTULO IV

4. <b>RESULTADOS</b> .....	94
4.1. <b>Validación por comparación</b> .....	94
4.1.1. <i>Alcance</i> .....	94
4.1.2. <i>Objetivos</i> .....	94
4.2. <b>Definición de los casos de Prueba</b> .....	95
4.2.1. <i>Dos ruedas con sistema métrico</i> .....	95
4.2.2. <i>Dos ruedas con sistema inglés</i> .....	95
4.2.3. <i>Cuatro ruedas con sistema métrico</i> .....	95
4.2.4. <i>Cuatro ruedas con sistema inglés</i> .....	96
4.3. <b>Obtención de Resultados de referencia</b> .....	96
4.3.1. <i>Dos ruedas con sistema inglés</i> .....	96
4.3.2. <i>Dos ruedas con sistema métrico</i> .....	96
4.3.3. <i>Cuatro ruedas con sistema inglés</i> .....	97
4.3.4. <i>Cuatro ruedas con sistema métrico</i> .....	97
4.4. <b>Aplicación del Software</b> .....	98
4.4.1. <i>Interfaz de Bienvenida</i> .....	98
4.4.2. <i>Usuario y Contraseña</i> .....	98
4.4.3. <i>Configuración de grúa y selección del sistema de unidades</i> .....	99
4.4.4. <i>Ingreso de datos</i> .....	100
4.5. <b>Comparación de resultado</b> .....	101
4.5.1. <i>Dos ruedas con sistema inglés</i> .....	101
4.5.2. <i>Cuatro ruedas con sistema métrico</i> .....	101
4.5.3. <i>Cuatro ruedas con sistema inglés</i> .....	102
4.5.4. <i>Cuatro ruedas con sistema métrico</i> .....	103
4.6. <b>Análisis de Discrepancia</b> .....	103

**4.7. Optimización y mejora**.....105

**CONCLUSIONES**.....106

**RECOMENDACIONES**.....107

**BIBLIOGRAFÍA**

**ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3-1:</b> Clases de servicio los puentes grúa según la CMAA .....	31
<b>Tabla 3-2:</b> Porcentajes para la carga vertical, carga de empuje lateral y carga de tracción. ....	34
<b>Tabla 3-3:</b> Combinaciones de carga para la carga de empuje lateral .....	35
<b>Tabla 3-4:</b> Caracterización del ala y alma para los diferentes perfiles.....	40
<b>Tabla 3-5:</b> Sección utilizada en la AISC para el diseño por flexión .....	41
<b>Tabla 3-6:</b> Deflexión permisible según la clase de servicio.....	44
<b>Tabla 3-7:</b> Opciones carga empuje lateral ejercicio 1 .....	48
<b>Tabla 3-8:</b> Clasificación del ala del ejercicio 1.....	54
<b>Tabla 3-9:</b> Clasificación del alma del ejercicio 1.....	55
<b>Tabla 3-10:</b> Pandeo lateral torsional.....	55
<b>Tabla 3-11:</b> Longitud sin arriostrar.....	56
<b>Tabla 3-12:</b> Opciones carga de empuje lateral.....	61
<b>Tabla 3-13:</b> Clasificación del ala del ejercicio 1.....	68
<b>Tabla 3-14:</b> Clasificación del alma del ejercicio 1.....	68
<b>Tabla 3-15:</b> Pandeo lateral torsional.....	68
<b>Tabla 3-16:</b> Longitud sin arriostrar.....	69
<b>Tabla 3-17:</b> Opciones carga de empuje lateral.....	74
<b>Tabla 3-18:</b> Clasificación del ala del ejercicio 2.....	80
<b>Tabla 3-19:</b> Clasificación del alma del ejercicio 2.....	80
<b>Tabla 3-20:</b> Pandeo lateral torsional.....	80
<b>Tabla 3-21:</b> Longitud sin arriostrar.....	81
<b>Tabla 3-22:</b> Opciones carga de empuje lateral.....	85
<b>Tabla 3-23:</b> Clasificación del ala del ejercicio 1.....	90
<b>Tabla 3-24:</b> Clasificación del alma del ejercicio 1.....	90
<b>Tabla 3-25:</b> Pandeo lateral torsional.....	90
<b>Tabla 3-26:</b> Longitud sin arriostrar.....	91
<b>Tabla 4-1:</b> Resultados para el ejercicio práctico con 2 ruedas en sistema inglés .....	96
<b>Tabla 4-2:</b> Resultados para el ejercicio práctico con 2 ruedas en sistema métrico.....	96
<b>Tabla 4-3:</b> Resultados para el ejercicio práctico con 4 ruedas en sistema inglés .....	97
<b>Tabla 4-4:</b> Resultados para el ejercicio práctico con 4 ruedas en sistema métrico.....	97
<b>Tabla 4-5:</b> Resultados para el ejercicio práctico con 2 ruedas en sistema inglés .....	101
<b>Tabla 4-6:</b> Resultados para el ejercicio práctico con 2 ruedas en sistema métrico.....	101

<b>Tabla 4-7:</b> Resultados para el ejercicio práctico con 4 ruedas en sistema inglés .....	102
<b>Tabla 4-8:</b> Resultados para el ejercicio práctico con 4 ruedas en sistema métrico.....	103
<b>Tabla 4-9:</b> Análisis de discrepancias .....	104
<b>Tabla 4-10:</b> Optimización y mejora.....	105

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 3-1:</b> Etapas de la metodología TDD.....	14
<b>Ilustración 3-2:</b> Base de datos para los usuarios en Runda .....	17
<b>Ilustración 3-3:</b> Diseño de la interfaz para el ingreso de dato de la aplicación RunWay.....	19
<b>Ilustración 3-4:</b> Propiedades geométricas de los perfiles para la viga.....	20
<b>Ilustración 3-5:</b> Propiedades geométricas de los perfiles para el riel .....	20
<b>Ilustración 3-6:</b> Pseudocódigo de conexión a la base de datos.....	22
<b>Ilustración 3-7:</b> Pseudocódigo de consulta con la base de datos .....	22
<b>Ilustración 3-8:</b> Pseudocódigo de inserción y actualización de Datos.....	23
<b>Ilustración 3-9:</b> Pseudocódigo de transacciones con la base de datos .....	24
<b>Ilustración 3-10:</b> Interfaz de inicio de sesión .....	25
<b>Ilustración 3-11:</b> Lógica de inicio de sesión .....	26
<b>Ilustración 3-12:</b> Lógica de registro de usuario .....	27
<b>Ilustración 3-13:</b> Flujo del proceso de diseño según la CMAA .....	29
<b>Ilustración 3-14:</b> Viga simple con carga en cualquier punto.....	32
<b>Ilustración 3-15:</b> Distancia a la que se produce el momento máximo con 2 ruedas .....	36
<b>Ilustración 3-16:</b> Distancia a la que se produce el momento máximo con 2 ruedas .....	36
<b>Ilustración 3-17:</b> Corte máximo producido.....	37
<b>Ilustración 3-18:</b> Datos del puente ejercicio 1 .....	46
<b>Ilustración 3-19:</b> Viga carrilera S18x54.7.....	47
<b>Ilustración 3-20:</b> Riel ASCE 20.....	47
<b>Ilustración 3-21:</b> Distancia momento crítico.....	50
<b>Ilustración 3-22:</b> Diagrama de momentos.....	51
<b>Ilustración 3-23:</b> Viga carrilera S18x54.7.....	54
<b>Ilustración 3-24:</b> Diagrama de momentos.....	56
<b>Ilustración 3-25:</b> Dimensiones generales.....	59
<b>Ilustración 3-26:</b> Viga carrilera W21x101 .....	60
<b>Ilustración 3-27:</b> Riel ASCE 40.....	60
<b>Ilustración 3-28:</b> Distancia momento crítico.....	63
<b>Ilustración 3-29:</b> Diagrama de momentos.....	64
<b>Ilustración 3-30:</b> Viga carrilera W21x101 .....	67
<b>Ilustración 3-31:</b> Diagrama de momentos.....	69
<b>Ilustración 3-32:</b> Dimensiones ejercicio 2 .....	72

<b>Ilustración 3-33:</b> Viga carrilera W24x162 .....	73
<b>Ilustración 3-34:</b> Riel ASCE 40.....	73
<b>Ilustración 3-35:</b> Viga carrilera W24x162 .....	79
<b>Ilustración 3-36:</b> Dimensiones ejercicio 3 .....	83
<b>Ilustración 3-37:</b> Viga carrilera W14x342 .....	84
<b>Ilustración 3-38:</b> Riel ASCE 40.....	84
<b>Ilustración 3-39:</b> Viga carrilera W14x342 .....	89
<b>Ilustración 4-1:</b> Interfaz de bienvenida .....	98
<b>Ilustración 4-2:</b> Usuario y contraseña .....	99
<b>Ilustración 4-3:</b> Configuración inicial.....	100
<b>Ilustración 4-4:</b> Ingreso de datos.....	100

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** Codificación

**ANEXO B:** Instalación de la biblioteca de la interfaz de usuario

## RESUMEN

Esta investigación se enfoca en el desarrollo de un software de diseño implementado en el lenguaje de programación C# para vigas carrileras de puentes grúa, alineado con las directrices y estándares establecidos por la Crane Manufacturers Association of America (CMAA). El propósito principal es ofrecer a ingenieros y diseñadores una herramienta robusta y de fácil utilización que agilice y optimice el proceso de diseño de estas estructuras fundamentales. Se abordan detalladamente las normativas de la CMAA y los principios de ingeniería estructural aplicados a las vigas carrileras, destacando su importancia para garantizar la seguridad y eficiencia operativa de los puentes grúa en entornos industriales y comerciales. Además, se presenta una exhaustiva descripción de la arquitectura y funcionalidades del programa desarrollado en C#, resaltando su capacidad para realizar cálculos precisos y presentar resultados de manera clara y comprensible. En última instancia, este proyecto busca elevar los estándares de calidad, seguridad y eficiencia en la manipulación de cargas pesadas, contribuyendo al avance continuo en el diseño y fabricación de puentes grúa en todo el mundo.

**Palabras clave:** <MECÁNICA> <SOFTWARE DE DISEÑO> <PUENTE GRÚA> <VIGAS CARRILERAS> <DISEÑO ESTRUCTURAL> <CMAA>.

## **SUMMARY**

Keywords: < >

## **INTRODUCCIÓN**

Dentro de la industria ecuatoriana, el diseño orientado a la elevación de cargas, especialmente el orientado a las puentes grúa, desempeña un papel fundamental, especialmente para la eficiencia en los procesos industriales y su fabricación. Bajo este contexto es necesario tener un flujo de diseño establecido, con el objetivo de obtener un diseño robusto y optimo, para esto el primer paso es consultar la norma adecuada según la American Society of Mechanical Engineers (ASME), considera como el estándar para la gran mayoría de procesos de diseño mecánico, esta norma nos deriva a la sección ASME B30.2, que está encargada de los diseños y selecciones referentes a: “Elevación de cargas, indicadores de cargas, mecanismos de izaje, Control de oscilaciones y limitadores de cargas”(Sitthipong et al., 2018). Esta sección nos conduce a otra norma más, la Crane Manufacturers Association of America (CMAA) establece estándares reconocidos a nivel internacional para la fabricación y diseño de puentes grúa, incluyendo las vigas carrileras que soportan el movimiento del puente. La precisa adecuación de estas vigas a las cargas y especificaciones requeridas es esencial para garantizar la seguridad y la eficiencia operativa de los puentes grúa.

EL proyecto que se busca desarrollar tiene como objetivo el desarrollo de un programa de diseño de vigas carrileras para puentes grúa en el lenguaje de programación C#, el cual es muy empleado para los programas con orientaciones de ingeniería, y cuyas herramientas son de gran ayuda para lograr diseños precisos. Con esto se busca generar una contribución a la industria, y ofrecer una herramienta adecuada para los diferentes procesos de diseño de elevación de carga mediante puentes grúa, que además, esté comprobado correctamente mediante normas adecuadas para estos procedimientos.

A lo largo del desarrollo del proyecto, se explorarán todas las recomendaciones y pautas presentes en la CMAA para el diseño correspondiente a las vigas carrileras de puentes grúa, el desarrollo integral del software, la metodología de diseño de software, y las diferentes pruebas del software para comprobar su eficacia en los diferentes entornos de diseño que se pueden llegar a presentar en entornos industriales.

## CAPÍTULO I

### 1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

#### 1.1. Antecedentes

En la industria de la elevación y manipulación de cargas pesadas, los puentes grúa son elementos esenciales para la eficiencia y la seguridad de una gran variedad de aplicaciones, tales como la construcción, el montaje y la manufactura. Es por esto por lo que se necesita que el diseño, la fabricación y la operación de estos equipos, sea un proceso sencillo pero adecuado, además de regulado por los estándares y normativas específicos para el caso, como los establecidos por la Craneway Manufacturers Association (CMAA).

La CMAA, es la organización líder en la industria de puentes grúa, todos los fabricantes, diseñadores y agentes de la industria, esta organización ha desarrollado a lo largo de su historia, todos los parámetros necesarios para la correcta elaboración de puentes grúa en la industria, todas estas normativas detallan todos los aspectos críticos del diseño, la fabricación y la implementación de estas máquinas, tales como las cargas del puente grúa, los materiales a emplear, las tolerancias de diseño, la selección de perfilería y los factores de seguridad. Todas estas estipulaciones son esenciales para asegurar que los puentes grúa diseñados con la norma sean estructuralmente estables, y capaces de funcionar en los entornos demandados por la industria.

No obstante, a pesar de la importancia que tienen las normativas de la CMAA, la falta de herramientas adecuadas de software que además sean especializadas, es una limitación constante en la industria. En la actualidad, la mayoría de los profesionales y diseñadores dependen de métodos tradiciones y adaptaciones manuales para otorgar un correcto cumplimiento de las normativas vigentes, lo que genera nuevos desafíos, que se detallan a continuación:

Las normativas vigentes, como la CMAA son detalladas y muy específicas, lo que dificulta la implementación manual para el diseño. Los ingenieros y los calculistas deben implementar e interpretar lo que dicen estas normativas de manera adecuada, lo que, en su momento, lleva a errores de concordancia, y diseños no conformes con la norma.

A pesar de que existen softwares de análisis estructural en general, son pocos los programas que se centran netamente en el abordaje de las normativas específicas de la CMAA. Por tanto, la falta de herramientas de este estilo deriva a dificultades en el diseño y el análisis de puentes grúa que cumplan con las regulaciones pertinentes.

Existe un numero grande de variables en el diseño y la operación correcta de puentes grúa, esto por tanto requiere un enfoque automatizado para garantizar que se cumplan y no se omitan la mayoría de las normativas que se establecen de manera consistente, La automatización en este momento se vuelve casi obligatoria, con el objetivo de garantizar una eficiencia a la hora de diseñar para la industria.

El incumplimiento de estas normativas, como la CMAA puede tener graves incidencias en la seguridad de las operaciones en el entorno industrial. Diseños considerados deficientes pueden llevar a accidentes y pérdida de eficiencia para la manipulación de cargas en las empresas, problema que se debe evitar a toda costa.

Existen programas con características similares a las que se buscan en este proyecto, como: Mechanical Desktop dentro de AutoCAD que permite diseñar a fatiga, CRANE-DESIGN (Versión 5.0) desarrollada como asistente para el diseño de carriles con aplicación en la industria minera y de construcción, HEXAGON (Mechanical Engineering software) que permite diseñar elementos de GRÚAS, entre ellas vigas de carril). Estas herramientas tienen limitaciones, ya sea en el diseño a fatiga, diseño por rigidez o cálculo de método de elemento finito (Loyola Huatay, 2017).

Debido a la falta de software específico que aborde de manera concreta este tema, se presente una evidente necesidad de desarrollar un programa de diseño y análisis de puentes grúa que cumpla con las normativas estipuladas por la CMAA. Esto ayudaría en gran medida a los ingenieros y diseñadores de estas máquinas a cumplir de manera correcta y eficaz con todas las regulaciones, mejorando exponencialmente la seguridad y la eficiencia en la manipulación de cargas pesadas en la industria.

## **1.2. Formulación del problema**

No existe un software especializado ampliamente disponible que pueda realizar el diseño y análisis automatizado de puentes grúa conforme a las normativas de la Craneway Manufacturers Association (CMAA), lo cual conlleva a un problema grave en la industria ecuatoriana. Esto deriva en la dependencia de procesos manuales de diseño que generan errores y resultados inadecuados. Por tanto, se necesita desarrollar un software dedicado que automatice y simplifique el proceso de diseño de puentes grúa, mejorando así la seguridad y la eficiencia en la manipulación de cargas pesadas en la industria (Rosales Vázquez, 2015).

## **1.3. Justificación**

### ***1.3.1. Justificación teórica***

El diseño de una aplicación para el diseño de las vigas de riel de un puente grúa es importante para la investigación en los campos de ingeniería civil y mecánica. El diseño de vigas de riel es un aspecto crítico del diseño de puentes grúa el cual se requiere automatizar en base a las normativas requeridas de la CMAA. Por lo tanto, el desarrollo de una aplicación para el diseño de las vigas de riel de un puente grúa es una contribución importante a la investigación en ámbitos ingenieriles.

### ***1.3.2. Justificación metodológica***

El diseño de un software para el diseño de vigas carrileras de puente grúa es muy importante a la hora de mejorar la eficiencia y la precisión del diseño, este proceso es complejo y requiere un gran número de cálculos detallados y minuciosos. El desarrollo de la aplicación para el diseño mejorará la eficiencia del proceso de diseño y a la vez busca reducir el tiempo que se necesita para completar un diseño entero. El programa puede además mejorar la precisión al reducir en gran medida los errores humanos, lo que aumenta la seguridad de las operaciones de elevación de carga.

### ***1.3.3. Justificación socioeconómica***

El desarrollo de una aplicación para el diseño de las vigas de riel de un puente grúa puede mejorar la eficiencia del proceso de diseño y reducir el tiempo necesario para completar el diseño. Esto puede reducir los costos de construcción y mejorar la competitividad de las empresas locales en el mercado global. Además, la aplicación puede mejorar la calidad del diseño y reducir la posibilidad de errores humanos, lo que puede mejorar la seguridad de los puentes grúa y reducir los costos de mantenimiento a largo plazo.

## **1.4. Alcance**

El alcance de esta investigación se limita al desarrollo de un software especializado destinado al diseño y análisis de puentes grúa, enfocado en la automatización y conformidad con las normativas establecidas por la Craneway Manufacturers Association (CMAA). El estudio se concentrará en la revisión exhaustiva de estas regulaciones, el diseño y creación del software, la validación a través de pruebas y casos de estudio, así como la evaluación de su utilidad en entornos prácticos. No se abordará la construcción física de puentes grúa ni la creación de nuevas normativas; en su lugar, el objetivo es proporcionar una herramienta tecnológica que mejore la seguridad y la eficiencia en la manipulación de cargas pesadas en la industria.

## **1.5. Objetivos**

### ***1.5.1. Objetivo General***

Desarrollar una aplicación para el diseño de Vigas de Carril para puentes grúa según la especificación CMAA (Crane Manufacturers Association of America).

### ***1.5.2. Objetivos Específicos***

- Realizar una revisión exhaustiva de las normativas de la CMAA relacionadas con el diseño y la construcción de puentes grúa, identificando los requisitos clave.
- Diseñar y desarrollar el software especializado que permita el diseño y análisis automatizado de puentes grúa, incorporando algoritmos precisos para cumplir con las regulaciones de la CMAA.

- Validar y verificar la precisión del software a través de la comparación de resultados con programas de análisis estructural y software especializado.
- Realizar un ejemplo práctico para validar el uso del software generado.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Normativas de la CMAA

##### 2.1.1. Normativas y Estándares de la CMAA

Las normativas de la Craneway Manufacturers Association (CMAA) constituyen un conjunto integral de regulaciones que abarcan todos los aspectos del diseño y funcionamiento de puentes grúa. Estas normativas incluyen requisitos específicos para la capacidad de carga, el diseño de estructuras, la selección de materiales, los factores de seguridad, las tolerancias y las consideraciones de mantenimiento. Un análisis en profundidad de estas regulaciones incluirá referencias a documentos específicos de la CMAA, como el "CMAA Specification 70" y el "CMAA Specification 74" (CMAA 74, 2020).

##### 2.1.2. Historia y Evolución de las Normativas de la CMAA

Las normativas de la CMAA han evolucionado en respuesta a avances tecnológicos y cambios en las necesidades industriales a lo largo del tiempo. Esto incluirá un rastreo histórico que resalte hitos clave en la evolución de estas regulaciones, desde sus primeros documentos hasta las ediciones más recientes, y cómo estas modificaciones han influido en el diseño y la seguridad de los puentes grúa.

##### 2.1.3. Comparativa con Normativas Internacionales

Además de las normativas de la CMAA, se realizará una comparación exhaustiva con otras normativas internacionales relevantes. Se analizarán en detalle las similitudes y diferencias entre las normativas de la CMAA y las de otras organizaciones importantes, como la Asociación de la Industria de Puentes Grúa (CMAA) de los Estados Unidos y las regulaciones de la Unión Europea. Se destacarán las áreas donde las normativas convergen y donde existen variaciones significativas (CMAA 70, 2020).

#### 2.2. Diseño y análisis de puentes grúa

##### 2.2.1. Ingeniería de Puentes Grúa

Se profundizará en los principios fundamentales de la ingeniería estructural aplicados específicamente a los puentes grúa. Esto incluirá conceptos clave como la teoría de cargas, el análisis de tensiones y deformaciones, la selección de perfiles y materiales, y las consideraciones de diseño sísmico y de viento, cuando sea aplicable como lo explicado según (Barrios, 2017).

##### 2.2.2. Software de Diseño Estructural

Se explorarán en detalle las herramientas de software ampliamente utilizadas en la industria para el diseño y análisis estructural. Esto incluirá programas de análisis de elementos finitos (FEA) como ANSYS y programas de modelado 3D como SolidWorks: Se describirán cómo se aplican

estas herramientas al diseño de puentes grúa y cómo facilitan la simulación de condiciones de carga, tales como cargas estáticas, dinámicas y cíclicas (ANSI/AISC 360-16, 2016).

## **2.3. Desarrollo de software**

### **2.3.1. Programación y Desarrollo de Software**

Se analizarán en profundidad los lenguajes de programación relevantes para el desarrollo del software especializado en puentes grúa, incluyendo Python, C++, y Java. Se considerarán metodologías de desarrollo de software ágiles como Scrum y enfoques de desarrollo guiados por pruebas (Test-Driven Development, TDD) para garantizar la calidad y eficiencia del código.

### **2.3.2. Automatización y Simulación**

Se explorarán algoritmos y técnicas específicas para la automatización del diseño y análisis de puentes grúa, incluyendo la generación automática de modelos estructurales basados en parámetros de diseño y la simulación de escenarios de carga y operación. Se destacará la importancia de la precisión y la eficiencia en el proceso de diseño automatizado (Mandamiento, 2022).

## **2.4. Evaluación de usabilidad y efectividad**

### **2.4.1. Pruebas y Validación**

Se describirán en detalle las metodologías de prueba y validación que se utilizarán para evaluar la eficacia y la precisión del software desarrollado. Esto incluirá pruebas de usabilidad, pruebas de rendimiento para evaluar la velocidad y la escalabilidad del software, y pruebas de estrés para verificar su resistencia bajo condiciones extremas. También se incluirá una comparativa con resultados manuales y otros programas de diseño existentes (Olcina Reig, 2017).

### **2.4.2. Retroalimentación de Usuarios**

La recopilación y el análisis de la retroalimentación de usuarios que trabajen con el software en entornos prácticos será un componente clave de la evaluación. Se utilizarán encuestas estructuradas, entrevistas semiestructuradas y registros de uso para recopilar datos sobre la experiencia de los ingenieros y profesionales que utilicen el software en su trabajo diario.

## **2.5. Puente grúa**

Un puente grúa es un equipo industrial utilizado para levantar y transportar cargas pesadas de manera eficiente dentro de un entorno de trabajo, como almacenes, fábricas o patios de construcción. Consiste en una estructura de puente que se desplaza a lo largo de vigas o rieles, equipada con un sistema de elevación que incluye poleas, cables y un gancho. Los puentes grúa son cruciales en operaciones de manejo de carga y desempeñan un papel fundamental en la productividad y la seguridad de diversas industrias (Brockenbrough y Merritt, 2011).

## 2.6. Ingeniería estructural

En el contexto de la ingeniería estructural, se aplican principios de la mecánica, la resistencia de materiales y la teoría de estructuras para diseñar y analizar elementos estructurales, como puentes grúa. Esto incluye consideraciones de cargas estáticas y dinámicas, análisis de tensiones y deformaciones, y factores de seguridad que aseguran la integridad y la capacidad de carga de las estructuras (Sithipong et al., 2018).

### 2.6.1. Normativas y regulaciones

Las normativas y regulaciones, como las de la Craneway Manufacturers Association (CMAA), son conjuntos de directrices técnicas y estándares que establecen los requisitos para el diseño, la fabricación y la operación segura de puentes grúa. Estas regulaciones abarcan áreas como la capacidad de carga, la selección de materiales, los factores de seguridad y las tolerancias, y son esenciales para garantizar la conformidad y la seguridad en la industria (CISC, 2009).



**Ilustración 2-1:** Especificación 70 y 74 de la CMAA.

**Realizado por:** Logroño C., 2023

### 2.6.2. Software de ingeniería estructural

El software de ingeniería estructural es una herramienta informática que permite a los ingenieros realizar análisis avanzados y complejos de estructuras, incluyendo puentes grúa. Esto incluye programas de análisis de elementos finitos (FEA) como ANSYS y software CAD (Computer-Aided Design) que facilita la modelización 3D de las estructuras y la simulación de cargas y condiciones operativas.

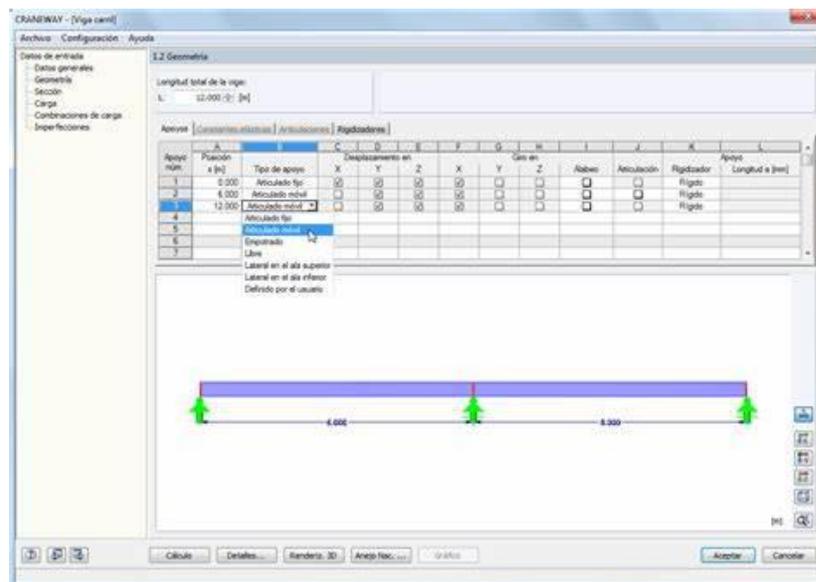
## 2.7. Automatización y simulación

La automatización en el contexto del diseño y análisis de puentes grúa se refiere a la aplicación de algoritmos y procesos que agilizan tareas repetitivas y complejas. La simulación implica la

recreación computarizada de condiciones de carga y operación para evaluar el comportamiento de un puente grúa bajo diversas circunstancias, lo que es esencial para garantizar la seguridad y la eficiencia (Olcina Reig, 2017).

### 2.7.1. Usabilidad y experiencia del usuario

La usabilidad se relaciona con la facilidad y eficiencia con la que los ingenieros pueden interactuar con el software. La experiencia del usuario (UX) abarca la satisfacción general del usuario al utilizar el software. Ambos aspectos son cruciales para el éxito del software, ya que una interfaz intuitiva y amigable mejora la productividad y la adopción.



**Ilustración 2-2:** Interfaz de un software de diseño de vigas de carril

Fuente: Logroño C., 2023

### 2.7.2. Validación de pruebas

La validación implica la verificación de que el software produce resultados precisos y cumple con las normativas de la CMAA. Las pruebas son esenciales para evaluar la efectividad y la confiabilidad del software en situaciones prácticas, incluyendo pruebas de usabilidad, pruebas de rendimiento y pruebas de estrés que evalúan su resistencia bajo condiciones extremas (Rivera, 2023).

## 2.8. Desarrollo de Software

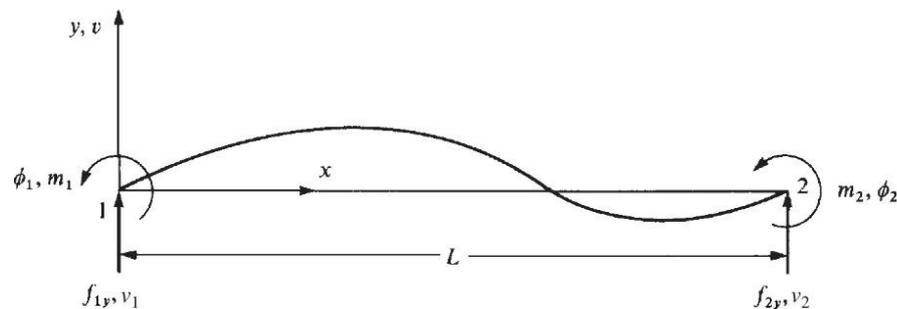
El desarrollo de software involucra un conjunto de procesos que incluyen planificación, diseño, programación, pruebas y despliegue. En el contexto de esta investigación, se consideran lenguajes de programación, metodologías ágiles de desarrollo como Scrum, y prácticas de programación eficiente para garantizar la calidad y la adaptabilidad del software.

### 2.8.1. Matriz para un elemento viga

Cuando se requiere resolver una viga por el método de rigidez, se debe dividir la misma en varias partes de longitud finita. Estas divisiones se localizan en puntos donde exista

- Un cambio en el tipo de carga distribuida
- Comienzo o fin de una carga distribuida
- Una carga puntual
- Un momento de par
- Un apoyo
- Un cambio de sección

### 2.8.2. Matriz de rigidez basada en la teoría de la Viga de Euler Bernoulli



**Ilustración 2-3:** Elemento viga con desplazamientos nodales positivos

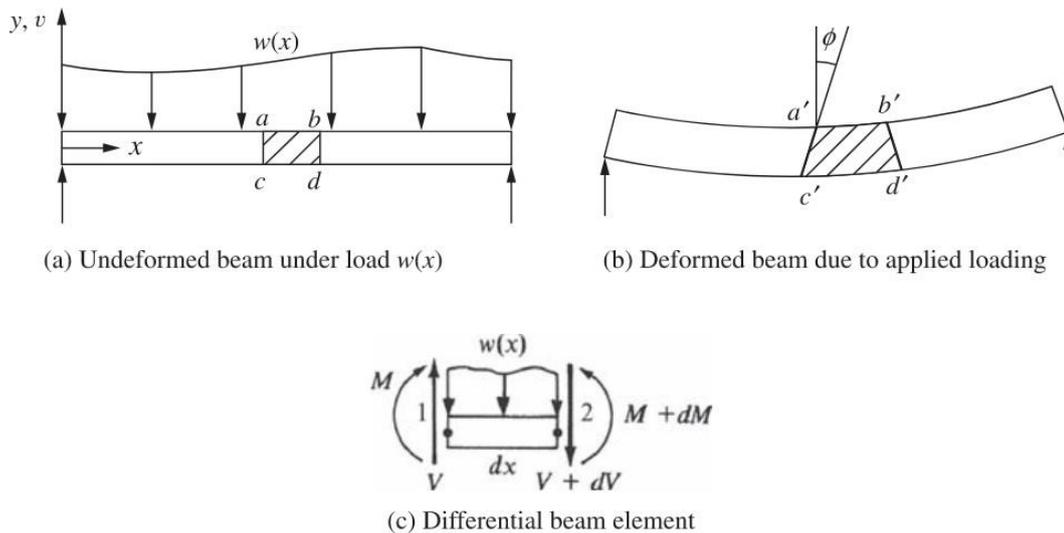
Fuente: Logroño C., 2023

- Momento de par
- Un apoyo
- Un cambio de sección

Estas propiedades se acoplan en una matriz de rigidez cuadrada que relaciona los desplazamientos del tramo con las fuerzas externas que actúan sobre ese tramo de viga.

$$\begin{Bmatrix} f_{1y} \\ m_1 \\ f_{2y} \\ m_2 \end{Bmatrix} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \phi_1 \\ v_2 \\ \phi_2 \end{Bmatrix}$$

Arriba se ven los desplazamientos y giros del tramo de viga.  $v_1$  y  $v_2$  denotan los desplazamientos verticales (longitud).  $\phi_1$  y  $\phi_2$  representan los giros del tramo de la viga en radianes. La matriz de rigidez cuadrada con las propiedades de  $E$ ,  $I$ ,  $L$  multiplicada por estos desplazamientos da como resultado las fuerzas en los extremos de la viga siguientes:



(a) Undeformed beam under load  $w(x)$

(b) Deformed beam due to applied loading

(c) Differential beam element

**Ilustración 2-4:** Momento flecto y fuerza resultante en los extremos del elemento

Fuente: Logroño, 2024

De la fórmula descrita anteriormente, se determina la matriz de rigidez suelta para cada elemento (matriz elemental) para luego ensamblarla dentro de una matriz de rigidez global que represente la relación de deformaciones y fuerzas externas y cargas en toda la estructura (Chavarría Jaramillo, 2023).

Luego, la matriz de rigidez está dada por:

$$[k] = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

La ecuación anterior indica que  $[k]$  relaciona las fuerzas transversales y los momentos flectores con las desplazamientos y rotaciones, mientras que los efectos axiales se han despreciado.

A manera de ejemplo, si se han definido dos elementos de longitud finita como constituyentes de una viga por algunas de las condiciones de separación de elementos ya mencionados, cada uno de estos tendrá una matriz de rigidez elemental que lo defina; luego, para obtener la solución total del sistema, las matrices elementales se acoplan en una matriz global, misma que tras definir las condiciones de frontera se simplificará para permitir calcular las reacciones en los apoyos y las deformaciones lineales y angulares en los nodos analizados (Santacruz Bermeo, 2015).

Matriz elemental 1:

$$[k^{(1)}] = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} v_1 & \phi_1 & v_2 & \phi_2 \\ 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

Matriz elemental 2:

$$[k^{(2)}] = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} v_2 & \phi_2 & v_3 & \phi_3 \\ 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}$$

Matriz global:

$$\begin{Bmatrix} F_{1y} \\ M_1 \\ F_{2y} \\ M_2 \\ F_{3y} \\ M_3 \end{Bmatrix} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L & 0 & 0 \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 & 0 & 0 \\ -12 & -6L & 12 + 12 & -6L + 6L & -12 & 6L \\ 6L & 2L^2 & -6L + 6L & 4L^2 + 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ 0 & 0 & -12 & -6L & 12 & -6L \\ 0 & 0 & 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_1 \\ \phi_1 \\ v_2 \\ \phi_2 \\ v_3 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}$$

Como ya se mencionó anteriormente, la aplicación utilizará el método de rigidez para la resolución en términos de deflexión de los carriles debido a que pueden ser tratados como vigas de sección transversal con otras propiedades.

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Metodología TDD

La metodología de Desarrollo Guiado por pruebas (TDD), es una práctica de programación que consiste en escribir en primer lugar un conjunto de pruebas, generalmente unitarias, para después escribir el código fuente, y verificar que este pase la prueba satisfactoriamente, con el objetivo de refactorizar el código escrito (Citarelli y Feldmann, 2019).

##### 3.1.1. Principios del TDD

Debido a que el principio de la metodología está orientado en la elaboración de pruebas unitarias, para escribir un código correspondiente, debemos regirnos a los siguientes principios fundamentales de la metodología:

###### 3.1.1.1. Las pruebas deben escribirse primero

Esto significa que las pruebas deben ser escritas antes de que se escriba el código que las implementa.

Este principio es fundamental para el TDD. Al escribir las pruebas primero, los desarrolladores se centran en la especificación de la funcionalidad que deben implementar. Esto ayuda a garantizar que el código sea correcto y completo (Porras-Jiménez, 2011).

###### 3.1.1.2. Las pruebas deben fallar al principio

Esto significa que las pruebas deben ser escritas de manera que fallen cuando se ejecutan con el código fuente inicial. Este principio ayuda a los desarrolladores a verificar que las pruebas están correctamente escritas. Si las pruebas pasan al principio, es probable que no estén verificando la funcionalidad adecuada.

###### 3.1.1.3. El código debe escribirse para pasar las pruebas

Esto significa que las pruebas deben ser escritas de manera que fallen cuando se ejecutan con el código fuente inicial. Este principio ayuda a los desarrolladores a verificar que las pruebas están correctamente escritas. Si las pruebas pasan al principio, es probable que no estén verificando la funcionalidad adecuada (Kossakowski, Wciślik y Bakalarz, 2019).

###### 3.1.1.4. El código debe refactorizarse

Esto significa que el código debe mejorarse para que sea más limpio, más eficiente y más fácil de mantener. La refactorización es un proceso de mejora del código existente sin cambiar su funcionalidad. El TDD fomenta la refactorización, ya que las pruebas proporcionan una garantía de que el código seguirá funcionando correctamente después de la refactorización.

Estos principios pueden parecer simples, pero son fundamentales para aplicar el TDD de manera efectiva. Al seguir estos principios, los desarrolladores pueden desarrollar software de calidad que sea correcto, completo y fácil de mantener.

### 3.1.2. Ciclo de desarrollo del TDD

El ciclo de desarrollo del TDD es un ciclo repetitivo que se compone de las siguientes etapas:

#### 3.1.2.1. Escribir una prueba

En esta etapa, se escribe una prueba que verifica la funcionalidad que se desea implementar. La prueba debe ser lo más simple posible y debe fallar al principio (Domínguez Equiza, 2011).

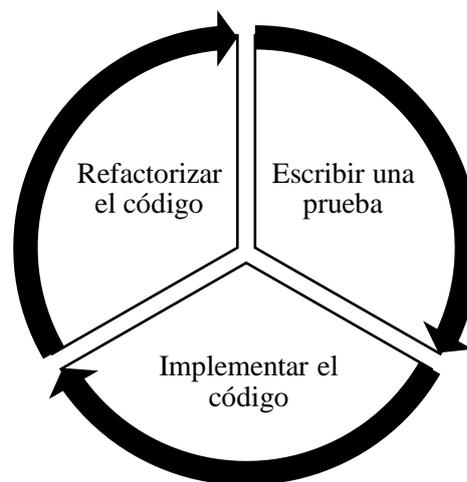
#### 3.1.2.2. Implementar el código

En esta etapa, se escribe el código que hace que la prueba pase. El código debe ser lo más simple posible y debe cumplir con los requisitos especificados en la prueba.

#### 3.1.2.3. Refactorizar el código

En esta etapa, se mejora el código para que sea más limpio, más eficiente y más fácil de mantener. El código refactorizado debe seguir pasando todas las pruebas.

Este ciclo se repite hasta que se implementa toda la funcionalidad del software.



**Ilustración 3-1:** Etapas de la metodología TDD

Realizado por: Logroño C., 2024

### 3.1.3. Herramientas y frameworks para TDD

Hay una gran variedad de herramientas y frameworks disponibles para implementar el TDD. Estas herramientas y frameworks pueden ayudar a los desarrolladores a escribir pruebas unitarias, ejecutar pruebas y automatizar el proceso de desarrollo.

#### 3.1.3.1. Herramientas de pruebas unitarias

Las herramientas de pruebas unitarias proporcionan una forma de escribir y ejecutar pruebas unitarias. Estas herramientas pueden ayudar a los desarrolladores a escribir pruebas más fácilmente y a ejecutarlas de forma más eficiente, los más empleados son los siguientes (Vašková, Fojtík y Pustka, 2017):

- JUnit es una herramienta de pruebas unitarias de código abierto para Java.

- NUnit es una herramienta de pruebas unitarias de código abierto para .NET.
- xUnit es una herramienta de pruebas unitarias de código abierto para C#.

### 3.1.3.2. Frameworks de TDD

Los frameworks de TDD proporcionan una forma de implementar el ciclo de desarrollo del TDD. Estos frameworks pueden ayudar a los desarrolladores a seguir los principios del TDD y a automatizar el proceso de desarrollo.

Algunos ejemplos de frameworks de TDD populares son:

- TDD.NET es un framework de TDD para .NET.
- XUnit es también un framework de TDD para C#.
- Chai es un framework de TDD para JavaScript.

### 3.1.3.3. Herramientas de automatización de Pruebas

Las herramientas de automatización de pruebas proporcionan una forma de automatizar el proceso de ejecución de pruebas. Estas herramientas pueden ayudar a los desarrolladores a ahorrar tiempo y a ejecutar pruebas de forma más fiable.

Algunos ejemplos de herramientas de automatización de pruebas populares son:

- Jenkins: Jenkins es una herramienta de automatización de construcción y pruebas.
- Travis CI: Travis CI es una plataforma de integración y entrega continuas.
- CircleCI: CircleCI es una plataforma de integración y entrega continuas.

## 3.2. Normas aplicadas para el diseño de los rieles

Para el diseño de cualquier parte estructural de un puente grúa se debe verificar en la CMAA, y redirigirse a la norma citada en la misma para poder realizar cualquier diseño. Para poder diseñar los rieles la CMAA refiere a dos normas; la CISC y la AISC. Aunque se puede utilizar sus referentes europeos como la BS 590. En el presente trabajo se optó por utilizar la metodología de normas americanas (Trahair, 2021).

### 3.2.1. CISC: Guía para el Diseño de Estructuras de Acero para Puentes Grúa. Segunda Edición

La Guía para el Diseño de Estructuras de Acero para Puentes Grúa es una publicación del Instituto Canadiense de la Construcción en Acero (CISC). La segunda edición de esta guía se enfoca en el diseño de estructuras de acero para puentes grúa. La guía proporciona información detallada sobre los requisitos de diseño, las cargas y las combinaciones de cargas, la selección de materiales, la fabricación y la construcción de estructuras de acero para puentes grúa. La guía también incluye ejemplos de diseño y detalles de conexión.

El ámbito de aplicación de esta guía de diseño incluye las estructuras de acero que soportan grúas, independientemente del tipo de grúa. Se abordan los criterios de diseño establecidos por la CMAA.

### **3.2.2. AISCLRFD: Especificación de cálculo de los factores de carga y resistencia para edificios de acero estructural**

La norma AISC LRFD del Instituto Americano de la Construcción en Acero es una norma de diseño de acero estructural que se utiliza en los Estados Unidos. LRFD significa “Carga y Resistencia con Diseño por Estados Límites”. La norma AISC LRFD se utiliza para diseñar estructuras de acero, como edificios, puentes y torres. La norma AISC LRFD proporciona una serie de ecuaciones de combinación de carga básicas que se utilizan para diseñar estructuras de acero. La norma AISC LRFD también proporciona información sobre cómo diseñar conexiones de acero, como soldaduras y pernos. La norma AISC LRFD se actualiza periódicamente para reflejar los avances en la tecnología y la investigación (Trahair, 2021).

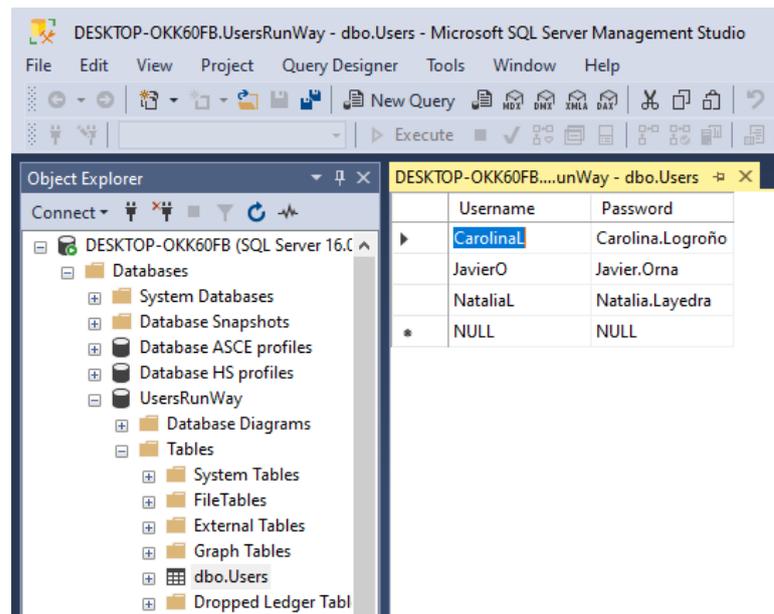
La norma AISC LRFD se basa en el método de diseño por estados límites (LRFD). Este método se utiliza para diseñar estructuras de acero que son seguras y confiables. El método LRFD se basa en la idea de que las cargas y las resistencias son variables aleatorias. Por lo tanto, se utilizan factores de carga y resistencia para tener en cuenta la variabilidad de las cargas y las resistencias. La norma AISC LRFD proporciona una serie de ecuaciones de combinación de carga básicas que se utilizan para diseñar estructuras de acero. Estas ecuaciones tienen en cuenta las cargas muertas, las cargas vivas, las cargas de viento y las cargas sísmicas (Ayala Herrera y Cabrera Dávalos, 2018).

La norma AISC LRFD también proporciona información sobre cómo diseñar conexiones de acero, la guía de diseño de edificios industriales-Techos a barras de anclaje segunda edición es también un documento que se utilizó en el presente trabajo, pues las conexiones de acero son elementos críticos en las estructuras de acero. Las conexiones de acero transfieren las cargas de un miembro a otro. La norma AISC LRFD proporciona información sobre cómo diseñar conexiones de acero, como soldaduras y pernos. La norma AISC LRFD también proporciona información sobre cómo diseñar conexiones de acero para resistir cargas de cortante y momento.

### **3.3. Diseño de la interfaz de usuario UI (Front End)**

#### **3.3.1. Diseño de interfaz para inicio de sesión (Main page)**

Para el diseño de la aplicación RunWay se requirió una base de datos que permita almacenar a los usuarios a los cuales se les conceda el permiso de acceso. La base de datos se la implementó mediante el programa SQL Server, la cual se conectó con la aplicación desarrollada en Visual Studio.



**Ilustración 3-2:** Base de datos para los usuarios en Runda

Realizado por: Logroño C., 2024

Se ha detallado 10 puntos importantes sobre la importancia del desarrollo de la base de datos para la aplicación RunWay.

- **Seguridad:** Una base de datos permite almacenar y proteger la información de inicio de sesión de los usuarios, como contraseñas y nombres de usuario, de manera segura. Esto evita que los datos se pierdan o se compartan con terceros no autorizados.
- **Eficiencia:** Con una base de datos, los usuarios pueden iniciar sesión rápidamente en la aplicación sin tener que ingresar sus credenciales cada vez. Esto ahorra tiempo y mejora la experiencia del usuario.
- **Personalización:** Una base de datos puede almacenar información adicional sobre los usuarios, como sus preferencias y configuraciones. Esto permite que la aplicación personalice la experiencia del usuario y ofrezca contenido relevante.
- **Análisis:** Una base de datos puede almacenar información sobre el comportamiento del usuario, como la frecuencia de inicio de sesión y las funciones utilizadas con más frecuencia. Esto permite a los desarrolladores de la aplicación analizar el comportamiento del usuario y mejorar la aplicación en consecuencia.
- **Escalabilidad:** Una base de datos puede manejar grandes cantidades de información de inicio de sesión y usuarios simultáneos. Esto permite que la aplicación crezca y se expanda a medida que aumenta el número de usuarios (Pitré, 2024).
- **Mantenimiento:** Una base de datos permite a los desarrolladores de la aplicación realizar un seguimiento de los problemas de inicio de sesión y solucionarlos rápidamente. Esto garantiza que la aplicación esté siempre disponible para los usuarios.

- **Integración:** Una base de datos puede integrarse con otras aplicaciones y sistemas, lo que permite una experiencia de inicio de sesión sin problemas en múltiples plataformas (Solorzano Mogollón & Vargas León, 2019).
- **Accesibilidad:** Una base de datos permite a los usuarios acceder a la aplicación desde cualquier lugar y en cualquier momento. Esto mejora la accesibilidad y la disponibilidad de la aplicación.
- **Facilidad de uso:** Una base de datos permite a los usuarios iniciar sesión en la aplicación con un solo clic o toque. Esto hace que la aplicación sea fácil de usar y reduce la fricción del usuario.
- **Mejora de la retención de usuarios:** Una base de datos permite a los desarrolladores de la aplicación ofrecer una experiencia de inicio de sesión sin problemas y personalizada. Esto mejora la retención de usuarios y fomenta la lealtad del usuario.

### 3.3.2. *Diseño de la interfaz de ingreso de datos*

El desarrollo de la interfaz para el ingreso de datos en una aplicación es un proceso crucial que puede afectar la experiencia del usuario y la eficiencia de la aplicación. La interfaz de usuario es el medio por el cual una persona controla una aplicación de software o dispositivo de hardware. Por lo tanto, es importante que la interfaz sea fácil de usar, intuitiva y eficiente. El proceso de desarrollo de la interfaz de usuario generalmente implica varias fases, como el diseño, la identificación de requisitos funcionales y de usuario, y la implementación. Es importante tener en cuenta que la interfaz de usuario debe ser atractiva visualmente, clara y concisa para evitar errores o confusiones al momento de interactuar con el software. Además, la interfaz de usuario debe ser personalizable para permitir que la aplicación ofrezca contenido relevante y se adapte a las preferencias del usuario (Domínguez Aguirre, 2016).

Una base de datos para el inicio de sesión en una aplicación es crucial por varias razones. En primer lugar, una base de datos permite almacenar y proteger la información de inicio de sesión de los usuarios, como contraseñas y nombres de usuario, de manera segura. Esto evita que los datos se pierdan o se compartan con terceros no autorizados. En segundo lugar, con una base de datos, los usuarios pueden iniciar sesión rápidamente en la aplicación sin tener que ingresar sus credenciales cada vez. Esto ahorra tiempo y mejora la experiencia del usuario. En tercer lugar, una base de datos puede almacenar información adicional sobre los usuarios, como sus preferencias y configuraciones. Esto permite que la aplicación personalice la experiencia del usuario y ofrezca contenido relevante (CISC, 2009).

En conclusión, el desarrollo de la interfaz para el ingreso de datos en una aplicación es un proceso importante que puede afectar la experiencia del usuario y la eficiencia de la aplicación. Es importante que la interfaz sea fácil de usar, intuitiva y eficiente. Además, una base de datos para

el inicio de sesión en una aplicación es crucial para garantizar la seguridad de los datos de los usuarios, mejorar la eficiencia y personalizar la experiencia del usuario.

The screenshot shows the RunWay application window with the following sections:

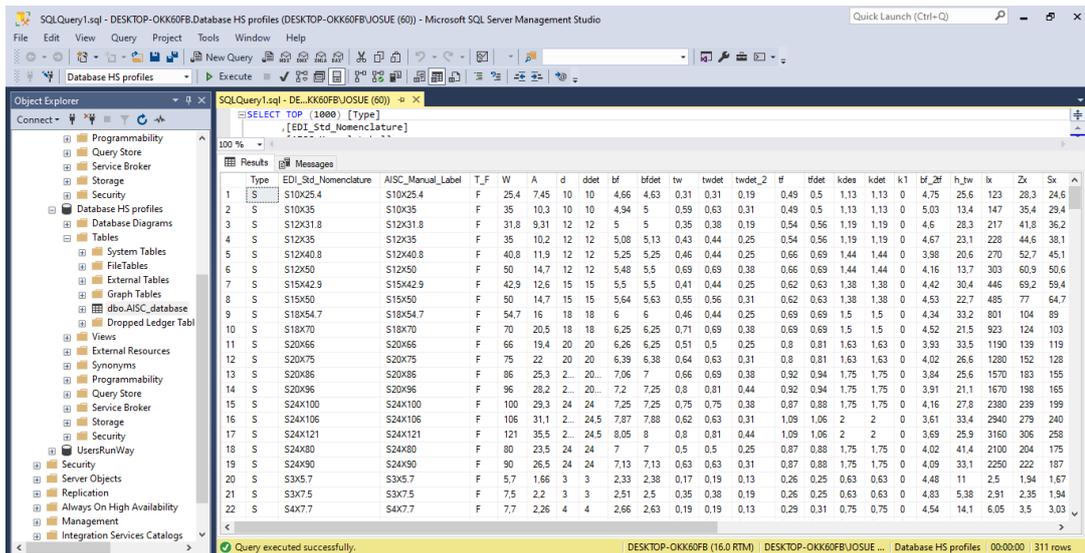
- Datos de entrada:** A list of input fields for beam parameters:
  - Capacidad Nominal: Wrc = [ ] Ton (US)
  - Peso de Viga Principal: Wbr = [ ] [kips]
  - Peso de Carro y Polipasto: Wth = [ ] [kips]
  - Espacio de Rueda en Viga Principal: d1 = [ ] [ft]
  - Capacidad Máxima de Ruedas: Pmax = [ ] [ft]
  - Luz: Sr = [ ] [ft]
  - Distancia lateral mínima gancho (I): SL = [ ] [ft]
  - Distancia lateral mínima gancho (D): SR = [ ] [ft]
  - Distancia entre Columna y Viga: e = [ ] [ft]
  - Separación entre columnas: L1 = [ ] [ft]
  - Distancia entre centros de Columna: Sr+2e = [ ] [ft]
- Viga Carrilera Principal:** Two dropdown menus for "Tipo de sección" and "Dimensión".
- Perfil de Riel:** A diagram of an I-beam with labels label54 (flange width), label53 (web thickness), and label55 (web height). Below it are input fields:
  - Tipo de sección: [ ]
  - Dimensión: [ ]
  - Ancho de riel: Bw = label57 [in]
  - Límite elástico: fWy = [ ] [ksi]
  - Servicio de clase según CMAA: [ ]
  - Factor de impacto de carga vertical: [ ]
  - Tipo de carga de empuje lateral: [ ]
- Buttons: "Cargar Datos" and "Calcular".

**Ilustración 3-3:** Diseño de la interfaz para el ingreso de dato de la aplicación RunWay

**Realizado por:** Logroño C., 2024

Para el ingreso de datos en los apartados de la viga y del tipo de riel, se optó por agregar una base de datos para trabajar con perfiles disponibles en el mercado, y obtener sus propiedades.

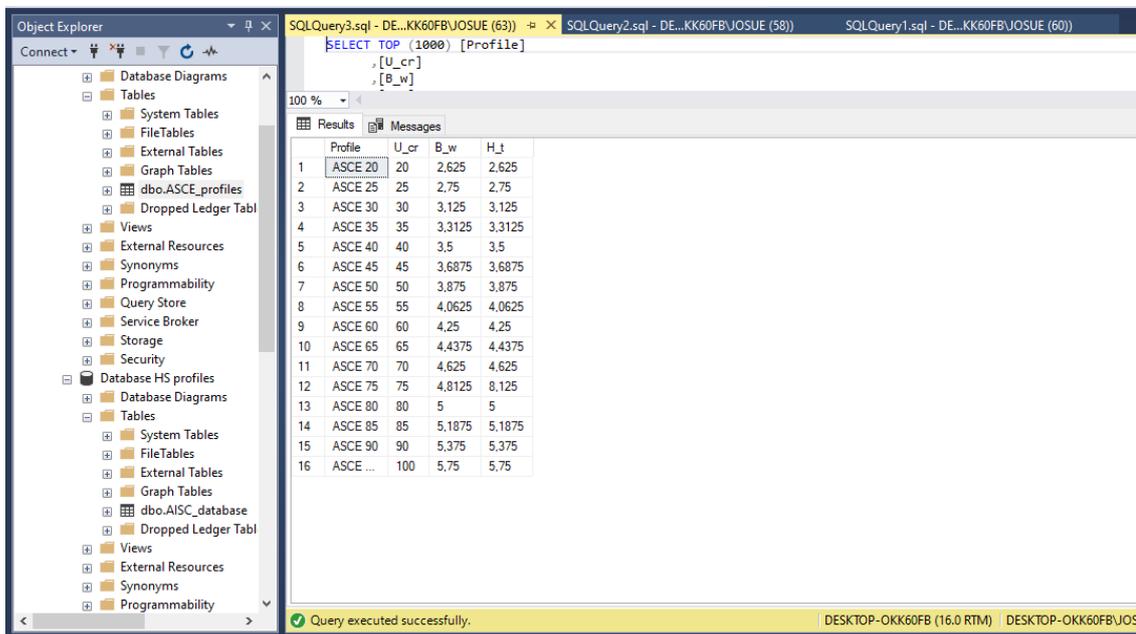
En el caso de la viga se requieren sus propiedades geométricas, para ellos se desarrolló una base de datos en SQL Server:



**Ilustración 3-4:** Propiedades geométricas de los perfiles para la viga

Realizado por: Logroño C., 2024

Para los perfiles ASCE también se generó una base de datos en los que incluyen primordialmente el peso por longitud del perfil, su alto y ancho como se muestra a continuación:



**Ilustración 3-5:** Propiedades geométricas de los perfiles para el riel

Realizado por: Logroño C., 2024

### 3.3.3. *Diseño de la interfaz de resultados*

Para el diseño de la interfaz de resultados es importante reconocer que resultados son fundamentales para el usuario para la comprensión del desarrollo de la memoria de cálculo. En el caso de ser muchos resultados en los que el usuario debe fijarse para la comprobación del

desarrollo, se debe dividir en varias secciones para mejorar de manera visual la experiencia con los usuarios.

Para el presente trabajo se dividió en las siguientes secciones:

#### *3.3.3.1. Resultado de cargas*

En esta sección se explorarán los diferentes tipos de carga a los que está sometido el puente grúa y afectan directamente al diseño de la viga y el riel. Como, por ejemplo:

- Cargas puntuales aplicadas en la viga principal
- Esfuerzos máximos en los miembros para el cálculo de vigas de pista de grúa
- Carga de grúa impuesta a las columnas

#### *3.3.3.2. Resultado para el diseño de la viga y riel*

Para esta sección se necesita comprobar el diseño mediante un criterio de rigidez, es decir, la deflexión en los siguientes aspectos de los elementos del equipo:

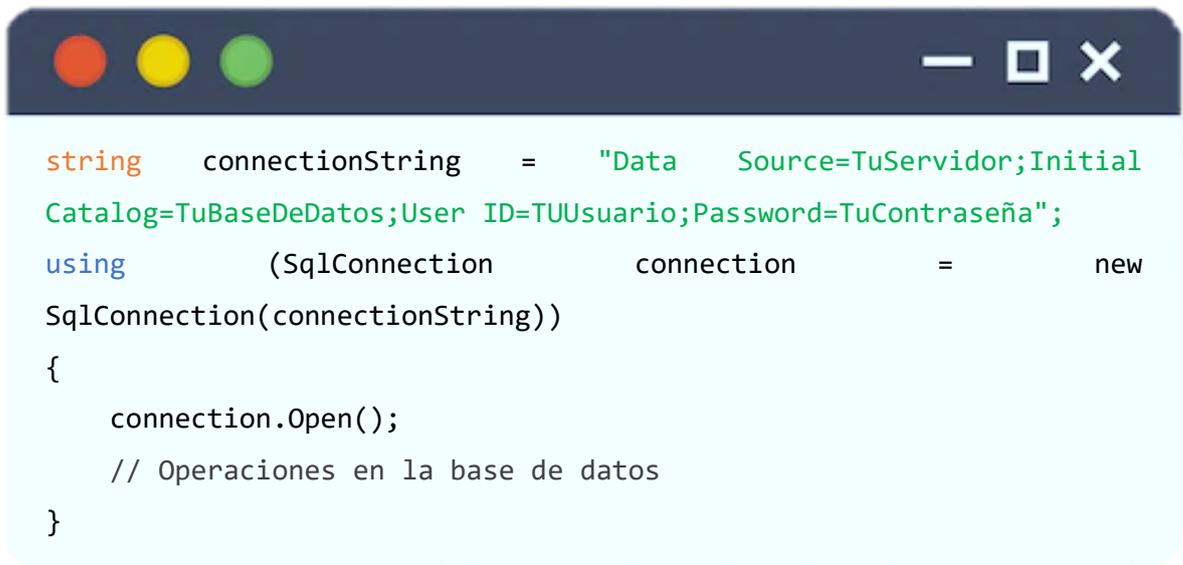
- Pandeo local
- Deflexión en el eje xx
- Deflexión en el eje yy
- Deflexión en el ala y alma
- Deflexión en el riel del puente grúa

### **3.4. Lectura y escritura de base de datos mediante SQL Server**

La lectura y escritura de bases de datos mediante SQL Server es una habilidad fundamental en el desarrollo de software orientado a bases de datos relacionales. SQL Server, desarrollado por Microsoft, es una plataforma robusta que facilita la gestión de datos de manera eficiente. A continuación, se abordan los aspectos clave relacionados con la interacción con bases de datos a través de SQL Server.

#### *3.4.1. Conexión a la Base de Datos*

La primera fase en el proceso de lectura y escritura de datos implica establecer una conexión con la base de datos SQL Server. Utilizando tecnologías como ADO.NET en C#, se pueden emplear objetos como SqlConnection para establecer y gestionar conexiones seguras y eficientes.



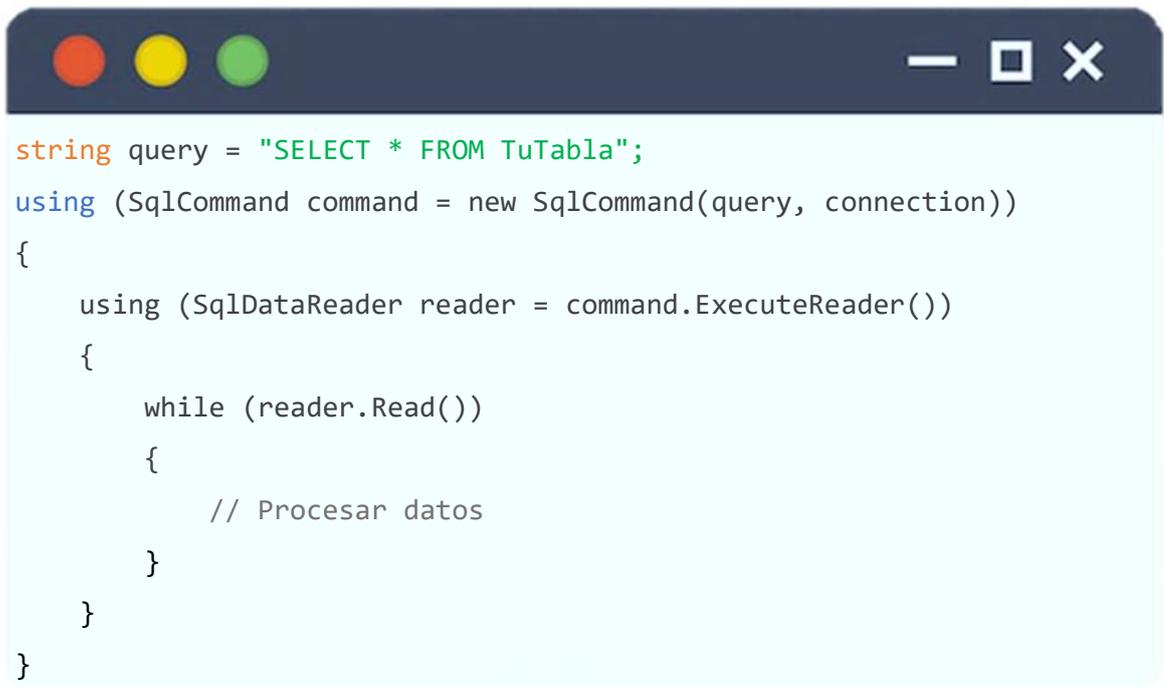
```
string connectionString = "Data Source=TuServidor;Initial
Catalog=TuBaseDeDatos;User ID=TUUsuario;Password=TuContraseña";
using (SqlConnection connection = new
SqlConnection(connectionString))
{
    connection.Open();
    // Operaciones en la base de datos
}
```

**Ilustración 3-6:** Pseudocódigo de conexión a la base de datos.

Realizado por: Logroño C., 2024

### 3.4.2. Consultas SQL

Las consultas SQL son esenciales para recuperar datos de la base de datos. Se pueden utilizar comandos SQL, como SELECT, para obtener información específica.



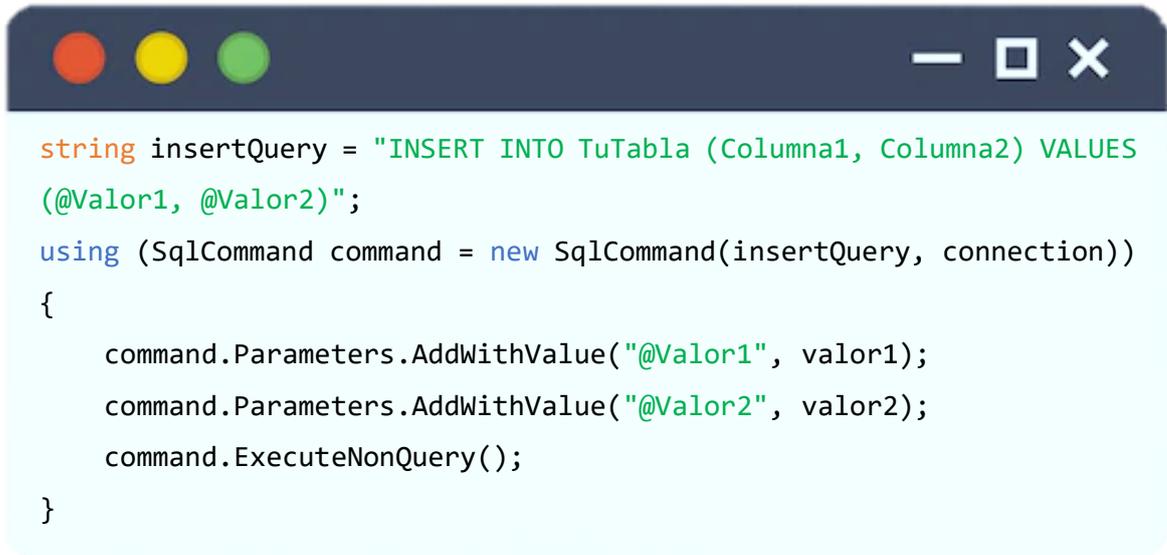
```
string query = "SELECT * FROM TuTabla";
using (SqlCommand command = new SqlCommand(query, connection))
{
    using (SqlDataReader reader = command.ExecuteReader())
    {
        while (reader.Read())
        {
            // Procesar datos
        }
    }
}
```

**Ilustración 3-7:** Pseudocódigo de consulta con la base de datos

Realizado por: Logroño C., 2024

### 3.4.3. *Inserción y Actualización de Datos*

Para la escritura de datos, se emplean instrucciones SQL como INSERT o UPDATE. Se utilizan parámetros para prevenir ataques de inyección SQL y mejorar la seguridad.



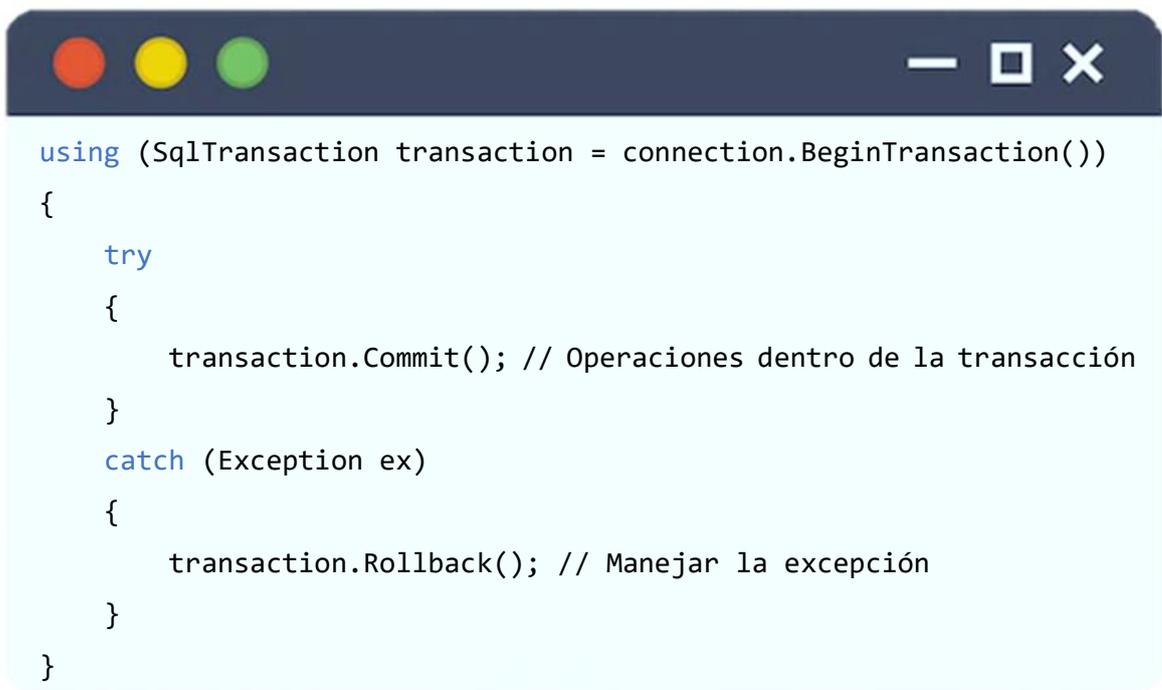
```
string insertQuery = "INSERT INTO TuTabla (Columna1, Columna2) VALUES
(@Valor1, @Valor2)";
using (SqlCommand command = new SqlCommand(insertQuery, connection))
{
    command.Parameters.AddWithValue("@Valor1", valor1);
    command.Parameters.AddWithValue("@Valor2", valor2);
    command.ExecuteNonQuery();
}
```

**Ilustración 3-8:** Pseudocódigo de inserción y actualización de Datos

Realizado por: Logroño C., 2024

### 3.4.4. *Transacciones*

Las transacciones aseguran la integridad de la base de datos al agrupar operaciones en una unidad atómica. Si una operación falla, se revierten todas las operaciones.

A screenshot of a code editor window with a dark blue title bar containing three colored window control buttons (red, yellow, green) and standard minimize, maximize, and close icons. The code is displayed on a light blue background. The code is a C# snippet for managing a database transaction. It starts with a `using` statement for `SqlConnection transaction = connection.BeginTransaction()`. Inside a curly brace, there is a `try` block containing `transaction.Commit(); // Operaciones dentro de la transacción`. This is followed by a `catch (Exception ex)` block containing `transaction.Rollback(); // Manejar la excepción`. The code ends with a closing curly brace for the `using` block.

```
using (SqlConnection transaction = connection.BeginTransaction())
{
    try
    {
        transaction.Commit(); // Operaciones dentro de la transacción
    }
    catch (Exception ex)
    {
        transaction.Rollback(); // Manejar la excepción
    }
}
```

**Ilustración 3-9:** Pseudocódigo de transacciones con la base de datos

Realizado por: Logroño C., 2024

### 3.4.5. Cierre de conexiones

Es crucial cerrar las conexiones después de su uso para liberar recursos, para esto se emplea el comando `connection.Close()`.

La lectura y escritura de bases de datos mediante SQL Server en C# implica establecer conexiones seguras, ejecutar consultas SQL para recuperar o manipular datos, y cerrar conexiones de manera adecuada. El manejo apropiado de transacciones y la implementación segura de consultas son prácticas esenciales para garantizar la integridad y seguridad de la base de datos (Dereje y et al., 2003).

## 3.5. Diseño de la arquitectura interna (Back End)

El diseño del “back end” se refiere al procesamiento de datos, lógica de conexiones y comunicación con la base de datos. Podemos encontrar varios puntos clave como:

### 3.5.1. Gestión de inicio de sesión y registros de usuarios

Para cualquier programa que implique que el usuario tenga interacción directa con una interfaz, es recomendable tener una ventana previa de registro e inicio de sesión, para esto necesitamos preestablecer varios aspectos.

#### 3.5.1.1. Interfaz de inicio de sesión

Creamos un formulario (**LoginForm**) con dos etiquetas (labels) para el nombre de usuario y la contraseña, dos cuadros de texto (text boxes) para que el usuario ingrese su nombre de usuario y contraseña, y dos botones, uno para iniciar sesión y otro para registrarse.



**Ilustración 3-10:** Interfaz de inicio de sesión

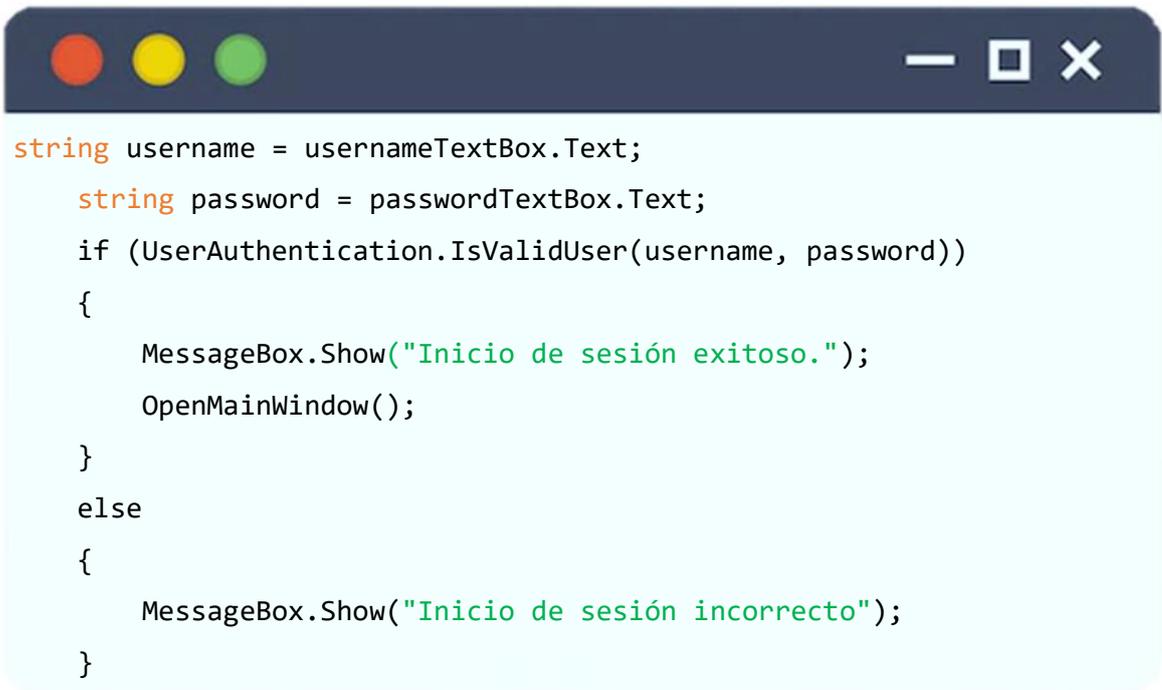
**Realizado por:** Logroño C., 2024

### 3.5.1.2. Creación de base de Datos para Usuarios Registrados

Diseñamos una base de datos que almacene la información de los usuarios. Es decir, tener una tabla llamada *Users* con columnas para el nombre de usuario, contraseña y cualquier otra información adicional que deseamos recopilar de ser necesario.

### 3.5.1.3. Implementación de la lógica de inicio de sesión

- En el evento de clic del botón "Iniciar sesión" en LoginForm, verifica si el nombre de usuario y la contraseña ingresados coinciden con los registros en la base de datos.
- Si la autenticación es exitosa, permite el acceso a la aplicación principal.
- Si la autenticación falla, muestra un mensaje de error.

A screenshot of a code editor window with a dark blue title bar containing three colored window control buttons (red, yellow, green) and standard minimize, maximize, and close icons. The code is displayed on a light blue background. The code is as follows:

```
string username = usernameTextBox.Text;
string password = passwordTextBox.Text;
if (UserAuthentication.IsValidUser(username, password))
{
    MessageBox.Show("Inicio de sesión exitoso.");
    OpenMainWindow();
}
else
{
    MessageBox.Show("Inicio de sesión incorrecto");
}
```

**Ilustración 3-11:** Lógica de inicio de sesión

Realizado por: Logroño C., 2024

*3.5.1.4. Implementación de la lógica de registro*

- En el evento de clic del botón "Registrarse" en LoginForm, abre un nuevo formulario de registro (RegistrationForm).
- En RegistrationForm, permite que el usuario ingrese su información y valida los datos según sea necesario.
- Cuando el usuario complete el registro, guarda la información en la base de datos.



```
string username = newUserTextBox.Text,
string password = newPasswordTextBox.Text;
string email = emailTextBox.Text;
if (UserDataValidation.IsValid(username, password, email))
{
    UserDatabase.AddUser(username, password, email);
    MessageBox.Show("Registro exitoso");
    this.Close(); // Cerrar el formulario de registro
}
else
{
    MessageBox.Show("Datos ingresados no válidos.");
}
```

**Ilustración 3-12:**Lógica de registro de usuario

Realizado por: Logroño C., 2024

**3.5.2. *Procesamiento de datos de entrada***

El back end recibe datos de entrada proporcionados por el usuario a través de la interfaz de la aplicación. Estos datos son:

- Capacidad o carga a elevar del puente grúa
- Peso propio del puente grúa
- Peso del carro y polipasto
- Carga máxima permisible de las ruedas por el fabricante
- Luz de la viga principal del puente grúa
- Distancia o longitud entre apoyos entre columna y columna (claro)
- Distancia entre ruedas en el carro testero
- Distancia mínima del gancho por la derecha e izquierda
- Distancia entre el centro de las columnas y la viga principal
- Propiedades del perfil seleccionado para la viga carrilera
- Propiedades del riel seleccionado
- Límite a la fluencia que dependerá del tipo de acero
- Clase de servicio según la CMAA
- Factor de impacto para la carga vertical dependiendo del tipo de puente grúa

- Tipo de carga de empuje lateral

Una vez que se reciben los datos, el back end los procesa y los convierte en un formato que pueda ser utilizado por los algoritmos de cálculo estructural.

### **3.5.3. Validación de datos y cálculos estructurales**

Para poder realizar los cálculos estructurales respectivos, es necesario hacer una validación de todos los datos ingresados, el usuario debe haber ingresado o llenado todos los campos en la interfaz para que en los cálculos estructurales no haya ningún problema o error de cálculo.

El back end realiza una serie de cálculos con los datos de entrada del usuario para determinar varios parámetros estructurales. Esto incluye calcular las cargas y momentos máximos que la viga puede soportar y las deflexiones verticales y horizontales máximas permitidas. Estos cálculos se realizaron utilizando principios y fórmulas específicas de ingeniería estructural utilizando las normas CMAA No. 70 y 74, AISC 360-10 y la guía para el diseño de estructuras de acero para puentes grúa por la CISC.

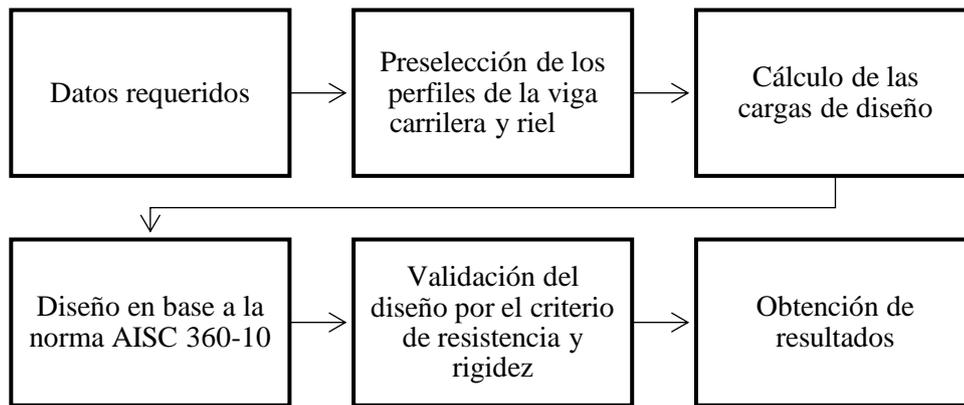
### **3.5.4. Conexión con la base de datos**

Es necesario conectar la base de datos con la aplicación para poder obtener los datos o las propiedades geométricas y las características mecánicas de los perfiles utilizados. Así mismo, la conexión con la base de datos permite almacenar los resultados obtenidos para su posterior visualización en la pestaña de resultados. Este punto se explicó de manera detallada en el punto 3.4.

### **3.5.5. Generación de resultados**

El programa produce los resultados del diseño de la viga después de completar los cálculos estructurales. Las dimensiones finales de la viga, las capacidades de carga, los esfuerzos máximos en los materiales y las deflexiones máximas permitidas son algunos de los parámetros relevantes que pueden incluirse en esto. Dependiendo de la naturaleza de la aplicación y las preferencias del usuario, los resultados se presentaron de manera clara y comprensible para el usuario en forma de texto y, gráficos (Brockenbrough y Merritt, 2011).

### 3.6. Proceso de diseño



**Ilustración 3-13:** Flujo del proceso de diseño según la CMAA

Realizado por: Logroño C., 2024

#### 3.6.1. Obtención de los datos de diseño

El diseño de las vigas carrileras de puentes grúa, siendo una pieza fundamental en la industria moderna, requieren un meticuloso proceso de diseño que integra una amplia gama de consideraciones técnicas, operativas y de seguridad. Desde los requisitos específicos del cliente hasta las normativas regulatorias y las condiciones ambientales, cada aspecto influye en la concepción y la implementación de estos sistemas de elevación y manipulación de carga (CMAA 74, 2020).

En primer lugar, el proceso de diseño comienza con una comprensión exhaustiva de los requisitos del cliente para el puente grúa. Esto implica un diálogo detallado para determinar las necesidades de capacidad de carga, alcance, velocidad de desplazamiento y cualquier otro factor único para el proyecto en cuestión. Esta fase inicial establece las bases sobre las cuales se construirá el diseño del puente grúa, asegurando que cumpla con las expectativas y funcionalidades deseadas por el cliente.

Una vez que se han establecido los requisitos del cliente, es esencial evaluar las características del lugar donde se instalará el puente grúa. El espacio disponible, la altura libre, la disposición de las columnas de soporte y cualquier obstrucción potencial son consideraciones críticas que deben tenerse en cuenta para garantizar una instalación adecuada y un funcionamiento sin problemas. Esta evaluación del entorno físico proporciona información vital para determinar el diseño óptimo del puente grúa en términos de dimensiones y configuración.

##### 3.6.1.1. Datos

Dentro de los datos, es necesario conocer la nomenclatura se usó a lo largo de todo el trabajo.

- Capacidad o carga a elevar del puente grúa:  $W_{rc}$
- Peso propio del puente grúa:  $W_{br}$

- Peso del carro y polipasto:  $W_{th}$
- Carga máxima permisible de las ruedas por el fabricante:  $P_{max-v}$
- Luz de la viga principal del puente grúa:  $S_r$
- Distancia o longitud entre apoyos entre columna y columna (claro):  $L_1$
- Distancia entre ruedas en el carro testero:  $d_1$
- Distancia mínima del gancho por la derecha e izquierda:  $S_L$  y  $S_R$
- Distancia entre el centro de las columnas y la viga principal:  $e$
- Propiedades del perfil seleccionado para la viga carrilera (Peso lineal):  $U_{cr}$
- Propiedades del riel seleccionado:  $U_{rb}$
- Límite a la fluencia que dependerá del tipo de acero:  $F_{wy}$
- Factor de impacto para la carga vertical dependiendo del tipo de puente grúa;  $\alpha$
- Tipo de carga de empuje lateral:  $H_s$

### 3.6.1.2. Cargas de trabajo

Una vez con dichos requerimientos los datos requeridos para el diseño de puentes grúa, el siguiente paso es la determinación de las cargas de trabajo es otro aspecto fundamental del proceso de diseño. La naturaleza de las cargas que se manipularán, ya sean materiales a granel, contenedores o maquinaria pesada, influirá en la capacidad de carga requerida del puente grúa. Mediante cálculos precisos y análisis de carga, los ingenieros pueden dimensionar adecuadamente el puente grúa para garantizar su capacidad de manejo de carga durante toda su vida útil.

Así mismo estas cargas son las que nos ayudarán a poder diseñar las vigas carrileras, las principales cargas que se necesita para su diseño son:

$W_{rc}$ : Capacidad del puente grúa

$W_{br}$ : Peso propio del puente grúa

$W_{th}$ : Peso del carro y polipasto del puente grúa

$R_{sw}$ : Peso propio en conjunto de la viga y el riel

$P_{br}$ : Carga soportada por cada rueda debido a la carga elevada por el puente grúa

### 3.6.1.3. Seguridad y ergonomía del puente grúa

La seguridad es un aspecto que no puede pasarse por alto en el diseño de puentes grúa. La evaluación de riesgos y la implementación de medidas de seguridad adecuadas son elementos críticos del proceso de diseño. Dispositivos de limitación de sobrecarga, sistemas de frenado de emergencia, protecciones contra colisiones y otras características de seguridad son incorporadas para minimizar los riesgos asociados con la operación del puente grúa, protegiendo tanto a los operadores como a la carga manipulada.

Finalmente, el diseño del puente grúa también debe tener en cuenta diversos factores ambientales. Desde temperaturas extremas hasta condiciones de corrosión, el entorno en el que operará el

puede tener un impacto significativo en su rendimiento y durabilidad a lo largo del tiempo. Es crucial seleccionar materiales adecuados y aplicar técnicas de protección para garantizar que el puente grúa pueda funcionar de manera efectiva en su entorno operativo.

#### 3.6.1.4. Clase de servicio del puente grúa

La Clase de Servicio, definida por las normas CMAA No. 70 y 74 (Crane Manufacturers Association of America), es un estándar que clasifica y describe las condiciones de funcionamiento para las que están diseñadas y construidas las grúas industriales. La CMAA No. 70 y 74 han establecido varias clases de servicio en sus apartados, cada una diseñada para satisfacer diferentes niveles de demanda y uso.

**Tabla 3-1:** Clases de servicio los puentes grúa según la CMAA

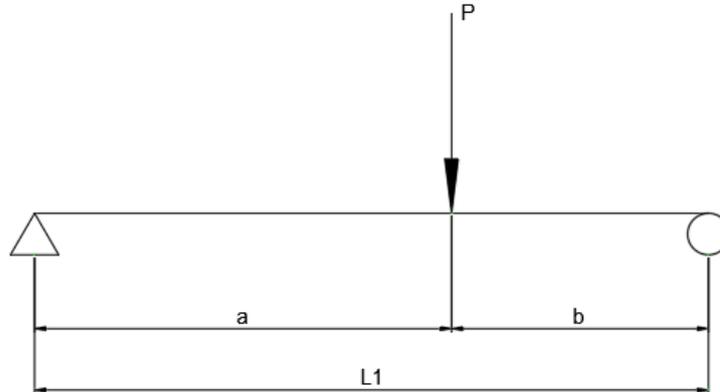
Clases de servicio según la CMAA		
Clase	Servicio	Observaciones
A	Poco frecuente	Utilizada para aplicaciones en las que la grúa se utiliza ocasionalmente, generalmente menos del 15% del tiempo de trabajo con cargas inferiores al 50% de la capacidad nominal.
B	Liviano	Adecuada para aplicaciones en las que la grúa se utiliza con más frecuencia que en la Clase A, generalmente hasta el 30% del tiempo de trabajo con cargas inferiores al 65% de la capacidad nominal.
C	Moderado	Diseñada para aplicaciones en las que la grúa se utiliza con frecuencia, generalmente hasta el 50% del tiempo de trabajo con cargas inferiores al 80% de la capacidad nominal.
D	Pesado	Adecuada para aplicaciones en las que la grúa se utiliza de manera constante, generalmente hasta el 65% del tiempo de trabajo con cargas cercanas a la capacidad nominal.
E	Severo	Diseñada para aplicaciones en las que la grúa se utiliza continuamente, generalmente hasta el 95% del tiempo de trabajo con cargas cercanas a la capacidad nominal.
F	Severo continuo	Este tipo de servicio requiere una grúa capaz de manipular cargas cercanas a la capacidad nominal de forma continua en condiciones de servicio severas durante toda su vida útil.

Realizado por: Logroño, 2024

### 3.6.2. Preselección de la viga carrilera y el riel

#### 3.6.2.1. Preselección de la viga carrilera

Para obtener un perfil de manera correcta, es muy importante escoger una viga que satisfaga las necesidades de nuestro diseño. Aunque se podría realizar varias iteraciones hasta encontrar el perfil adecuado, esto llevaría a cabo mucho tiempo. Por ello antes de realizar el diseño en base a resistencia y rigidez, se debe preseleccionar un perfil para la viga carrilera en base a su inercia.



**Ilustración 3-14:** Viga simple con carga en cualquier punto

Realizado por: Logroño, 2024

$$\delta_{max} = \frac{Pb(3L^2 - 4b^2)}{48EI}$$

En función para escoger la inercia máxima requerida se necesita obtener la carga máxima de trabajo que pueda afectar a nuestra viga. En este caso tenemos 2 opciones, solo con la carga muerta tomando solo el peso a elevar  $W_{rc}$  y con la carga de servicio, siendo la suma de la carga muerta, es decir la carga a elevar y la carga viva, el peso propio del puente grúa con el peso del carro y polipasto.

- Opción 1

$$\begin{aligned} P &= L_L \\ P &= W_{rc} \\ \delta &= \frac{L}{400} \\ \delta &= \frac{Pb(3L^2 - 4b^2)}{48EI_{requerida}} \\ I_{requerida} &= \frac{Pb(3L^2 - 4b^2)}{48E\delta} \end{aligned}$$

- Opción 2

La deformación para este caso dependerá de la clase de servicio en la que se disponga nuestro puente grúa por la CMAA, este valor para deflexiones se observa en el punto

3.7.5. en la tabla correspondiente a las deflexiones verticales permisibles por la clase de servicio de la CMAA.

$$P = D_L + L_L$$

$$P = (W_{br} + W_{th}) + (W_{rc})$$

$\delta \rightarrow$  Clase de servicio CMAA

$$\delta = \frac{Pb(3L^2 - 4b^2)}{48EI_{requerida}}$$

$$I_{requerida} = \frac{Pb(3L^2 - 4b^2)}{48E\delta}$$

### 3.6.2.2. Preselección del riel

Más de cien tipos diferentes de raíles o rieles están disponibles para las grúas. En algunos casos, es necesario recomendar o confirmar un raíl o riel. Lamentablemente, las normas nacionales e internacionales sobre la selección de raíles de grúa no siempre son claras. Esto se debe a que, en la mayoría de los casos, cuando se planifique la instalación de un riel, es necesario tener conocimientos de los que quizás no tenga acceso. A continuación, se preseleccionará de manera sencilla el tipo de riel que se debe utilizar.

El método más sencillo para calcular la anchura de la cabeza del raíl es permitir una anchura de cabeza de 2,5 mm por tonelada para la carga vertical de las ruedas de las grúas de gran tonelaje. Para las grúas de impacto ligero, se puede permitir 1,7 mm por cada tonelada. De manera más conservadora se puede utilizar la siguiente fórmula, para determinar la altura de la cabeza del riel en puentes grúa de servicio pesado:

$$H = \frac{1580 * W}{D}$$

$W$ : Carga a elevar

$D$ : Diámetro de las ruedas para el carro testero

$H$ : Altura de la cabeza del riel

### 3.6.3. Cálculo de las cargas de diseño

#### 3.6.3.1. Carga de empuje lateral

La tolerancia de carga dinámica, también conocida como impacto, solo se aplica a las cargas verticales de las ruedas de las grúas y solo se considera en el diseño de las vigas de la pista y sus conexiones. El impacto se considera una carga viva. Dado que se enfoca en el diseño de edificios de molinos, el informe no 13 de AISE recomienda que el impacto se incluya en el diseño por fatiga. Se considera conservador para la mayoría de las aplicaciones.

En ciertas aplicaciones, como la elevación de compuertas hidráulicas, la carga elevada puede llegar a bloquearse y la tracción de la línea puede acercarse al límite de carga si no hay dispositivos

limitadores de carga de carga, la tracción de la línea puede ser de dos a tres veces la capacidad nominal de elevación de la grúa, aproximadamente el par de bloqueo del motor de la grúa. El diseñador de la estructura debe estar al tanto de esta posibilidad.

La tabla 3-1 muestra los porcentajes utilizados para considerar el factor de carga vertical dependiendo del tipo de grúa que se emplee, de igual forma encontramos el porcentaje de las cargas de empuje lateral y de tracción utilizados para el diseño. Los valores más importantes corresponden a los puentes grúa operados por cabina y por control colgante.

**Tabla 3-2:** Porcentajes para la carga vertical, carga de empuje lateral y carga de tracción.

Tipo de puente grúa	Carga vertical	Carga de empuje lateral			Carga de tracción
	Máxima carga de la rueda	Carga elevada	Carga elevada + carro y polipasto	Carga elevada + Peso propio del puente grúa	Carga máxima en ruedas motrices
Grúas operadas por cabina	125%	40%	20%	10%	20%
Grúas de cuchara bivalva e imán	125%	100%	20%	10%	20%
Grúas de brazo guiado o grúas apiladoras	125%	200%	40%	15%	20%
Grúas en mantenimiento	120%	30%	20%	10%	20%
Grúas con control suspendido	110%		20%	10%	20%
Grúas de cadena	105%		10%		10%
Monorrieles	115%		10%		10%

Fuente: CISC, 2009

En la tabla 3-1 se puede observar los tipos de carga lateral que existen dependiendo del tipo de puente grúa el cuál se esté diseñando. Sin embargo, se ha realizado un esquema mucho más detallado para poder utilizarlo en el programa, obteniendo así la carga de empuje lateral

denominada  $H_s$ , como se muestra a continuación. Se ha obtenido las 5 opciones más importantes para la obtención de la carga de empuje lateral.

**Tabla 3-3:** Combinaciones de carga para la carga de empuje lateral

Opción	Combinación de cargas para el empuje lateral	
1	$0.2 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ carro)$	$0.2 * (W_{rc} + W_{th})$
2	$0.2 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ carro)$	$0.2 * (W_{rc} + W_{th})$
	$0.1 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ puente\ grúa)$	$0.1 * (W_{rc} + W_{br})$
3	$0.2 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ carro)$	$0.2 * (W_{rc} + W_{th})$
	$0.1 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ puente\ grúa)$	$0.1 * (W_{rc} + W_{th})$
	$0.4 * Carga\ elevada$	$0.4 * (W_{rc})$
4	$1.0 * Carga\ elevada$	$1.0 * (W_{rc})$
5	$2.0 * Carga\ elevada$	$2.0 * (W_{rc})$

Realizado por: Logroño, 2024

Una vez identificado el tipo de carga de empuje lateral que coincide con nuestro puente grúa, se debe escoger la combinación de carga que dé como resultado el mayor valor para nuestra carga de empuje lateral.

Finalmente, para poder obtener la carga de empuje lateral que soporta cada rueda se debe dividir la carga de empuje lateral máxima obtenida entre el número de ruedas totales:

$$H_{st} = \frac{H_s}{N^\circ\ ruedas_T}$$

### 3.6.3.2. Carga vertical

La carga máxima soportada por cada rueda es un dato del fabricante, pero también se calculó la misma. Así, se obtuvo el mayor valor entre ambos:

$$S_{min} = \min(S_L; S_R)$$

$$P_{max-c} = \frac{(W_{rc} + W_{th})(S_r - S_{min})}{N^\circ\ ruedas\ por\ lado * S_r} + P_{br}$$

Luego se obtuvo el valor máximo con el valor de la carga máxima soportada por cada rueda por el fabricante:

$$P_{max} = \max(P_{max-v}; P_{mac-c})$$

Así también se puede calcular la carga mínima a la que van a estar sometidas las ruedas:

$$P_{min-c} = \frac{(W_{rc} + W_{th})(S_{min})}{N^\circ\ ruedas\ por\ lado * S_r} + P_{br}$$

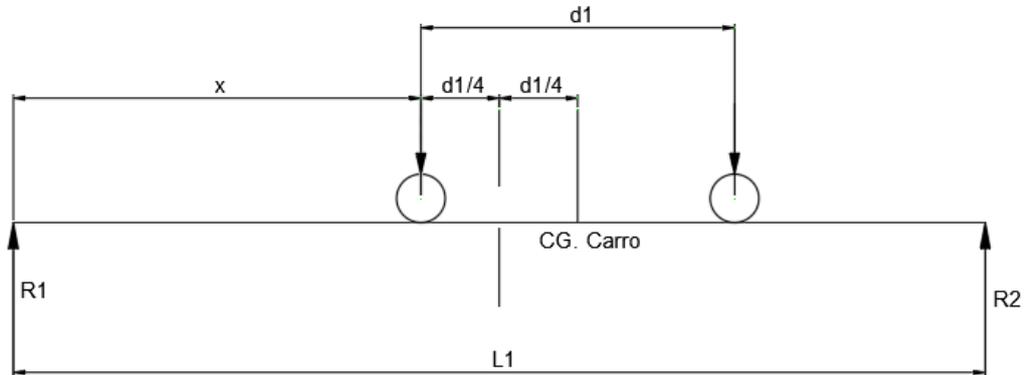
### 3.6.3.3. Carga de tracción

La carga de tracción se obtiene a partir del 20% de la carga máxima obtenida en el apartado anterior

$$H_{tr} = 0.2 P_{max}$$

### 3.6.3.4. Momento máximo producido

El momento máximo producido se lo puede hallar dependiendo de si se analiza para 2 o 4 ruedas. Para dos ruedas se encuentra a una distancia de la mitad de la longitud de la viga quitándole un cuarto de la distancia que existe entre ruedas.



**Ilustración 3-15:** Distancia a la que se produce el momento máximo con 2 ruedas

Realizado por: Logroño, 2024

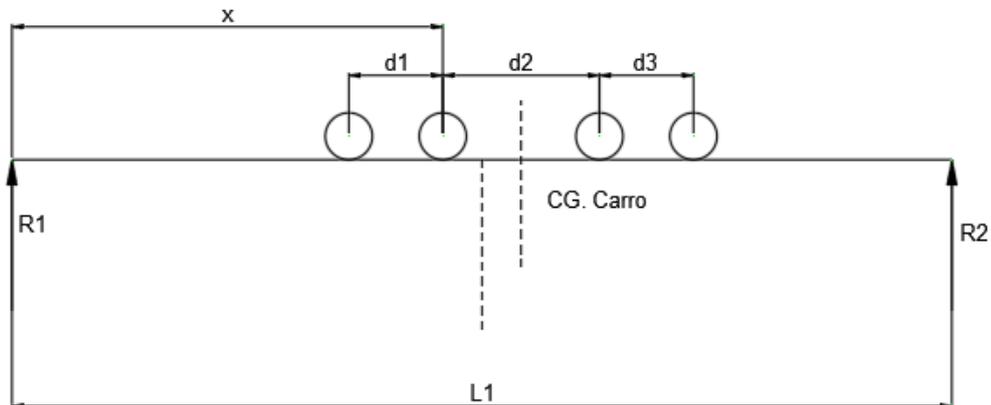
La distancia \$x\$ entonces se encuentra de la siguiente manera:

$$x = \frac{1}{2} \left( L_1 - \frac{d_1}{4} \right)$$

Así entonces el momento máximo o crítico que se obtiene es el siguiente

$$M_{max} = \frac{\sum P_{max} x(L - x)}{L}$$

Para cuatro ruedas se encuentra a una distancia de la mitad de la longitud de la viga quitándole un cuarto de la distancia que existe entre ruedas.



**Ilustración 3-16:** Distancia a la que se produce el momento máximo con 2 ruedas

Realizado por: Logroño, 2024

La distancia \$x\$ entonces se encuentra de la siguiente manera:

$$x = \frac{1}{2} \left( L_1 - \frac{d_2}{2} \right)$$

Así entonces el momento máximo o crítico que se obtiene es el siguiente

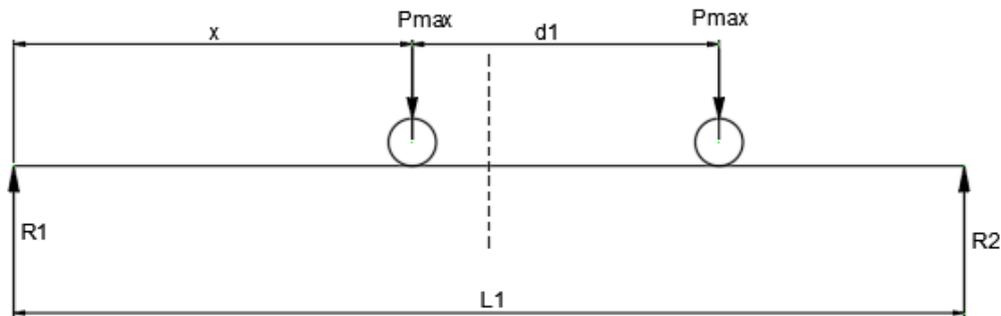
$$M_{max} = \frac{\sum P_{max} x(L - x)}{L}$$

También se debe calcular el momento producido por el peso propio del riel y de la viga

$$M_{sw} = (U_{rb} + U_{cr}) \frac{L_1^2}{8}$$

### 3.6.3.5. Cortante máximo producido

El cortante máximo se produce cuando la primera rueda del carro está encima del primer soporte, de tal manera que para poder calcular el cortante máximo cuando tenemos dos ruedas:



**Ilustración 3-17:** Corte máximo producido

Realizado por: Logroño, 2024

$$\sum M_2 = 0$$

$$R_1 L_1 = P_{max}(L_1 - x) + P_{max}(L_1 - x - d_1)$$

$$R_1 = \frac{P_{max}(L_1 - x) + P_{max}(L_1 - x - d_1)}{L}$$

El cortante máximo se produce cuando x tiende a cero, entonces:

$$R_{1max} = V_{max}$$

$$V_{max} = \frac{P_{max}(2L_1 - d_1)}{L}$$

Para obtener el cortante máximo cuando se dispone de 4 ruedas se puede hacer el mismo análisis, obteniendo así:

$$V_{max} = \frac{P_{max}(4L_1 - 3d_1 - 2d_2 - d_1)}{L}$$

### 3.6.3.6. Cargas de diseño utilizadas para el diseño por la AISC (momentos y cortante)

Primero se debe obtener las cargas verticales y horizontales factorizadas:

$$P_{vf} = 1.2P_{br} + 1.6 \alpha P_{lt}$$

$$P_{hf} = 1.6 \left( \frac{0.2(W_{rc} + W_{th})}{4} \right)$$

Aquí se debe obtener el momento en x ( $M_x$ ), momento en y ( $M_y$ ) y el cortante en y ( $V_y$ ).

$$M_x = \frac{M_{max} P_{vf}}{P_{max}} + 1.2 M_{sw}$$

$$M_y = M_{max} \frac{P_{hf}}{P_{max}}$$

$$V_y = V_{cr} \frac{P_{vf}}{P_{max}} + 1.2 V_{sw}$$

### 3.6.3.7. Carga vertical impuesta a la columna

Aquí se deben hallar las reacciones  $R_1$  y  $R_2$  que se aplican sobre la columna. Ambos son la suma de las reacciones cuando el carro está en el extremo del primer apoyo y la reacción producida por el peso del riel y la viga.

$$R_{cr-c} = V_{cr}$$

$$R_{sw} = \frac{1}{2} (U_{rb} + U_{cr})(2L_1)$$

$$R_1 = R_{cr-c} + R_{sw}$$

$$R_{cr-f} = R_{cr-c} * \frac{P_{min}}{P_{max}}$$

$$R_2 = R_{cr-f} + R_{sw}$$

### 3.6.3.8. Carga de empuje impuesta a la columna

Una carga de empuje lateral en puentes grúas se refiere a la fuerza lateral ejercida sobre la estructura de la grúa cuando está sometida a cargas horizontales, normalmente debido a factores como el viento, una carga desigual o el movimiento de la grúa. Esta fuerza lateral puede hacer que la grúa se balancee o se desplace lateralmente, afectando potencialmente a su estabilidad y a su funcionamiento seguro.

Las grúas se diseñan principalmente para soportar cargas verticales, pero también deben ser capaces de resistir cargas de empuje lateral para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente. Los ingenieros tienen en cuenta las cargas de empuje lateral durante la fase de diseño para determinar la integridad estructural de la grúa e incorporar elementos como arriostramientos, contrapesos y sistemas de anclaje para mitigar los efectos de las fuerzas laterales.

$$S_{tl} = R_{cr-c} * \frac{H_{st}}{P_{max}}$$

### 3.6.3.9. Carga de tracción impuesta a la columna

Se refiere a la fuerza externa aplicada a la columna en la dirección opuesta a su eje longitudinal, es decir, una fuerza que tiende a deformar o alargar la columna.

$$T_l = R_{cr-c} * \frac{H_{tr}}{P_{max}}$$

#### **3.6.4. Diseño en base a la norma AISC 360-10**

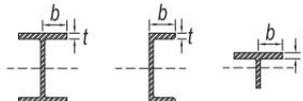
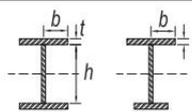
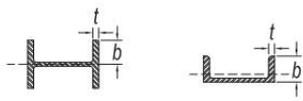
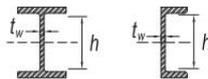
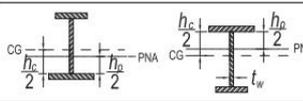
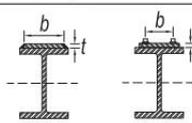
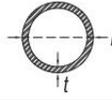
El diseño en base a la norma AISC 360-10 aborda todos los aspectos del diseño de estructuras de acero, desde la resistencia y estabilidad estructural hasta la fabricación, la inspección y la calidad del material. Proporciona pautas claras y detalladas para cada etapa del proceso de diseño, lo que facilita la creación de estructuras seguras y eficientes.

También utiliza enfoques probados y bien establecidos para calcular la resistencia y el comportamiento de las estructuras de acero, lo que garantiza resultados confiables y consistentes. Gracias a la norma AISC 360-10 se pueden estudiar los perfiles sometidos a los diferentes esfuerzos tanto a tracción como a compresión y flexión. Siendo este último el fenómeno de interés para el estudio y diseño de las vigas carrileras.

##### *3.6.4.1. Diseño por flexión*

Corresponde a la sección F de la norma AISC 360-10, sin embargo, esta contiene varias subsecciones que dependerán de la clasificación del ala y alma del perfil; si estas son compactas (C), no compactas (NC) o esbeltas (E). En el caso de combinar dos perfiles, se debe realizar para el ala y alma de para cuantos perfiles se utilice.

**Tabla 3-4:** Caracterización del ala y alma para los diferentes perfiles

<b>TABLE B4.1b</b>						
<b>Width-to-Thickness Ratios: Compression Elements Members Subject to Flexure</b>						
Case	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio		Examples	
			$\lambda_p$ (compact/ noncompact)	$\lambda_r$ (noncompact/ slender)		
Unstiffened Elements	10	Flanges of rolled I-shaped sections, channels, and tees	$b/t$	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	11	Flanges of doubly and singly symmetric I-shaped built-up sections	$b/t$	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.95\sqrt{\frac{k_c E}{F_L}}$ [a] [b]	
	12	Legs of single angles	$b/t$	$0.54\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.91\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	13	Flanges of all I-shaped sections and channels in flexure about the weak axis	$b/t$	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	14	Stems of tees	$d/t$	$0.84\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.03\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Stiffened Elements	15	Webs of doubly-symmetric I-shaped sections and channels	$h/t_w$	$3.76\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	16	Webs of singly-symmetric I-shaped sections	$h_c/t_w$	$\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ [c] $\left(\frac{0.54 M_p}{M_y} - 0.09\right)^2 \leq \lambda_r$	$5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	17	Flanges of rectangular HSS and boxes of uniform thickness	$b/t$	$1.12\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	18	Flange cover plates and diaphragm plates between lines of fasteners or welds	$b/t$	$1.12\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	19	Webs of rectangular HSS and boxes	$h/t$	$2.42\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
20	Round HSS	$D/t$	$0.07\frac{E}{F_y}$	$0.31\frac{E}{F_y}$		

[a]  $k_c = 4/\sqrt{h/t_w}$  but shall not be taken less than 0.35 nor greater than 0.76 for calculation purposes.  
 [b]  $F_L = 0.7F_y$  for major axis bending of compact and noncompact web built-up I-shaped members with  $S_{xt}/S_{xc} \geq 0.7$ ;  
 $F_L = F_y S_{xt}/S_{xc} \geq 0.5F_y$  for major-axis bending of compact and noncompact web built-up I-shaped members with  $S_{xt}/S_{xc} < 0.7$ .  
 [c]  $M_y$  is the moment at yielding of the extreme fiber.  $M_p$  = plastic bending moment, kip-in. (N-mm)  
 $E$  = modulus of elasticity of steel = 29,000 ksi (200 000 MPa)  
 $F_y$  = specified minimum yield stress, ksi (MPa)

Fuente: AISC 360, 2010

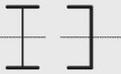
Para poder caracterizar el alma y ala del perfil debemos establecer los siguientes límites:

Si  $\lambda < \lambda_p$  entonces es compacta (C)

Si  $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$  entonces es no compacta (NC)

Si  $\lambda < \lambda_r$  entonces es esbelta (E)

**Tabla 3-5:** Sección utilizada en la AISC para el diseño por flexión

TABLE USER NOTE F1.1 Selection Table for the Application of Chapter F Sections				
Section in Chapter F	Cross Section	Flange Slenderness	Web Slenderness	Limit States
F2		C	C	Y, LTB
F3		NC, S	C	LTB, FLB
F4		C, NC, S	C, NC	Y, LTB, FLB, TFY
F5		C, NC, S	S	Y, LTB, FLB, TFY
F6		C, NC, S	N/A	Y, FLB
F7		C, NC, S	C, NC	Y, FLB, WLB
F8		N/A	N/A	Y, LB
F9		C, NC, S	N/A	Y, LTB, FLB
F10		N/A	N/A	Y, LTB, LLB
F11		N/A	N/A	Y, LTB
F12	Unsymmetrical shapes, other than single angles	N/A	N/A	All limit states

Y = yielding, LTB = lateral-torsional buckling, FLB = flange local buckling, WLB = web local buckling,  
TFY = tension flange yielding, LLB = leg local buckling, LB = local buckling, C = compact, NC = noncompact,  
S = slender

Fuente: AISC 360, 2010

Lo ideal es obtener un perfil compacto, ya que puede desarrollar una distribución plástica de esfuerzos antes de llegar al pandeo. Este caso corresponde a la sección F2 de la norma AISC 360-10.

#### 3.6.4.2. El método ASD

La norma AISC 360-10 cuenta con dos métodos para el diseño, uno de ellos es el método ASD este se basa en limitar los niveles de estrés en los componentes estructurales para asegurarse de que permanezcan por debajo de un nivel de estrés permitido. Tiene en cuenta la resistencia final de los materiales y aplica los factores de seguridad adecuados para determinar las tensiones admisibles.

En este método los factores de peso se aplican a las cargas factorizadas (como las cargas muertas y vivas) para obtener las fuerzas de diseño, mientras que los factores de resistencia se aplican a las fuerzas nominales de los materiales para obtener las fuerzas de diseño. Normalmente, estos factores son menores o iguales a 1.0.

El método ASD incorpora directamente factores de seguridad en sus ecuaciones. Para cargas dinámicas o con incertidumbres notables, estos factores suelen ser más altos, y su determinación se establece en los códigos o estándares correspondientes. Dado que el método ASD se basa en factores de seguridad más elevados que se aplican directamente a las tensiones admisibles, tiende a tener un enfoque más cauteloso en el diseño.

#### 3.6.4.3. El método LRFD

El método LRFD se basa en la idea de confiabilidad e incorpora factores de carga y resistencia para tener en cuenta las incertidumbres en las cargas, las propiedades de los materiales y otras variables. Al considerar directamente los efectos de las cargas y resistencias, permite un enfoque más racional y coherente del diseño. El LRFD mide las cargas y las capacidades de diseño combinando cargas y factores de resistencia. Mientras que los factores de resistencia se aplican a las resistencias nominales de los materiales para tener en cuenta las incertidumbres en sus propiedades, fabricación y construcción, los factores de carga se aplican a las cargas para tener en cuenta las incertidumbres en su magnitud.

Los factores de carga y resistencia son intrínsecamente parte del LRFD. Estos factores se determinan utilizando análisis estadísticos de cargas, propiedades de materiales y otras variables para alcanzar un nivel deseado de confiabilidad o probabilidad de fallo. Al considerar las probabilidades reales de combinaciones de carga que conducen al fallo, el LRFD permite un diseño más racional y eficiente. Resulta en diseños generalmente más económicos en comparación con ASD. Este método es el que se utilizará al ser mucho más contemporáneo para los diseños actuales.

#### 3.6.4.4. Sección F2 de la AISC 360-10

Esta sección aplica si la caracterización del alma y ala del perfil resultaron compactas (C). En este caso se debe hallar el momento mínimo que soporta el perfil en el eje x-x.

$$M_{n1} = M_p = F_y * Z_x$$

Para el momento  $M_{n2}$  debemos conocer si para nuestro perfil seleccionado aplica el pandeo lateral torsional. Para ello debemos conocer el gradiente de momentos mediante el factor de modificación del pandeo lateral-torsional para momentos no uniformes cuando ambos extremos tienen soportes.

$$C_b = \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$

En donde los momentos utilizados son:

$M_{max}$ : Máximo momento producido en la viga

$M_A$ : Momento producido a una distancia  $\frac{L}{4}$  donde L es la longitud de la viga

$M_B$ : Momento producido a una distancia  $\frac{L}{2}$

$M_C$ : Momento producido a una distancia  $\frac{3L}{4}$

Las longitudes limitantes  $L_p$ ,  $L_r$  y la longitud entre apoyos  $L_b$  se calculan de la siguiente manera:

$$L_b = L$$

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

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

$$L_r = 1.95 r_{ts} \frac{E}{0.7 F_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6.76 \left( \frac{0.7 F_y S_x h_o}{E Jc} \right)}}$$

Si  $L_b \leq L_p$  entonces el límite para el pandeo lateral torsional no aplica

Si  $L_p < L_b < L_r$  entonces el momento para el pandeo lateral torsional se calcula de la siguiente manera:

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

Si  $L_b > L_r$  se debe calcular la fuerza crítica que puede ocasionar el pandeo en la viga

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left( \frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{Jc}{S_x h_o} \left( \frac{L_b}{r_{ts}} \right)^2}$$

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p$$

Para el momento flector en el eje x-x se debe escoger el valor mínimo que nos puede proporcionar el perfil entre el momento  $M_{n1}$  y  $M_{n2}$ :

$$M_{nx} = \min (M_{n1}; M_{n2})$$

Finalmente se halla la relación demanda-capacidad

$$r_{D-C} = \frac{M_x}{\phi M_{nx}}$$

Donde:

$M_x$ : es el momento en el eje x generado por las cargas

$M_{nx}$ : es el momento nominal mínimo que nos puede ofrecer el perfil seleccionado

$\phi$ : es el factor de LRFD con un valor de 0.9 para este método

Una vez obtenida la relación demanda-capacidad se puede verificar si el perfil seleccionado cumple con los requerimientos en cuanto a rigidez, donde esta relación no debe exceder de 1. Si se obtiene este valor o menos, significa que el perfil está a menos del 100% de su capacidad por flexión.

### 3.6.5. Validación del diseño por el criterio de rigidez

Así mismo se tiene que validar el diseño por rigidez, determinando las flechas o deflexiones máximas que producen las cargas. Esta fórmula está dispuesta según el tipo de viga que se muestra en la figura.

Las deflexiones permisibles se deben calcular con diferentes límites, dependiendo de la clase de servicio a la que esté sometida el puente grúa.

**Tabla 3-6:** Deflexión permisible según la clase de servicio

Clase de servicio	Deflexión o flecha permisible
A, B, C	$\frac{L}{600}$
D	$\frac{L}{800}$
E, F	$\frac{L}{100}$

Fuente: AISC 360, 2010

#### 3.6.5.1. Deformación máxima y permisible vertical

La deflexión máxima ocasionada por las cargas se obtiene de la siguiente manera

$$\delta_{\max -v} = \frac{\sum P_{\max} b(3L^2 - 4b^2)}{48EI_x}$$

Donde  $\sum P_{\max}$  es la sumatoria de las fuerzas máximas que se aplican en las ruedas de los carros testers, dependiendo si son 2 o 4 ruedas, se deberá multiplicar la fuerza aplicada por 2 o 4 respectivamente.

La deflexión permisible dependiendo de la clase de servicio según la tabla, se denominará  $B_v$ , entonces para obtener la relación demanda-capacidad de la deflexión vertical:

$$r_{def-v} = \frac{\delta_{\max-v}}{B_v}$$

### 3.6.5.2. Deformación máxima y permisible horizontal

La deflexión máxima horizontal se puede obtener en base a la deformación vertical, solo que ahora se necesita la inercia solo del ala, denominada  $I_t$ , por lo que:

$$I_t = \frac{b_f^3 t_f}{12}$$

Además, no se utilizará la carga máxima soportada por cada rueda, sino la carga de empuje lateral soportada por cada rueda  $P_h$ . Por lo que la deflexión máxima horizontal se obtiene:

$$\delta_{max-h} = \delta_{max-v} * \frac{I_x}{I_t} * \frac{P_h}{P_{max}}$$

El valor para la deformación horizontal permisible para que el diseño sea algo conservador, se puede obtener de la siguiente forma.

$$B_h = \frac{L}{400}$$

La relación demanda-capacidad en base a la deflexión horizontal es:

$$r_{def-h} = \frac{\delta_{max-h}}{B_h}$$

### 3.6.6. Obtención de resultados

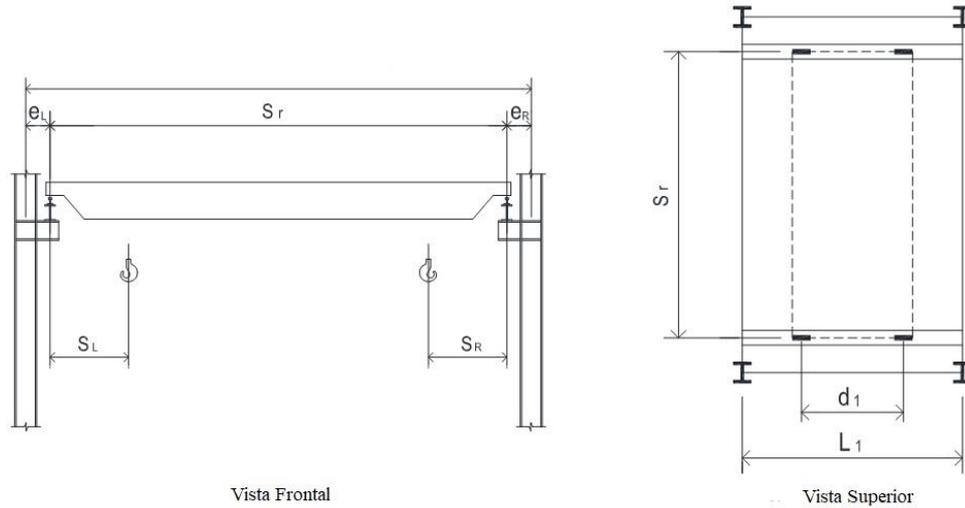
La obtención de resultados depende tanto del diseño en base a la resistencia y en base a la rigidez, obteniendo la relación demanda-capacidad de cada uno de estos parámetros, se puede observar cuál es el parámetro más crítico, y si todos estos son igual o menor a 1, podemos considerarlo como un diseño válido, debido a que las cargas no están excediendo el 100% de capacidad del perfil.

## 3.7. Ejercicios de aplicación

Los ejercicios de aplicación abarcan casos reales en los que se debe diseñar carriles para puentes grúa en cuatro posibles configuraciones, estos ejemplos prácticos serán fundamentales para poder validar el software, ya que engloban una muestra sustancial de los casos que se pueden presentar en la industria.

### 3.7.1. Ejercicio N°1 de aplicación (2 ruedas, inglés)

#### 3.7.1.1. Datos del puente grúa



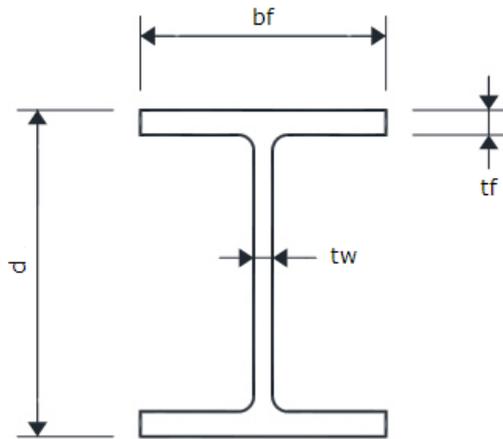
#### Ilustración 3-18: Datos del puente ejercicio 1

Realizado por: Logroño, 2024

- Normas de diseño: CMAA No. 70 y 74, CSA S16-01, AISC 360-10
- Número de ruedas por lado del carro: 2
- Clase de servicio según la CMAA: Clase C (pesado)
- Capacidad del puente grúa:  $W_{rc} = 5 \text{ Ton} = 10 \text{ kips}$
- Peso de la grúa:  $W_{br} = 2.01 \text{ Ton} = 2.02 \text{ kips}$
- Peso del carro principal y del polipasto:  $W_{th} = 0.35 \text{ Ton} = 0.7 \text{ kips}$
- Distancia entre centros de las ruedas de los carros testeros:  $d_1 = 6 \text{ ft}$
- Carga máxima nominal (catálogo) para las ruedas de los carros testeros:  $P_{max} = 6.5 \text{ kips}$
- Luz de la viga:  $S_r = 32 \text{ ft}$
- Distancia mínima entre el carro y el final de la viga por lado izquierdo:  $S_L = 36 \text{ in} = 3 \text{ ft}$
- Distancia mínima entre el carro y el final de la viga por lado derecho:  $S_R = 36 \text{ in} = 3 \text{ ft}$
- Distancia entre la columna y la viga principal:  $e_{L-R} = 1.75 \text{ ft}$
- Distancia entre las columnas de apoyo (claro):  $L_1 = 15 \text{ ft}$
- Factor de impacto vertical: 25%

#### 3.7.1.2. Propiedades de la viga carrilera y del riel

Perfil de viga carrilera: S18x54.7

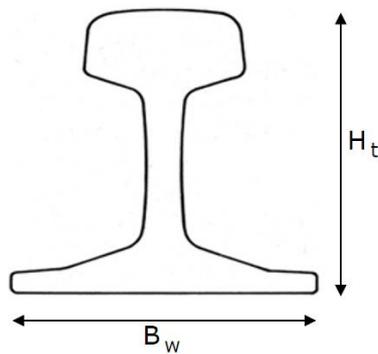


**Ilustración 3-19:** Viga carrilera S18x54.7

Realizado por: Logroño, 2024

- $U_{rb} = 54.7 \frac{lb}{ft}$
- $f_w = 60 \text{ ksi}$
- $bf = 6 \text{ in}$
- $tf = 0.69 \text{ in}$
- $d = 18 \text{ in}$
- $tw = 0.461 \text{ in}$

Perfil del riel: ASCE 20



**Ilustración 3-20:** Riel ASCE 20

Realizado por: Logroño, 2024

- $U_{cr} = 20 \frac{lb}{yd}$
- $B_w = 2 \frac{5}{8} \text{ in}$
- $H_t = 2 \frac{5}{8} \text{ in}$

### 3.7.1.3. Carga de empuje lateral de la grúa

**Tabla 3-7:** Opciones carga empuje lateral ejercicio 1

Opción 1:	$H_s$	$0.2 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ carro)$
Opción 2:	$H_s = max$	$0.2 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ carro)$
		$0.1 * (Carga\ elevada + Peso\ total\ del\ puente\ grúa)$
Opción 3:	$H_s = max$	$0.2 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ carro)$
		$0.1 * (Carga\ elevada + Peso\ total\ del\ puente\ grúa)$
		$0.4 * Carga\ elevada$
Opción 4:	$H_s$	$1.0 * Carga\ elevada\ como\ empuje\ lateral$
Opción 5:	$H_s$	$2.0 * Carga\ elevada\ como\ empuje\ lateral$

Realizado por: Logroño, 2024

### 3.7.2. Cálculo de las cargas soportadas por el perfil de la viga carrilera

Peso de la viga carrilera:

$$U_{br} = 54.7 \frac{lb}{ft} = 0.0547 \frac{kip}{ft}$$

Peso del riel:

$$U_{cr} = 20 \frac{lb}{yd} = 0.00667 \frac{kip}{ft}$$

Peso de la viga carrilera y del riel:

$$R_{sw} = (U_{rb} + U_{cr}) * L_1$$

$$R_{sw} = (0.0547 + 0.0067) * 15 \text{ ft}$$

Carga de las ruedas por el peso propio del puente:

$$P_{br} = \frac{W_{br}}{\#ruedas * 2 \text{ lados}}$$

$$P_{br} = \frac{2.02}{2 * 2}$$

$$P_{br} = 0.505 \frac{kips}{rueda}$$

Carga de empuje lateral: Opción 2

$$H_{s2} = 0.2 * Carga\ elevada$$

$$H_{s2} = 0.2 * (W_{rc} + W_{th})$$

$$H_{s2} = 0.2 * (10 + 0.7)$$

$$H_{s2} = 2.14 \text{ kips}$$

$$H_{st} = \frac{H_{s2}}{\#ruedas}$$

$$H_{st} = \frac{2.14}{4}$$

$$H_{st} = 0.535 \frac{kips}{ruedas}$$

$$H_{st} = P_h$$

Carga Vertical:

- Distancia mínima del gancho:

$$S_{min} = \min(S_L ; S_R)$$

$$S_{min} = \min(3 ; 3)$$

$$S_{min} = 3 \text{ ft}$$

- Carga máxima de las ruedas por cálculo

$$P_{\max\text{-calc}} = \frac{(W_{rc} + W_{th}) * (S_r - S_{min})}{\#ruedas \text{ por lado} * S_r} + P_{br}$$

$$P_{\max\text{-calc}} = \frac{(10 + 0.7) * (32 - 3)}{2 * 32} + 0.505$$

$$P_{\max\text{-calc}} = 5.35 \frac{kips}{rueda}$$

- Carga máxima de las ruedas por catálogo

$$P_{\max\text{-nominal}} = 6.5 \frac{kips}{rueda}$$

- Valor máximo de la carga soportada por las ruedas

$$P_{max} = \max(P_{\max\text{-calc}}; P_{\max\text{-nominal}})$$

$$P_{max} = \max(5.35 ; 6.5)$$

$$P_{max} = 6.5 \frac{kips}{rueda}$$

- Valor mínimo de la carga soportada por las ruedas

$$P_{min} = \frac{(W_{rc} + W_{th}) * S_{min}}{\#ruedas * S_r} + P_{br}$$

$$P_{min} = \frac{(10 + 0.7) * 3}{2 * 32} + 0.505$$

$$P_{min} = 1 \frac{kips}{rueda}$$

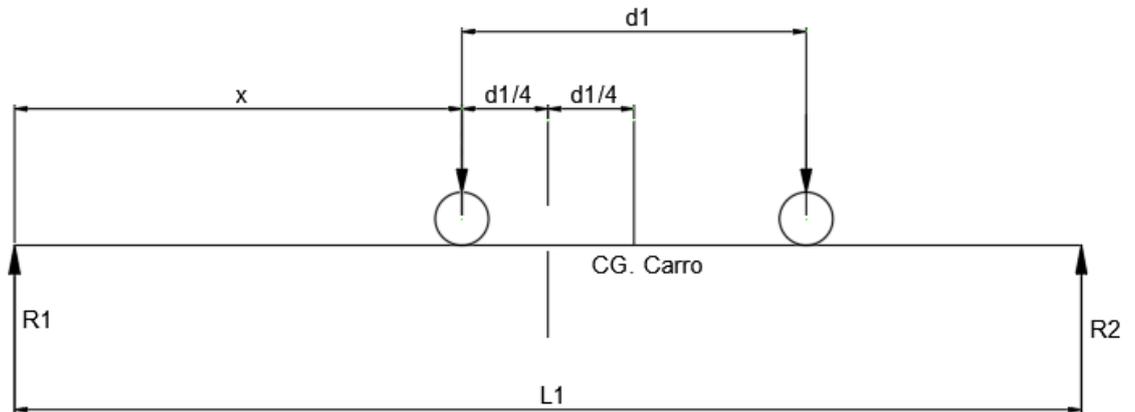
Carga de tracción:

$$H_{tr} = 0.2 * P_{max}$$

$$H_{tr} = 0.2 * 6.5$$

$$H_{tr} = 1.3 \text{ kips}$$

Cálculo del momento crítico



**Ilustración 3-21:**Distancia momento crítico

Realizado por: Logroño, 2024

Distancia a la que se produce el momento máximo:

$$x = \frac{1}{2} \left( L_1 - \frac{d_1}{2} \right)$$

$$x = \frac{1}{2} \left( 15 - \frac{6}{2} \right)$$

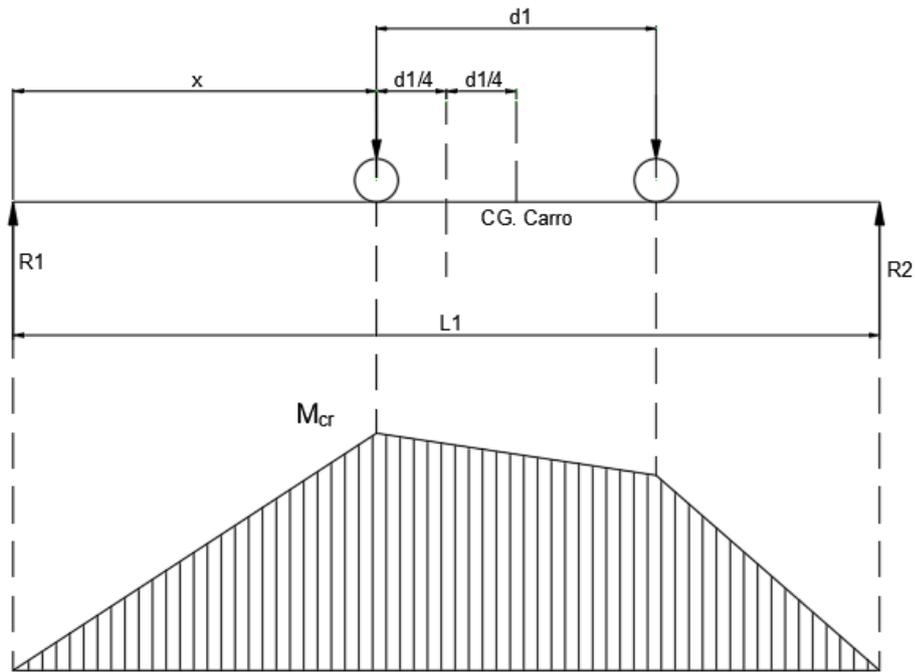
$$x = 3 \text{ ft}$$

Momento máximo producido por la carga transportada

$$M_{cr} = \frac{P_{max}}{2 * L_1} \left( L_1 - \frac{d_1}{2} \right)^2$$

$$M_{cr} = \frac{6.5}{2 * 15} \left( 15 - \frac{6}{2} \right)^2$$

$$M_{cr} = 31.2 \text{ kip} - \text{ft}$$



**Ilustración 3-22:**Diagrama de momentos

Realizado por: Logroño, 2024

Momento máximo causado por el peso del riel y la viga carrilera

$$M_{sw} = (U_{rb} + U_{cr}) * \frac{L_{ver}^2}{8}$$

$$M_{sw} = (0.0547 + 0.0067) * \frac{15^2}{8}$$

$$M_{sw} = 1.73 \text{ kip} - ft$$

Cortante máximo por la carga transportada

$$V_{cr} = P_{max} * \left( 2 - \left( \frac{d_1}{L_1} \right) \right)$$

$$V_{cr} = 6.5 * \left( 2 - \left( \frac{6}{15} \right) \right)$$

$$V_{cr} = 10.4 \text{ kips}$$

Cortante máximo por el peso del riel y la viga carrilera

$$V_{sw} = (U_{rb} + U_{cr}) * \frac{L_1}{2}$$

$$V_{sw} = (0.0547 + 0.0067) * \frac{15}{2}$$

$$V_{sw} = 0.512 \text{ kips}$$

Cargas de diseño por AISC LRFD

- Momento flector en el eje x-x

$$P_{br} = 0.505 \text{ kips}$$

$$P_{lt} = P_{max} - P_{br}$$

$$P_{lt} = 6.5 - 0.505$$

$$P_{lt} = 5.995 \text{ kips}$$

- Carga vertical

$$P_{vf} = 1.2 P_{br} + 1.6 \alpha P_{lt}$$

$$P_{vf} = 12.6 \text{ kips}$$

- Carga horizontal

$$P_{hf} = \frac{1.6 * 0.2 * (W_{rc} + W_{th})}{4}$$

$$P_{hf} = 0.856 \text{ kips}$$

- Momento flector en el eje x-x

$$M_x = M_{cr} * \frac{P_{vf}}{P_{max}} + 1.2 M_{sw}$$

$$M_x = 31.2 * \frac{12.6}{6.5} + 1.2 * 0.512$$

$$M_x = 61.094 \text{ kip} - \text{ft}$$

- Momento flector en el eje y-y

$$M_y = M_{cr} * \frac{P_{vf}}{P_{max}}$$

$$M_y = 31.2 * \frac{0.856}{6.5}$$

$$M_y = 60.48 \text{ kip} - \text{ft}$$

- Cortante en el eje y-y

$$V_y = (V_{cr} * \alpha) + V_{sw}$$

$$V_y = (5.2 * 1.25) + 0.512$$

$$V_y = 7.01 \text{ kips}$$

Cargas para el diseño de las columnas

- Reacción en el lado más cercano al gancho por la carga en movimiento

$$R_{cr-c} = 10.4 \text{ kip}$$

- Reacción por el peso de la viga y del riel

$$R_{sw} = 0.5 (U_{rb} + U_{cr})(2 * L_1)$$

$$R_{sw} = 0.5(0.0547 + 0.0067)(2 * 15)$$

$$R_{sw} = 0.921 \text{ kips}$$

- Reacción 1:

$$R_1 = R_{cr-c} + R_{sw}$$

$$R_1 = 10.4 + 0.921$$

$$R_1 = 11.32 \text{ kips}$$

Reacción en el lado más lejano al gancho por la carga en movimiento

$$R_{cr-f} = R_{cr-c} * \frac{P_{min}}{P_{max}}$$

$$R_{cr-f} = 10.4 * \frac{1}{6.5}$$

$$R_{cr-f} = 1.62 \text{ kips}$$

Reacción por el peso de la viga y del riel

$$R_{sw} = 0.5 (U_{rb} + U_{cr})(2 * L_1)$$

$$R_{sw} = 0.5(0.0547 + 0.0067)(2 * 15)$$

$$R_{sw} = 0.921 \text{ kips}$$

Reacción 2:

$$R_2 = R_{cr-f} + R_{sw}$$

$$R_2 = 1.62 + 0.921$$

$$R_2 = 2.53 \text{ kips}$$

Carga de empuje lateral

$$S_{tl} = R_{cr-c} * \frac{P_h}{P_{max}}$$

$$S_{tl} = 10.4 * \frac{0.535}{6.5}$$

$$S_{tl} = 0.856 \text{ kips}$$

Carga de tracción

$$T_l = R_{cr} * \frac{H_{tr}}{P_{max}}$$

$$T_l = 10.4 * \frac{1.3}{6.5}$$

$$T_l = 2.08 \text{ kips}$$

Momentos para el diseño de la columna:

$$M_1 = R_1 * e_R$$

$$M_1 = 11.32 * 1.75$$

$$M_1 = 19.81 \text{ kips} - ft$$

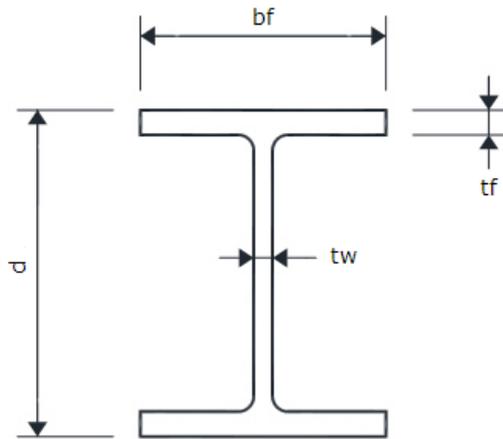
$$M_2 = R_2 * e_L$$

$$M_2 = 2.531 * 1.75$$

$$M_2 = 4.43 \text{ kips} - ft$$

3.7.2.1. Diseño por la norma AISC 360-10

Perfil de viga carrilera: S18x54.7



**Ilustración 3-23:** Viga carrilera S18x54.7

Realizado por: Logroño, 2024

- $U_{rb} = 54.7 \frac{lb}{ft}$
- $f_w = 60 \text{ ksi}$
- $bf = 6 \text{ in}$
- $tf = 0.69 \text{ in}$
- $d = 18 \text{ in}$
- $tw = 0.461 \text{ in}$
- $A = 16 \text{ in}^2$
- $I_x = 801 \text{ in}^4$
- $I_y = 20.7 \text{ in}^4$
- $S_x = 59 \text{ in}^3$
- $S_y = 6.91 \text{ in}^3$
- $Z_x = 104 \text{ in}^3$
- $Z_y = 12.10 \text{ in}^3$
- $r_x = 7.07 \text{ in}$
- $r_y = 1.14 \text{ in}$
- $J = 2.33 \text{ in}^4$
- $C_w = 1550 \text{ in}^6$

**Calificación del ala y alma**

- Si  $\lambda < \lambda_p$ : Compacta (C)
- Si  $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$ : No Compacta (NC)
- Si  $\lambda < \lambda_r$ : Esbelta (E)

Ala

**Tabla 3-8:** Clasificación del ala del ejercicio 1

$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{6}{2 * 0.691}$ $\lambda = 4.34$	$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ $= 0.38 \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_p = 8.35$	$\lambda_r = 1 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_r = 21.98$
---	---	--

Realizado por: Logroño C., 2024

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow \text{Ala Compacta (C)}$$

Alma

**Tabla 3-9:** Clasificación del alma del ejercicio 1

$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{15}{0.461}$ $\lambda = 4.34$	$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ $= 0.38 \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_p = 8.35$	$\lambda_r = 1 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_r = 21.98$
---	---	--

Realizado por: Logroño C., 2024

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow \text{Ala Compacta (C)}$$

Sección utilizada para el análisis según la norma AISC 360-10:

*Ala (C) y Alma (C) → F2*

- Momento flector en el eje x-x  
Límite a compresión del ala

$$M_{n1} = M_p = F_y * Z_x$$

$$M_{n1} = M_p = 60 * 104$$

$$M_{n1} = 6240 \text{ kips} - \text{in}$$

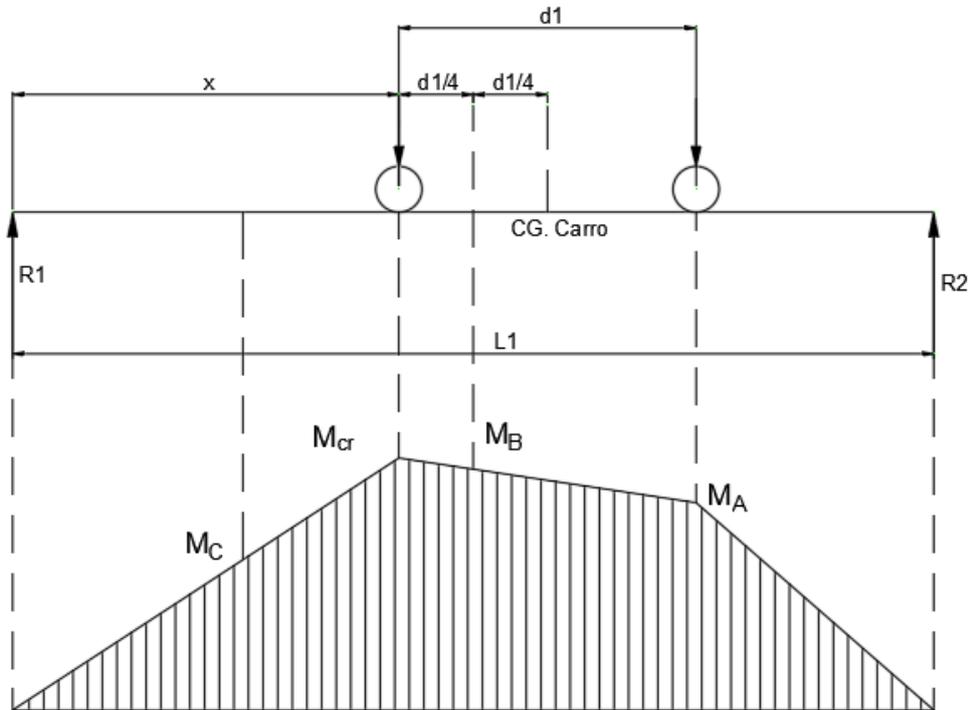
$$M_{n1} = 520 \text{ kips} - \text{ft}$$

Pandeo lateral torsional

**Tabla 3-10:** Pandeo lateral torcional

$M \text{ a } \frac{L}{4} \rightarrow M_A$	$M_A = 23.4 \text{ kips} - \text{ft}$
$M_{max} = M_{cr}$	$M_{max} = 31.2 \text{ kips} - \text{ft}$
$M \text{ a } \frac{L}{4} \rightarrow M_B$	$M_B = 29.25 \text{ kips} - \text{ft}$
$M \text{ a } \frac{3L}{4} \rightarrow M_C$	$M_C = 19.5 \text{ kips} - \text{ft}$

Realizado por: Logroño, 2024



**Ilustración 3-24:** Diagrama de momentos

Realizado por: Logroño, 2024

$$C_b = \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$

$$C_b = \frac{12.5 (31.2)}{2.5 (31.2) + 3 (23.4) + 4 (29.25) + 3 (19.5)}$$

$$C_b = 1.205$$

**Tabla 3-11:** Longitud sin arriostrar

$L_b = L_1$	$L_b = 180 \text{ in}$
$L_p = 1.76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$L_p = 44.11 \text{ in}$
$r_{ts} = \sqrt{\frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x}}$	$r_{ts} = 1.42 \text{ in}$
$L_r = 1.95 r_{ts} \frac{E}{0.7 F_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6.76 \left( \frac{0.7 F_y S_x h_o}{E Jc} \right)}}$	$L_r = 142.57 \text{ in}$

Realizado por: Logroño, 2024

$$L_b > L_r$$

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{Jc}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2}$$

$$F_{cr} = 36.48 \text{ ksi}$$

$$M_{n2} = F_{cr} S_x$$

$$M_{n2} = 36.48 * 89$$

$$M_{n2} = 3246.72 \text{ kip} - \text{in}$$

$$M_{n2} = 270.56 \text{ kip} - \text{ft}$$

Momento en el eje x-x

$$M_{nx} = \min(M_{n1}; M_{n2})$$

$$M_{nx} = 270.56$$

Relación demanda-capacidad

$$\phi = 0.9 \text{ LFRD}$$

$$DC_{moment-xx} = \frac{M_x}{\phi M_{nx}}$$

$$DC_{moment-xx} = \frac{61.094}{0.9 * 270.56}$$

$$DC_{moment-xx} = 0.25$$

*Cumple el criterio de resistencia*

- Deflexión de la viga carrilera

Deflexión vertical

Deflexión permisible vertical (Clase B)

$$\delta_{perm-v} = B_v$$

$$B_v = \frac{L}{600}$$

$$B_v = \frac{15 * 12}{600}$$

$$B_v = 0.3 \text{ in}$$

Deflexión máxima vertical

$$\delta_{max-v} = \frac{P_{max} \left(\frac{L_1 - d_1}{2}\right) \left(3L_1^2 - 4\left(\frac{L_1 - d_1}{2}\right)^2\right)}{24EI_x} * 1728$$

$$\delta_{max-v} = 0.05 \text{ in}$$

Relación demanda-capacidad

$$DC_{def-v} = \frac{\delta_{max-v}}{\delta_{perm-v}}$$

$$DC_{def-v} = \frac{0.05}{0.025}$$

$$DC_{def-v} = 0.167$$

*Cumple el criterio de rigidez*

Límite de deflexión horizontal

$$\delta_{perm-h} = B_h$$

$$B_h = \frac{L}{400}$$

$$B_h = \frac{15 * 12}{400}$$

$$B_h = 0.45 \text{ in}$$

Deflexión máxima horizontal

$$I_t = \frac{bf^3 * tf}{12}$$

$$I_t = 12.44 \text{ in}^4$$

$$\delta_{max-h} = \delta_{max-v} * \frac{I_x}{I_t} * \frac{P_h}{P_{max}}$$

$$\delta_{max-h} = 0.05 * \frac{801}{12.44} * \frac{0.535}{6.5}$$

$$\delta_{max-h} = 0.285$$

Relación demanda-capacidad

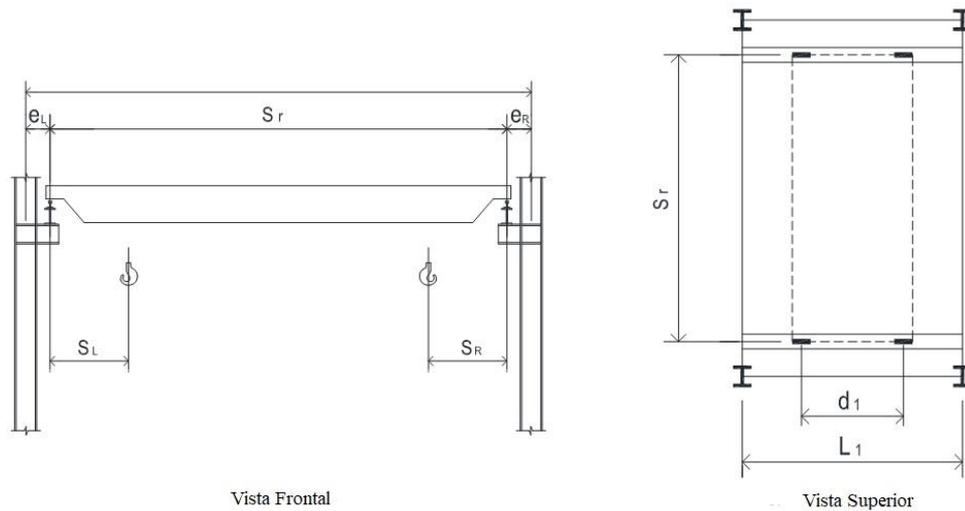
$$DC_{def-h} = \frac{\delta_{max-h}}{\delta_{perm-h}}$$

$$DC_{def-h} = \frac{0.285}{0.45}$$

$$DC_{def-h} = 0.633$$

*Cumple el criterio de rigidez*

### 3.7.3. Dimensiones generales para el cálculo



**Ilustración 3-25:** Dimensiones generales

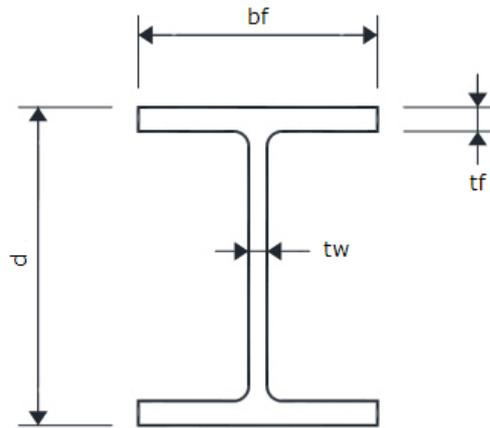
Realizado por: Logroño, 2024

### 3.7.4. Datos del puente grúa

- Normas de diseño: CMAA No. 70 y 74, CSA S16-01, AISC 360-10
- Número de ruedas por lado del carro: 2
- Clase de servicio según la CMAA: *Clase C (pesado)*
- Capacidad del puente grúa:  $W_{rc} = 10 \text{ Ton} = 88.96 \text{ kN}$
- Peso de la grúa:  $W_{br} = 110 \text{ kN}$
- Peso del carro principal y del polipasto:  $W_{th} = 7.26 \text{ kN}$
- Distancia entre centros de las ruedas de los carros testeros:  $d_1 = 2.5 \text{ m}$
- Carga máxima nominal (catálogo) para las ruedas de los carros testeros:  $P_{max} = 90.95 \text{ kN}$
- Luz de la viga:  $S_r = 19.5 \text{ m}$
- Distancia mínima entre el carro y el final de la viga por lado izquierdo:  $S_L = 1 \text{ m}$
- Distancia mínima entre el carro y el final de la viga por lado derecho:  $S_R = 1 \text{ m}$
- Distancia entre la columna y la viga principal:  $e_{L-R} = 0.2 \text{ m}$
- Distancia entre las columnas de apoyo (claro):  $L_1 = 9.75 \text{ m}$
- Factor de impacto vertical: 20%

#### 3.7.4.1. Propiedades de la viga carrilera y del riel

Perfil de viga carrilera:  $W21 \times 101$

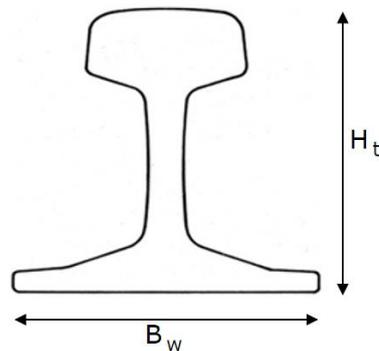


**Ilustración 3-26:** Viga carrilera W21x101

Realizado por: Logroño, 2024

- $U_{br} = 101 \frac{lb}{ft}$
- $f_w = 60 \text{ ksi}$
- $bf = 6 \text{ in}$
- $tf = 0.69 \text{ in}$
- $d = 18 \text{ in}$
- $tw = 0.461 \text{ in}$

Perfil del riel: ASCE 40



**Ilustración 3-27:** Riel ASCE 40

Realizado por: Logroño, 2024

- $U_{cr} = 40 \frac{lb}{yd}$
- $B_w = 3 \frac{1}{2} \text{ in}$
- $H_t = 3 \frac{1}{2} \text{ in}$

### 3.7.4.2. Carga de empuje lateral de la grúa

**Tabla 3-12:** Opciones carga de empuje lateral

Opción 1:	$H_s$	$0.2 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ carro)$
Opción 2:	$H_s = max$	$0.2 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ carro)$
		$0.1 * (Carga\ elevada + Peso\ total\ del\ puente\ grúa)$
Opción 3:	$H_s = max$	$0.2 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ carro)$
		$0.1 * (Carga\ elevada + Peso\ total\ del\ puente\ grúa)$
		$0.4 * Carga\ elevada$
Opción 4:	$H_s$	$1.0 * Carga\ elevada\ como\ empuje\ lateral$
Opción 5:	$H_s$	$2.0 * Carga\ elevada\ como\ empuje\ lateral$

Realizado por: Logroño, 2024

### 3.7.5. Cálculo de las cargas soportadas por el perfil de la viga carrilera

Peso de la viga carrilera:

$$Perfil : W 21x101$$

$$U_{br} = 101 \frac{lb}{ft} = 1.474 \frac{kN}{m}$$

Peso del riel:

$$ASCE 40$$

$$U_{cr} = 40 \frac{lb}{yd} = 0.195 \frac{kN}{m}$$

Peso de la viga carrilera y del riel:

$$R_{sw} = (U_{rb} + U_{cr}) * L_1$$

$$R_{sw} = (1.474 + 0.195) * 9.75 m$$

$$R_{sw} = 16.273 kN$$

Carga de las ruedas por el peso propio del puente:

$$P_{br} = \frac{W_{br}}{\#ruedas * 2\ lados}$$

$$P_{br} = \frac{110}{2 * 2}$$

$$P_{br} = 27.5 \frac{kN}{rueda}$$

Carga de empuje lateral: Opción 2

$$H_{s2} = 0.2 * Carga\ elevada$$

$$H_{s2} = 0.2 * (W_{rc} + W_{th})$$

$$H_{s2} = 0.2 * (88.96 + 7.26)$$

$$H_{s2} = 19.244 kN$$

$$H_{st} = \frac{H_{s2}}{\#ruedas}$$

$$H_{st} = \frac{19.244}{4}$$

$$H_{st} = 4.811 \frac{kN}{ruedas}$$

$$H_{st} = P_h$$

Carga Vertical:

- Distancia mínima del gancho:

$$S_{min} = \min(S_L ; S_R)$$

$$S_{min} = \min(1 ; 1)$$

$$S_{min} = 1m$$

- Carga máxima de las ruedas por cálculo

$$P_{max-calc} = \frac{(W_{rc} + W_{th}) * (S_r - S_{min})}{\#ruedas \text{ por lado} * S_r} + P_{br}$$

$$P_{max-calc} = \frac{(88.96 + 7.26) * (19.5 - 1)}{2 * 19.5} + 27.5$$

$$P_{max-calc} = 73.143 \frac{kN}{rueda}$$

- Carga máxima de las ruedas por catálogo

$$P_{max-nominal} = 90.95 \frac{kN}{rueda}$$

- Valor máximo de la carga soportada por las ruedas

$$P_{max} = \max(P_{max-calc}; P_{max-nominal})$$

$$P_{max} = \max(73.143 ; 90.95)$$

$$P_{max} = 90.95 \frac{kN}{rueda}$$

- Valor mínimo de la carga soportada por las ruedas

$$P_{min} = \frac{(W_{rc} + W_{th}) * S_{min}}{\#ruedas \text{ por lado} * S_r} + P_{br}$$

$$P_{min} = \frac{(88.96 + 7.26) * 1}{2 * 19.5} + 27.5$$

$$P_{min} = 29.967 \frac{kN}{rueda}$$

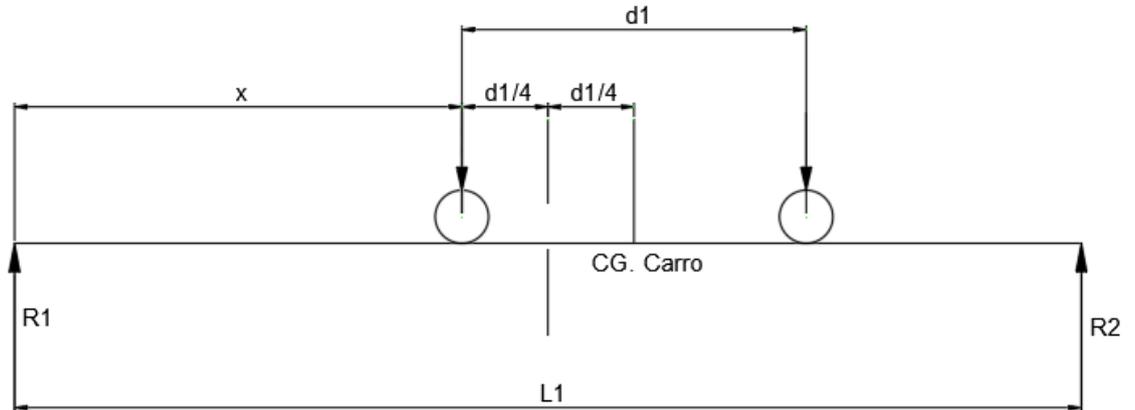
Carga de tracción:

$$H_{tr} = 0.2 * P_{max}$$

$$H_{tr} = 0.2 * 90.95$$

$$H_{tr} = 18.19 \text{ kN}$$

Cálculo del momento crítico



**Ilustración 3-28:** Distancia momento crítico

Realizado por: Logroño, 2024

Distancia a la que se produce el momento máximo:

$$x = \frac{1}{2} \left( L_1 - \frac{d_1}{2} \right)$$

$$x = \frac{1}{2} \left( 9.75 - \frac{2.5}{2} \right)$$

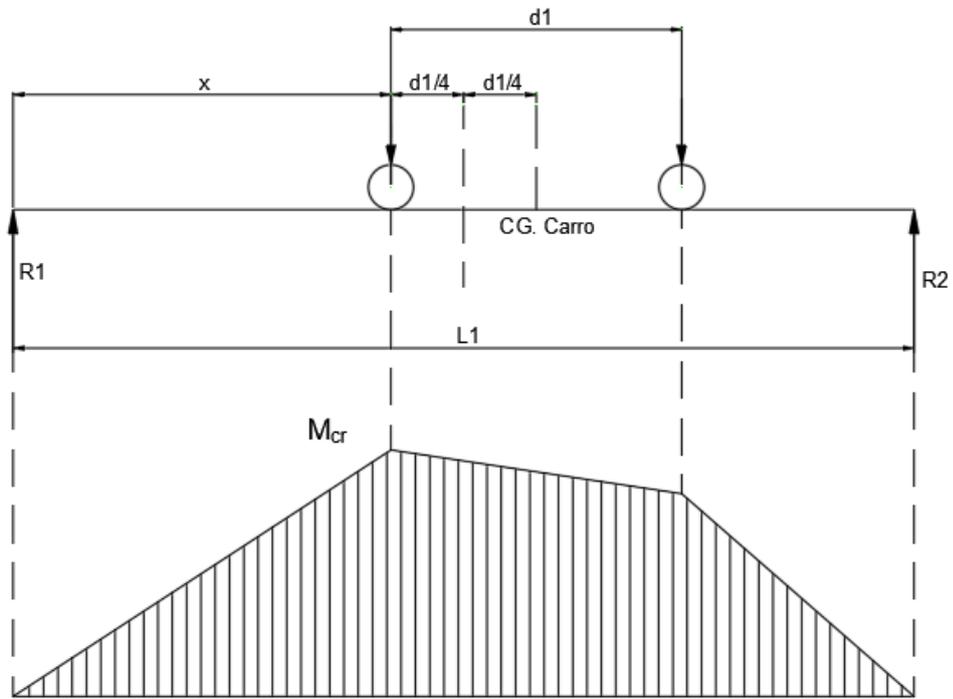
$$x = 4.25 \text{ m}$$

Momento máximo producido por la carga transportada

$$M_{cr} = \frac{P_{max}}{2 * L_1} \left( L_1 - \frac{d_1}{2} \right)^2$$

$$M_{cr} = \frac{90.95}{2 * 9.75} \left( 9.75 - \frac{2.5}{2} \right)^2$$

$$M_{cr} = 336.98 \text{ kN} - m$$



**Ilustración 3-29:**Diagrama de momentos

Realizado por: Logroño, 2024

Momento máximo causado por el peso del riel y la viga carrilera

$$M_{sw} = (U_{rb} + U_{cr}) * \frac{L_{ver}^2}{8}$$

$$M_{sw} = (0.798 + 0.195) * \frac{9.75^2}{8}$$

$$M_{sw} = 11.8 \text{ kN} - m$$

Cortante máximo por la carga transportada

$$V_{cr} = P_{max} * \left( 2 - \left( \frac{d_1}{L_1} \right) \right)$$

$$V_{cr} = 90.95 * \left( 2 - \left( \frac{2.5}{9.75} \right) \right)$$

$$V_{cr} = 158.58 \text{ kN}$$

Cortante máximo por el peso del riel y la viga carrilera

$$V_{sw} = (U_{rb} + U_{cr}) * \frac{L_1}{2}$$

$$V_{sw} = (1.474 + 0.195) * \frac{9.75}{2}$$

$$V_{sw} = 8.14 \text{ kN}$$

Cargas de diseño por AISC LRFD

- Momento flector en el eje x-x

$$P_{br} = 27.5 \text{ kN}$$

$$P_{lt} = P_{max} - P_{br}$$

$$P_{lt} = 90.95 - 27.5$$

$$P_{lt} = 63.45 \text{ kN}$$

- Carga vertical

$$P_{vf} = 1.2 P_{br} + 1.6 \alpha P_{lt}$$

$$P_{vf} = 1.2 * 27.5 + 1.6 * 1.2 * 63.45$$

$$P_{vf} = 154.824 \text{ kN}$$

- Carga horizontal

$$P_{hf} = \frac{1.6 * 0.2 * (W_{rc} + W_{th})}{4}$$

$$P_{hf} = \frac{1.6 * 0.2 * (88.96 + 7.26)}{4}$$

$$P_{hf} = 7.698 \text{ kN}$$

- Momento flector en el eje x-x

$$M_x = M_{cr} * \frac{P_{vf}}{P_{max}} + 1.2 M_{sw}$$

$$M_x = 336.98 * \frac{154.824}{90.95} + 1.2 * 11.8$$

$$M_x = 587.8 \text{ kN} - m$$

- Momento flector en el eje y-y

$$M_y = M_{cr} * \frac{P_{vf}}{P_{max}}$$

$$M_y = 336.98 * \frac{154.824}{90.95}$$

$$M_y = 573.64 \text{ kN} - m$$

- Cortante en el eje y-y

$$V_y = (V_{cr} * \alpha) + V_{sw}$$

$$V_y = (158.58 * 1.2) + 4.84$$

$$V_y = 195.136 \text{ kN}$$

Cargas para el diseño de las columnas

- Reacción en el lado más cercano al gancho por la carga en movimiento

$$R_{cr-c} = 158.58 \text{ kN}$$

- Reacción por el peso de la viga y del riel

$$R_{sw} = 0.5 (U_{rb} + U_{cr})(2 * L_1)$$

$$R_{sw} = 0.5(1.474 + 0.1955)(2 * 9.75)$$

$$R_{sw} = 16.278 \text{ kN}$$

- Reacción 1:

$$R_1 = R_{cr-c} + R_{sw}$$

$$R_1 = 158.58 + 16.278$$

$$R_1 = 174.858 \text{ kN}$$

Reacción en el lado más lejano al gancho por la carga en movimiento

$$R_{cr-f} = R_{cr-c} * \frac{P_{min}}{P_{max}}$$

$$R_{cr-f} = 158.58 * \frac{29.967}{90.95}$$

$$R_{cr-f} = 52.25 \text{ kN}$$

Reacción por el peso de la viga y del riel

$$R_{sw} = 0.5 (U_{rb} + U_{cr})(2 * L_1)$$

$$R_{sw} = 0.5(1.474 + 0.195)(2 * 9.75)$$

$$R_{sw} = 16.278 \text{ kN}$$

Reacción 2:

$$R_2 = R_{cr-f} + R_{sw}$$

$$R_2 = 52.25 + 16.278$$

$$R_2 = 62.528 \text{ kN}$$

Carga de empuje lateral

$$S_{tl} = R_{cr-c} * \frac{P_h}{P_{max}}$$

$$S_{tl} = 158.58 * \frac{4.811}{90.95}$$

$$S_{tl} = 8.39 \text{ kN}$$

Carga de tracción

$$T_l = R_{cr-c} * \frac{H_{tr}}{P_{max}}$$

$$T_l = 158.58 * \frac{18.19}{90.95}$$

$$T_l = 31.72 \text{ kN}$$

Momentos para el diseño de la columna:

$$M_1 = R_1 * e_R$$

$$M_1 = 168.26 * 0.2$$

$$M_1 = 33.652 \text{ kN} - m$$

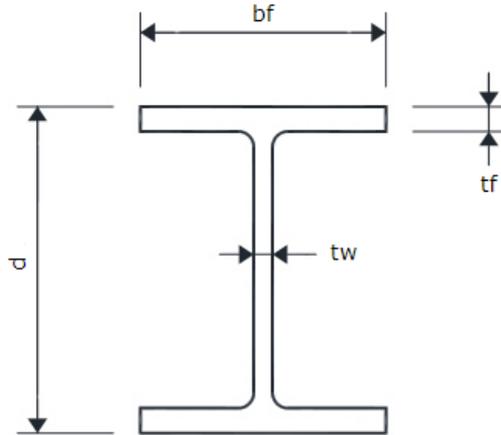
$$M_2 = R_2 * e_L$$

$$M_2 = 11.42 * 0.2$$

$$M_2 = 2.284 \text{ kN} - \text{m}$$

### 3.7.5.1. Diseño por la norma AISC 360-10

Perfil de viga carrilera: W21x101



**Ilustración 3-30:** Viga carrilera W21x101

Realizado por: Logroño, 2024

- $U_{rb} = 101 \frac{\text{lb}}{\text{ft}} = 1.474 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
- $f_w = 60 \text{ ksi}$
- $h = 17.25 \text{ in} = 43.81 \text{ cm}$
- $bf = 12.3 \text{ in} = 31.242 \text{ cm}$
- $tf = 0.8 \text{ in} = 2.032 \text{ cm}$
- $d = 21.4 \text{ in} = 54.356 \text{ cm}$
- $tw = 0.500 \text{ in} = 1.27 \text{ cm}$
- $A = 29.8 \text{ in}^2 = 192.258 \text{ cm}^2$
- $I_x = 2420 \text{ in}^4 = 100728 \text{ cm}^4$
- $I_y = 248 \text{ in}^4 = 10322 \text{ cm}^4$
- $S_x = 227 \text{ in}^3 = 3720 \text{ cm}^3$
- $S_y = 40.3 \text{ in}^3 = 660.4 \text{ cm}^3$
- $Z_x = 253 \text{ in}^3 = 4146 \text{ cm}^3$
- $Z_y = 61.7 \text{ in}^3 = 1011 \text{ cm}^3$
- $r_x = 9.02 \text{ in} = 23 \text{ cm}$
- $r_y = 2.89 \text{ in} = 7.34 \text{ cm}$
- $J = 5.210 \text{ in}^4 = 216.86 \text{ cm}^4$
- $C_w = 26200 \text{ in}^6 = 7035.6 \times 10^3 \text{ cm}^6$

#### Calificación del ala y alma

- Si  $\lambda < \lambda_p$ : Compacta (C)
- Si  $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$ : No Compacta (NC)
- Si  $\lambda < \lambda_r$ : Esbelta (E)

Ala

**Tabla 3-13:** Clasificación del ala del ejercicio 1

$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{12.3}{2 * 0.8}$ $\lambda = 7.6875$	$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ $= 0.38 \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_p = 8.35$	$\lambda_r = 1 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_r = 21.98$
--	---	--

Realizado por: Logroño C., 2024

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow \text{Ala Compacta (C)}$$

Alma

**Tabla 3-14:** Clasificación del alma del ejercicio 1

$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{17.25}{0.5}$ $\lambda = 34.496$	$\lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ $= 0.38 \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_p = 82.66$	$\lambda_r = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_r = 125.31$
--	--	---

Realizado por: Logroño C., 2024

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow \text{Ala Compacta (C)}$$

Sección utilizada para el análisis según la norma AISC 360-10:

*Ala (C) y Alma (C) → F2*

- Momento flector en el eje x-x

Límite a compresión del ala

$$M_{n1} = M_p = F_y * Z_x$$

$$M_{n1} = M_p = 60 * 253$$

$$M_{n1} = 15180 \text{ kips} - \text{in}$$

$$M_{n1} = 1265 \text{ kips} - \text{ft}$$

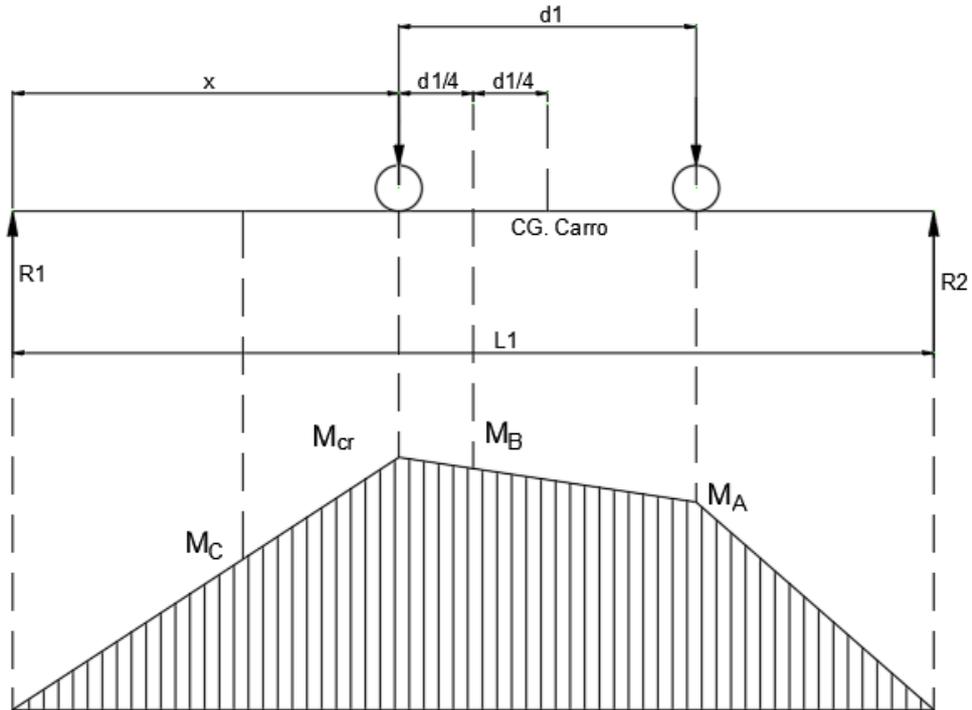
$$M_{n1} = 1715.11 \text{ kN} - \text{m}$$

**Tabla 3-15:** Pandeo lateral torsional

$M \text{ a } \frac{L}{4} \rightarrow M_A$	$M_A = 181 \text{ kN} - \text{m}$
$M_{max} = M_{cr}$	$M_{max} = 336.98 \text{ kN} - \text{m}$
$M \text{ a } \frac{L}{4} \rightarrow M_B$	$M_B = 297.99 \text{ kN} - \text{m}$

$M a \frac{3L}{4} \rightarrow M_C$	$M_C = 69.65 \text{ kN} - \text{m}$
------------------------------------	-------------------------------------

Realizado por: Logroño, 2024



**Ilustración 3-31:** Diagrama de momentos

Realizado por: Logroño, 2024

$$C_b = \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$

$$C_b = \frac{12.5 (31.2)}{2.5 (31.2) + 3 (23.4) + 4 (29.25) + 3 (19.5)}$$

$$C_b = 1.512$$

**Tabla 3-16:** Longitud sin arriostrar

$L_b = L_1$	$L_b = 975 \text{ m}$
$L_p = 1.76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$L_p = 284 \text{ cm}$
$r_{ts} = \sqrt{\frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x}}$	$r_{ts} = 8.51 \text{ cm}$
$L_r = 1.95 r_{ts} \frac{E}{0.7 F_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6.76 \left( \frac{0.7 F_y S_x h_o}{E Jc} \right)}}$	$L_r = 813.435 \text{ cm}$

Realizado por: Logroño, 2024

Caso 1:  $L_b \leq L_p$

El pandeo lateral torisonal no aplica

Caso 2:  $L_b > L_r$

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{Jc}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2}$$

$$M_{n2} = F_{cr} S_x$$

Caso 3:  $L_p < L_b \leq L_r$

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

Caso utilizado: Caso 2

$$F_{cr} = 287.64 \text{ MPa}$$

$$F_{cr} = 287640 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$M_{n2} = F_{cr} S_x$$

$$M_{n2} = 1070.15 \text{ kN} - \text{m}$$

Momento en el eje x-x

$$M_{nx} = \min(M_{n1}; M_{n2})$$

$$M_{nx} = 1070.15 \text{ kN} - \text{m}$$

Relación demanda-capacidad

$$\phi = 0.9 \text{ LRFD}$$

$$DC_{\text{moment-xx}} = \frac{M_x}{\phi M_{nx}}$$

$$DC_{\text{moment-xx}} = \frac{587.8}{0.9 * 1070.15}$$

$$DC_{\text{moment-xx}} = 0.61$$

Cumple el criterio de resistencia

- Deflexión de la viga carrilera  
Deflexión vertical  
Deflexión permisible vertical (Clase C)

$$\delta_{\text{perm-v}} = B_v$$

$$B_v = \frac{L}{600}$$

$$B_v = \frac{9.75}{600}$$

$$B_v = 0.016 \text{ m}$$

Deflexión máxima vertical

$$\delta_{max-v} = \frac{P_{max} \left( \frac{L_1 - d_1}{2} \right) \left( 3L_1^2 - 4 \left( \frac{L_1 - d_1}{2} \right)^2 \right)}{24EI_x}$$

$$\delta_{max-v} = 0.015 \text{ m}$$

Relación demanda-capacidad

$$DC_{def-v} = \frac{\delta_{max-v}}{\delta_{perm-v}}$$

$$DC_{def-v} = \frac{0.015}{0.016}$$

$$DC_{def-v} = 0.938$$

*Cumple el criterio de rigidez*

Límite de deflexión horizontal

$$\delta_{perm-h} = B_h$$

$$B_h = \frac{L}{400}$$

$$B_h = \frac{9.75}{400}$$

$$B_h = 0.024 \text{ m}$$

Deflexión máxima horizontal

$$I_t = \frac{bf^3 * tf}{12}$$

$$I_t = 124 \text{ in}^4$$

$$I_t = 5161.3 \text{ cm}^4$$

$$\delta_{max-h} = \delta_{max-v} * \frac{I_x}{I_t} * \frac{P_h}{P_{max}}$$

$$\delta_{max-h} = 0.015 * \frac{2420}{124} * \frac{4.811}{90.95}$$

$$\delta_{max-h} = 0.0154$$

Relación demanda-capacidad

$$DC_{def-h} = \frac{\delta_{max-h}}{\delta_{perm-h}}$$

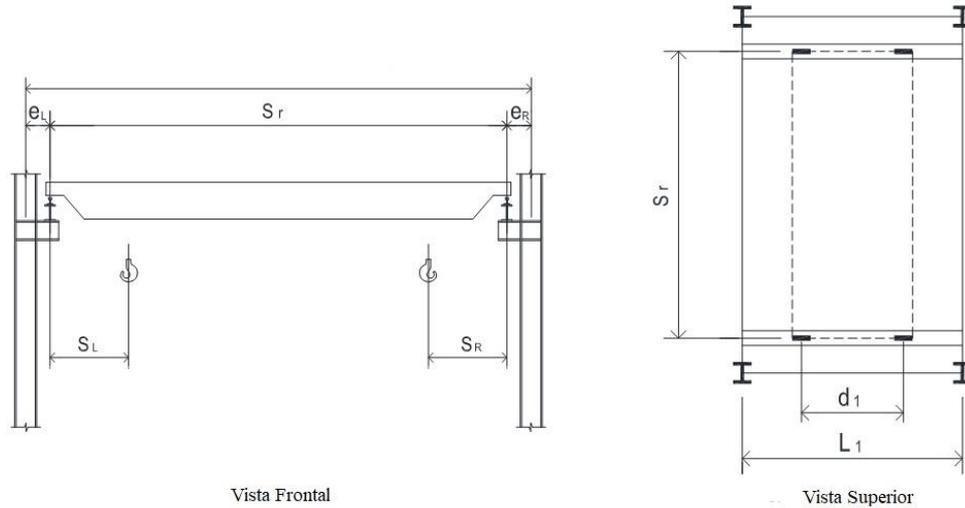
$$DC_{def-h} = \frac{0.0154}{0.024}$$

$$DC_{def-h} = 0.642$$

Cumple el criterio de rigidez

### 3.7.6. Ejercicio N°2 de aplicación (4 ruedas, inglés)

#### 3.7.6.1. Datos del puente grúa



**Ilustración 3-32:** Dimensiones ejercicio 2

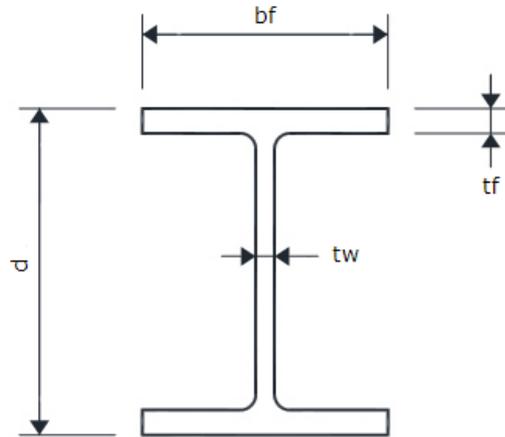
Realizado por: Logroño, 2024

- Normas de diseño: CMAA No. 70 y 74, CSA S16-01, AISC 360-10
- Número de ruedas por lado del carro: 4
- Clase de servicio según la CMAA: *Clase C (pesado)*
- Capacidad del puente grúa:  $W_{rc} = 20 \text{ Ton} = 40 \text{ kips}$
- Peso de la grúa:  $W_{br} = 7.67 \text{ Ton} = 15.34 \text{ kips}$
- Peso del carro principal y del polipasto:  $W_{th} = 1.07 \text{ Ton} = 2.14 \text{ kips}$
- Distancia entre centros de las ruedas de los carros testeros:  $d_1 = 3 \text{ ft}$ ;  $d_2 = 5 \text{ ft}$ ;  $d_3 = 3 \text{ ft}$
- Carga máxima nominal (catálogo) para las ruedas de los carros testeros:  $P_{max} = 24.3 \text{ kips}$
- Luz de la viga:  $S_r = 40 \text{ ft}$
- Distancia mínima entre el carro y el final de la viga por lado izquierdo:  $S_L = 38 \text{ in} = 3.17 \text{ ft}$
- Distancia mínima entre el carro y el final de la viga por lado derecho:  $S_R = 38 \text{ in} = 3.17 \text{ ft}$
- Distancia entre la columna y la viga principal:  $e_{L-R} = 0.75 \text{ ft}$

- Distancia entre las columnas de apoyo (claro):  $L_1 = 30 \text{ ft}$
- Factor de impacto vertical: 25%

### 3.7.6.2. Propiedades de la viga carrilera y del riel

Perfil de viga carrilera: W24x162

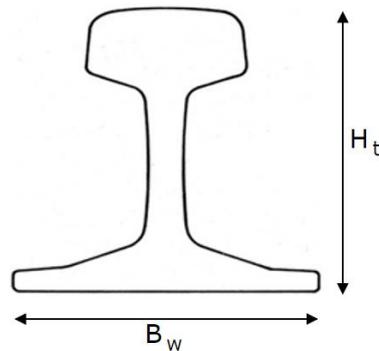


**Ilustración 3-33:** Viga carrilera W24x162

Realizado por: Logroño, 2024

- $U_{rb} = 162 \frac{\text{lb}}{\text{ft}}$
- $f_w = 60 \text{ ksi}$
- $bf = 13 \text{ in}$
- $tf = 1.22 \text{ in}$
- $d = 25 \text{ in}$
- $tw = 0.705 \text{ in}$

Perfil del riel: ASCE 40



**Ilustración 3-34:** Riel ASCE 40

Realizado por: Logroño, 2024

- $U_{cr} = 40 \frac{lb}{yd}$
- $B_w = 3 \frac{1}{2} in$
- $H_t = 3 \frac{1}{2} in$

### 3.7.6.3. Carga de empuje lateral de la grúa

**Tabla 3-17:** Opciones carga de empuje lateral

Opción 1:	$H_s$	$0.2 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ carro)$
Opción 2:	$H_s = max$	$0.2 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ carro)$
		$0.1 * (Carga\ elevada + Peso\ total\ del\ puente\ grúa)$
Opción 3:	$H_s = max$	$0.2 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ carro)$
		$0.1 * (Carga\ elevada + Peso\ total\ del\ puente\ grúa)$
		$0.4 * Carga\ elevada$
Opción 4:	$H_s$	$1.0 * Carga\ elevada\ como\ empuje\ lateral$
Opción 5:	$H_s$	$2.0 * Carga\ elevada\ como\ empuje\ lateral$

Realizado por: Logroño, 2024

### 3.7.7. Cálculo de las cargas soportadas por el perfil de la viga carrilera

Peso de la viga carrilera:

$$W_{24x162}$$

$$U_{br} = 162 \frac{lb}{ft} = 0.162 \frac{kip}{ft}$$

Peso del riel:

$$ASCE\ 40$$

$$U_{cr} = 40 \frac{lb}{yd} = 0.0133 \frac{kip}{ft}$$

Peso de la viga carrilera y del riel:

$$R_{sw} = (U_{rb} + U_{cr}) * L_1$$

$$R_{sw} = (0.162 + 0.0133) * 30 ft$$

$$R_{sw} = 5.259$$

Carga de las ruedas por el peso propio del puente:

$$P_{br} = \frac{W_{br}}{\#ruedas * 2\ lados}$$

$$P_{br} = \frac{15.34}{4 * 2}$$

$$P_{br} = 1.92 \frac{kips}{rueda}$$

Carga de empuje lateral: Opción 2

$$H_{s2} = 0.2 * \text{Carga elevada}$$

$$H_{s2} = 0.2 * (W_{rc} + W_{th})$$

$$H_{s2} = 0.2 * (40 + 2.14)$$

$$H_{s2} = 8.428 \text{ kips}$$

$$H_{st} = \frac{H_{s2}}{\#ruedas * 2\text{ lados}}$$

$$H_{st} = \frac{8.428}{8}$$

$$H_{st} = 1.0535 \frac{\text{kips}}{\text{ruedas}}$$

$$H_{st} = P_h$$

Carga Vertical:

- Distancia mínima del gancho:

$$S_{min} = \min(S_L ; S_R)$$

$$S_{min} = \min(3.17 ; 3.17)$$

$$S_{min} = 3.17 \text{ ft}$$

- Carga máxima de las ruedas por cálculo

$$P_{\text{max-calc}} = \frac{(W_{rc} + W_{th}) * (S_r - S_{min})}{\#ruedas \text{ por lado} * S_r} + P_{br}$$

$$P_{\text{max-calc}} = \frac{(40 + 2.14) * (40 - 3.17)}{4 * 40} + 1.92$$

$$P_{\text{max-calc}} = 11.62 \frac{\text{kips}}{\text{rueda}}$$

- Carga máxima de las ruedas por catálogo

$$P_{\text{max-nominal}} = 24.3 \frac{\text{kips}}{\text{rueda}}$$

- Valor máximo de la carga soportada por las ruedas

$$P_{max} = \max(P_{\text{max-calc}}; P_{\text{max-nominal}})$$

$$P_{max} = 24.3 \frac{\text{kips}}{\text{rueda}}$$

- Valor mínimo de la carga soportada por las ruedas

$$P_{min} = \frac{(W_{rc} + W_{th}) * S_{min}}{\#ruedas * S_r} + P_{br}$$

$$P_{min} = 2.75 \frac{\text{kips}}{\text{rueda}}$$

Carga de tracción:

$$H_{tr} = 0.2 * P_{max}$$

$$H_{tr} = 0.2 * 24.3$$

$$H_{tr} = 4.86 \text{ kips}$$

Cálculo del momento crítico

Distancia a la que se produce el momento máximo:

$$x' = \frac{3d_1 + 2d_2 + d_3}{4}$$

$$x' = \frac{3(3) + 2(5) + 3}{4}$$

$$x' = 5.5 \text{ ft}$$

$$x = \frac{L_1}{2} - \frac{d_1 + d_2 - x'}{2}$$

$$x = \frac{30}{2} - \frac{3 + 5 - 5.5}{2}$$

$$x = 13.75 \text{ ft}$$

Momento máximo producido por la carga transportada

$$M_{cr} = \frac{4P_{max} * (L_1 - x) * (3L_1^2 - 4(L_1 - x)^2)}{48EI_x}$$

$$M_{cr} = 539.65 \text{ kip} - \text{ft}$$

Momento máximo causado por el peso del riel y la viga carrilera

$$M_{sw} = (U_{rb} + U_{cr}) * \frac{L_{ver}^2}{8}$$

$$M_{sw} = (0.162 + 0.0133) * \frac{30^2}{8}$$

$$M_{sw} = 19.69 \text{ kip} - \text{ft}$$

Cortante máximo por la carga transportada

$$V_{cr} = \frac{P_{max}(4L - 3d_1 - 2d_2 - d_3)}{L_1}$$

$$V_{cr} = \frac{24.3(4 * 30 - 3 * 3 - 2 * 5 - 3)}{30}$$

$$V_{cr} = 79.38 \text{ kips}$$

Cortante máximo por el peso del riel y la viga carrilera

$$V_{sw} = (U_{rb} + U_{cr}) * \frac{L_1}{2}$$

$$V_{sw} = (0.162 + 0.0133) * \frac{30}{2}$$

$$V_{sw} = 2.63 \text{ kips}$$

Cargas de diseño por AISC LRFD

- Momento flector en el eje x-x

$$P_{br} = 1.92 \text{ kips}$$

$$P_{lt} = P_{max} - P_{br}$$

$$P_{lt} = 24.3 - 1.92$$

$$P_{lt} = 22.38 \text{ kips}$$

- Carga vertical

$$P_{vf} = 1.2 P_{br} + 1.6 \alpha P_{lt}$$

$$P_{vf} = 47.07 \text{ kips}$$

- Carga horizontal

$$P_{hf} = \frac{1.6 * 0.2 * (W_{rc} + W_{th})}{4}$$

$$P_{hf} = 1.69 \text{ kips}$$

- Momento flector en el eje x-x

$$M_x = M_{cr} * \frac{P_{vf}}{P_{max}} + 1.2 M_{sw}$$

$$M_x = 1068.87 \text{ kip} - ft$$

- Momento flector en el eje y-y

$$M_y = M_{cr} * \frac{P_{vf}}{P_{max}}$$

$$M_y = 37.43 \text{ kip} - ft$$

- Cortante en el eje y-y

$$V_y = (V_{cr} * \alpha) + V_{sw}$$

$$V_y = (79.38 * 1.25) + 2.63$$

$$V_y = 155.33 \text{ kips}$$

Cargas para el diseño de las columnas

- Reacción en el lado más cercano al gancho por la carga en movimiento

$$R_{cr-c} = 79.38 \text{ kip}$$

- Reacción por el peso de la viga y del riel

$$R_{sw} = 0.5 (U_{rb} + U_{cr})(2 * L_1)$$

$$R_{sw} = 0.5(0.162 + 0.0133)(2 * 30)$$

$$R_{sw} = 89.49 \text{ kips}$$

- Reacción 1:

$$R_1 = R_{cr-c} + R_{sw}$$

$$R_1 = 79.38 + 5.25$$

$$R_1 = 84.63 \text{ kips}$$

Reacción en el lado más lejano al gancho por la carga en movimiento

$$R_{cr-f} = R_{cr-c} * \frac{P_{min}}{P_{max}}$$

$$R_{cr-f} = 79.38 * \frac{2.75}{24.3}$$

$$R_{cr-f} = 8.98 \text{ kips}$$

Reacción por el peso de la viga y del riel

$$R_{sw} = 0.5 (U_{rb} + U_{cr})(2 * L_1)$$

$$R_{sw} = 0.5(0.162 + 0.0133)(2 * 30)$$

$$R_{sw} = 5.25 \text{ kips}$$

Reacción 2:

$$R_2 = R_{cr-f} + R_{sw}$$

$$R_2 = 8.98 + 5.25$$

$$R_2 = 14.23 \text{ kips}$$

Carga de empuje lateral

$$S_{tl} = R_{cr-c} * \frac{P_h}{P_{msx}}$$

$$S_{tl} = 79.38 * \frac{1.05}{24.3}$$

$$S_{tl} = 3.43 \text{ kips}$$

Carga de tracción

$$T_l = R_{cr} * \frac{H_{tr}}{P_{max}}$$

$$T_l = 79.38 * \frac{4.86}{24.3}$$

$$T_l = 15.876 \text{ kips}$$

Momentos para el diseño de la columna:

$$M_1 = R_1 * e_R$$

$$M_1 = 84.63 * 0.75$$

$$M_1 = 63.473 \text{ kips} - ft$$

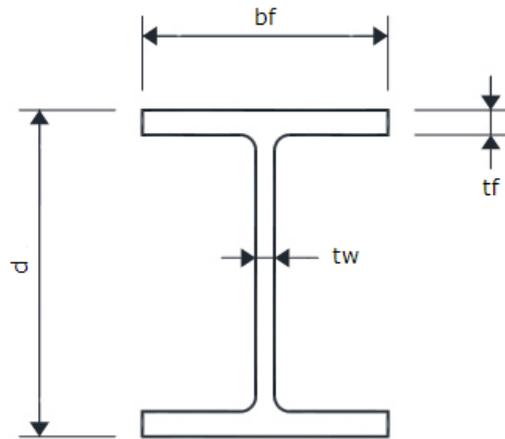
$$M_2 = R_2 * e_L$$

$$M_2 = 14.23 * 0.75$$

$$M_2 = 10.673 \text{ kips} - ft$$

3.7.7.1. Diseño por la norma AISC 360-10

Perfil de viga carrilera: W24x162



**Ilustración 3-35:** Viga carrilera W24x162

Realizado por: Logroño, 2024

- $U_{rb} = 162 \frac{lb}{ft}$
- $f_w = 60 \text{ ksi}$
- $bf = 13 \text{ in}$
- $tf = 1.22 \text{ in}$
- $d = 25 \text{ in}$
- $tw = 0.705 \text{ in}$
- $h = 20 \text{ in}$
- $h_o = 23.8 \text{ in}$
- $A = 16 \text{ in}^2$
- $S_x = 59 \text{ in}^3$
- $S_y = 6.91 \text{ in}^3$
- $Z_x = 104 \text{ in}^3$
- $Z_y = 12.10 \text{ in}^3$
- $r_x = 7.07 \text{ in}$
- $r_y = 1.14 \text{ in}$
- $J = 2.33 \text{ in}^4$
- $C_w = 1550 \text{ in}^6$
- $I_x = 801 \text{ in}^4$
- $I_y = 20.7 \text{ in}^4$

**Calificación del ala y alma**

- Si  $\lambda < \lambda_p$ : Compacta (C)
- Si  $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$ : No Compacta (NC)
- Si  $\lambda > \lambda_r$ : Esbelta (E)

Ala

**Tabla 3-18:** Clasificación del ala del ejercicio 2

$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{13}{2 * 1.22}$ $\lambda = 5.33$	$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ $= 0.38 \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_p = 8.35$	$\lambda_r = 1 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_r = 21.98$
---	---	--

Realizado por: Logroño C., 2024

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow \text{Ala Compacta (C)}$$

Alma

**Tabla 3-19:** Clasificación del alma del ejercicio 2

$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{21.56}{0.705}$ $\lambda = 30.58$	$\lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ $= 0.38 \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_p = 82.66$	$\lambda_r = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_r = 125.31$
---	--	---

Realizado por: Logroño C., 2024

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow \text{Ala Compacta (C)}$$

Sección utilizada para el análisis según la norma AISC 360-10:

*Ala (C) y Alma (C) → F2*

- Momento flector en el eje x-x

Límite a compresión del ala

$$M_{n1} = M_p = F_y * Z_x$$

$$M_{n1} = 2340 \text{ kips} - \text{ft}$$

**Tabla 3-20:** Pandeo lateral torsional

$M \text{ a } \frac{L}{4} \rightarrow M_A$	$M_A = 396.1 \text{ kips} - \text{ft}$
$M_{max} = M_{cr}$	$M_{max} = 539.7 \text{ kips} - \text{ft}$
$M \text{ a } \frac{L}{4} \rightarrow M_B$	$M_B = 534.6 \text{ kips} - \text{ft}$
$M \text{ a } \frac{3L}{4} \rightarrow M_C$	$M_C = 332.9 \text{ kips} - \text{ft}$

Realizado por: Logroño, 2024

$$C_b = \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$

$$C_b = 1.189$$

**Tabla 3-21:** Longitud sin arriostrar

$L_b = L_1$	$L_b = 360 \text{ in}$
$L_p = 1.76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$L_p = 118 \text{ in}$
$r_{ts} = \sqrt{\frac{\sqrt{I_y C_w}}{S_x}}$	$r_{ts} = 3.567 \text{ in}$
$L_r = 1.95 r_{ts} \frac{E}{0.7 F_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6.76 \left( \frac{0.7 F_y S_x h_o}{E Jc} \right)}}$	$L_r = 374.67 \text{ in}$

Realizado por: Logroño, 2024

*Caso 1:  $L_b \leq L_p$*

*El pandeo lateral torisonal no aplica*

*Caso 2:  $L_b > L_r$*

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{Jc}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2}$$

$$M_{n2} = F_{cr} S_x$$

*Caso 3:  $L_p < L_b \leq L_r$*

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

Caso utilizado: Caso 3

$$M_{n2} = 1783.1 \text{ kip} - \text{ft}$$

Momento en el eje x-x

$$M_{nx} = \min(M_{n1}; M_{n2})$$

$$M_{nx} = 1783.1$$

Relación demanda-capacidad

$$\phi = 0.9 \text{ LRFD}$$

$$DC_{\text{moment-xx}} = \frac{M_x}{\phi M_{nx}}$$

$$DC_{moment-xx} = \frac{1068.87}{0.9 * 1783.1}$$

$$DC_{moment-xx} = 0.67$$

*Cumple el criterio de resistencia*

- Deflexión de la viga carrilera

Deflexión vertical

Deflexión permisible vertical (Clase B)

$$\delta_{perm-v} = B_v$$

$$B_v = \frac{L}{600}$$

$$B_v = \frac{30 * 12}{600}$$

$$B_v = 0.6 \text{ in}$$

Deflexión máxima vertical

$$\delta_{max-v} = \frac{P_{max} \left( \frac{L_1 - d_1}{2} \right) \left( 3L_1^2 - 4 \left( \frac{L_1 - d_1}{2} \right)^2 \right)}{24EI_x} * 1728$$

$$\delta_{max-v} = 0.562 \text{ in}$$

Relación demanda-capacidad

$$DC_{def-v} = \frac{\delta_{max-v}}{\delta_{perm-v}}$$

$$DC_{def-v} = \frac{0.562}{0.6}$$

$$DC_{def-v} = 0.94$$

*Cumple el criterio de rigidez*

Límite de deflexión horizontal

$$\delta_{perm-h} = B_h$$

$$B_h = \frac{L}{400}$$

$$B_h = \frac{30 * 12}{400}$$

$$B_h = 0.9 \text{ in}$$

Deflexión máxima horizontal

$$I_t = \frac{bf^3 * tf}{12}$$

$$I_t = 223.4 \text{ in}^4$$

$$\delta_{max-h} = \delta_{max-v} * \frac{I_x}{I_t} * \frac{P_h}{P_{max}}$$

$$\delta_{max-h} = 0.564$$

Relación demanda-capacidad

$$DC_{def-h} = \frac{\delta_{max-h}}{\delta_{perm-h}}$$

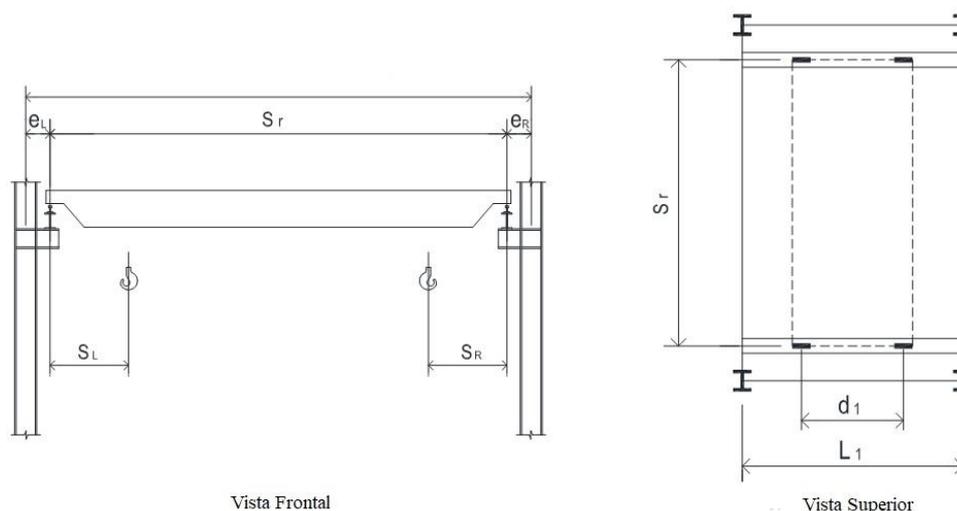
$$DC_{def-h} = \frac{0.564}{0.9}$$

$$DC_{def-h} = 0.63$$

Cumple el criterio de rigidez

### 3.7.8. Ejercicio N°3 de aplicación (4 ruedas, métrico)

#### 3.7.8.1. Datos del puente grúa



**Ilustración 3-36:** Dimensiones ejercicio 3

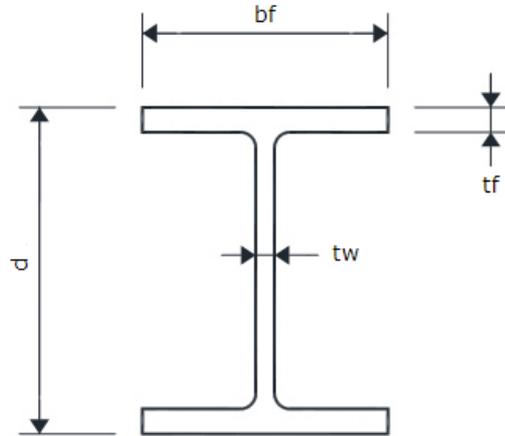
Realizado por: Logroño, 2024

- Normas de diseño: CMAA No. 70 y 74, CSA S16-01, AISC 360-10
- Número de ruedas por lado del carro: 4
- Clase de servicio según la CMAA: *Clase C (pesado)*
- Capacidad del puente grúa:  $W_{rc} = 178 \text{ kN}$
- Peso de la grúa:  $W_{br} = 66.75 \text{ kN}$
- Peso del carro principal y del polipasto:  $W_{th} = 9 \text{ kN}$
- Distancia entre centros de las ruedas de los carros testers:  $d_1 = 1 \text{ m}$ ;  $d_2 = 1.5 \text{ m}$ ;  $d_3 = 1 \text{ m}$
- Carga máxima nominal (catálogo) para las ruedas de los carros testers:  $P_{max} = 110 \text{ kN}$
- Luz de la viga:  $S_r = 3.81 \text{ m}$
- Distancia mínima entre el carro y el final de la viga por lado izquierdo:  $S_L = 1 \text{ m}$
- Distancia mínima entre el carro y el final de la viga por lado derecho:  $S_R = 1 \text{ m}$

- Distancia entre la columna y la viga principal:  $e_{L-R} = 0.25 \text{ ft}$
- Distancia entre las columnas de apoyo (claro):  $L_1 = 9.15 \text{ m}$
- Factor de impacto vertical: 20%

### 3.7.8.2. Propiedades de la viga carrilera y del riel

Perfil de viga carrilera: W14x342

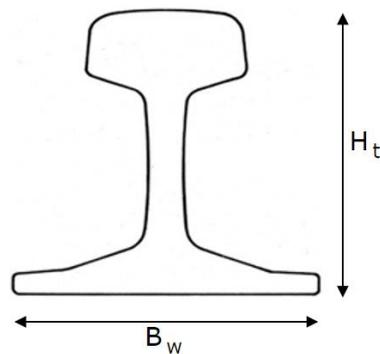


**Ilustración 3-37:** Viga carrilera W14x342

Realizado por: Logroño, 2024

- $U_{rb} = 162 \frac{lb}{ft}$
- $f_w = 60 \text{ ksi}$
- $bf = 16.4 \text{ in}$
- $tf = 2.47 \text{ in}$
- $d = 17.5 \text{ in}$
- $tw = 1.548 \text{ in}$

Perfil del riel: ASCE 40



**Ilustración 3-38:** Riel ASCE 40

Realizado por: Logroño, 2024

- $U_{cr} = 40 \frac{lb}{yd}$
- $B_w = 3 \frac{1}{2} in$
- $H_t = 3 \frac{1}{2} in$

### 3.7.8.3. Carga de empuje lateral de la grúa

**Tabla 3-22:** Opciones carga de empuje lateral

Opción 1:	$H_s$	$0.2 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ carro)$
Opción 2:	$H_s = max$	$0.2 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ carro)$
		$0.1 * (Carga\ elevada + Peso\ total\ del\ puente\ grúa)$
Opción 3:	$H_s = max$	$0.2 * (Carga\ elevada + Peso\ del\ carro)$
		$0.1 * (Carga\ elevada + Peso\ total\ del\ puente\ grúa)$
		$0.4 * Carga\ elevada$
Opción 4:	$H_s$	$1.0 * Carga\ elevada\ como\ epuje\ lateral$
Opción 5:	$H_s$	$2.0 * Carga\ elevada\ como\ epuje\ lateral$

Realizado por: Logroño, 2024

### 3.7.9. Cálculo de las cargas soportadas por el perfil de la viga carrilera

Peso de la viga carrilera:

$$W_{14x342}$$

$$U_{br} = 342 \frac{lb}{ft} = 0.342 \frac{kip}{ft} = 5 \frac{kN}{m}$$

Peso del riel:

$$ASCE\ 40$$

$$U_{cr} = 40 \frac{lb}{yd} = 0.0133 \frac{kip}{ft} = 0.2 \frac{kN}{m}$$

Peso de la viga carrilera y del riel:

$$R_{sw} = (U_{rb} + U_{cr}) * L_1$$

$$R_{sw} = (5 + 0.2) * 9.15$$

$$R_{sw} = 47.58\ kN$$

Carga de las ruedas por el peso propio del puente:

$$P_{br} = \frac{66.75}{\#ruedas * 2\ lados}$$

$$P_{br} = \frac{66.75}{4 * 2}$$

$$P_{br} = 8.34 \frac{kN}{rueda}$$

Carga de empuje lateral: Opción 2

$$H_{s2} = 0.2 * Carga\ elevada$$

$$H_{s2} = 0.2 * (W_{rc} + W_{th})$$

$$H_{s2} = 0.2 * (178 + 9)$$

$$H_{s2} = 37.4 \text{ kN}$$

$$H_{st} = \frac{H_{s2}}{\#ruedas * 2\text{ lados}}$$

$$H_{st} = \frac{37.4}{8}$$

$$H_{st} = 4.7 \frac{\text{kN}}{\text{ruedas}}$$

$$H_{st} = P_h$$

Carga Vertical:

- Distancia mínima del gancho:

$$S_{min} = \min(S_L ; S_R)$$

$$S_{min} = \min(1 ; 1)$$

$$S_{min} = 1 \text{ m}$$

- Carga máxima de las ruedas por cálculo

$$P_{\text{max-calc}} = \frac{(W_{rc} + W_{th}) * (S_r - S_{min})}{\#ruedas \text{ por lado} * S_r} + P_{br}$$

$$P_{\text{max-calc}} = 43 \frac{\text{kN}}{\text{rueda}}$$

- Carga máxima de las ruedas por catálogo

$$P_{\text{max-nominal}} = 110 \frac{\text{kN}}{\text{rueda}}$$

- Valor máximo de la carga soportada por las ruedas

$$P_{max} = \max(P_{\text{max-calc}}; P_{\text{max-nominal}})$$

$$P_{max} = 110 \frac{\text{kN}}{\text{rueda}}$$

- Valor mínimo de la carga soportada por las ruedas

$$P_{min} = \frac{(W_{rc} + W_{th}) * S_{min}}{\#ruedas * S_r} + P_{br}$$

$$P_{min} = 20.42 \frac{\text{kN}}{\text{rueda}}$$

Carga de tracción:

$$H_{tr} = 0.2 * P_{max}$$

$$H_{tr} = 21.93 \text{ kN}$$

Cálculo del momento crítico

Distancia a la que se produce el momento máximo:

$$x' = \frac{3d_1 + 2d_2 + d_3}{4}$$
$$x' = \frac{3(1) + 2(1.5) + 1}{4}$$
$$x' = 1.75 \text{ m}$$
$$x = \frac{L_1}{2} - \frac{d_1 + d_2 - x'}{2}$$
$$x = 4.2 \text{ m}$$

Momento máximo producido por la carga transportada

$$M_{cr} = \frac{4P_{max} * (L_1 - x) * (3L_1^2 - 4(L_1 - x)^2)}{48EI_x}$$
$$M_{cr} = 543.4 \text{ kN} - m$$

Momento máximo causado por el peso del riel y la viga carrilera

$$M_{sw} = (U_{rb} + U_{cr}) * \frac{L_{ver}^2}{8}$$
$$M_{sw} = 54.2 \text{ kN} - m$$

Cortante máximo por la carga transportada

$$V_{cr} = \frac{P_{max}(4L - 3d_1 - 2d_2 - d_3)}{L_1}$$
$$V_{cr} = 352 \text{ kN}$$

Cortante máximo por el peso del riel y la viga carrilera

$$V_{sw} = (U_{rb} + U_{cr}) * \frac{L_1}{2}$$
$$V_{sw} = 23.7 \text{ kN}$$

Cargas de diseño por AISC LRFD

- Momento flector en el eje x-x

$$P_{lt} = P_{max} - P_{br}$$
$$P_{lt} = 101.55 \text{ kN}$$

- Carga vertical

$$P_{vf} = 1.2 P_{br} + 1.6 \alpha P_{lt}$$
$$P_{vf} = 213 \text{ kN}$$

- Carga horizontal

$$P_{hf} = \frac{1.6 * 0.2 * (W_{rc} + W_{th})}{4}$$

$$P_{hf} = 7.5 \text{ kN}$$

- Momento flector en el eje x-x

$$M_x = M_{cr} * \frac{P_{vf}}{P_{max}} + 1.2 M_{sw}$$

$$M_x = 1493.6 \text{ kN} - m$$

- Momento flector en el eje y-y

$$M_y = M_{cr} * \frac{P_{vf}}{P_{max}}$$

$$M_y = 50.12 \text{ kN} - m$$

- Cortante en el eje y-y

$$V_y = (V_{cr} * \alpha) + V_{sw}$$

$$V_y = 711.7 \text{ kN} - m$$

Cargas para el diseño de las columnas

- Reacción en el lado más cercano al gancho por la carga en movimiento

$$R_{cr-c} = 352 \text{ kN} - m$$

- Reacción por el peso de la viga y del riel

$$R_{sw} = 0.5 (U_{rb} + U_{cr})(2 * L_1)$$

$$R_{sw} = 47.37 \text{ kN} - m$$

- Reacción 1:

$$R_1 = R_{cr-c} + R_{sw}$$

$$R_1 = 426.8 \text{ kN}$$

Reacción en el lado más lejano al gancho por la carga en movimiento

$$R_{cr-f} = R_{cr-c} * \frac{P_{min}}{P_{max}}$$

$$R_{cr-f} = 70.5 \text{ kN}$$

Reacción por el peso de la viga y del riel

$$R_{sw} = 0.5 (U_{rb} + U_{cr})(2 * L_1)$$

$$R_{sw} = 47.37 \text{ kN} - m$$

Reacción 2:

$$R_2 = R_{cr-f} + R_{sw}$$

$$R_2 = 117.9 \text{ kN} - m$$

Carga de empuje lateral

$$S_{tl} = R_{cr-c} * \frac{P_h}{P_{msx}}$$

$$S_{tl} = 15.25 \text{ kN}$$

Carga de tracción

$$T_l = R_{cr} * \frac{H_{tr}}{P_{max}}$$

$$T_l = 75.89 \text{ kN}$$

Momentos para el diseño de la columna:

$$M_1 = R_1 * e_R$$

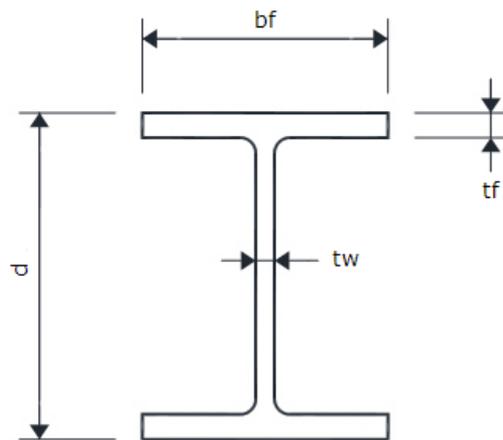
$$M_1 = 107 \text{ kN} - m$$

$$M_2 = R_2 * e_L$$

$$M_2 = 30 \text{ kN} - m$$

3.7.9.1. Diseño por la norma AISC 360-10

Perfil de viga carrilera: W14x342



**Ilustración 3-39:** Viga carrilera W14x342

Realizado por: Logroño, 2024

- $U_{rb} = 342 \frac{lb}{ft}$
- $f_w = 60 \text{ ksi}$
- $bf = 16.4 \text{ in}$
- $tf = 2.47 \text{ in}$
- $d = 17.5 \text{ in}$
- $tw = 1.54 \text{ in}$
- $h = 11.36 \text{ in}$
- $h_o = 15 \text{ in}$
- $A = 101 \text{ in}^2$
- $S_x = 558 \text{ in}^3$
- $S_y = 221 \text{ in}^3$
- $Z_x = 672 \text{ in}^3$
- $Z_y = 338 \text{ in}^3$
- $r_x = 6.98 \text{ in}$
- $r_y = 4.24 \text{ in}$
- $J = 178 \text{ in}^4$
- $C_w = 103000 \text{ in}^6$
- $I_x = 4900 \text{ in}^4$
- $I_y = 1810 \text{ in}^4$

### Calificación del ala y alma

- Si  $\lambda < \lambda_p$ : Compacta (C)
- Si  $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$ : No Compacta (NC)
- Si  $\lambda > \lambda_r$ : Esbelta (E)

**Tabla 3-23:** Clasificación del ala del ejercicio 1

$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} = \frac{16.4}{2 * 2.47}$ $\lambda = 3.32$	$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ $= 0.38 \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_p = 8.35$	$\lambda_r = 1 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_r = 21.98$
---	---	--

Realizado por: Logroño C., 2024

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow \text{Ala Compacta (C)}$$

Alma

**Tabla 3-24:** Clasificación del alma del ejercicio 1

$\lambda = \frac{h}{t_w} = \frac{11.36}{1.54}$ $\lambda = 7.38$	$\lambda_p = 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ $= 0.38 \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_p = 82.66$	$\lambda_r = 5.7 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = \sqrt{\frac{29000 \text{ ksi}}{60 \text{ ksi}}}$ $\lambda_r = 125.31$
---	--	---

Realizado por: Logroño C., 2024

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow \text{Ala Compacta (C)}$$

Sección utilizada para el análisis según la norma AISC 360-10:

*Ala (C) y Alma (C) → F2*

- Momento flector en el eje x-x  
Límite a compresión del ala

$$M_{n1} = M_p = F_y * Z_x$$

$$M_{n1} = 4555 \text{ kN} - \text{m}$$

**Tabla 3-25:** Pandeo lateral torsional

$M \text{ a } \frac{L}{4} \rightarrow M_A$	$M_A = 543.7 \text{ kN} - \text{m}$
$M_{max} = M_{cr}$	$M_{max} = 736.75 \text{ kN} - \text{m}$

$M a \frac{L}{4} \rightarrow M_B$	$M_B = 730.1 \text{ kN} - m$
$M a \frac{3L}{4} \rightarrow M_C$	$M_C = 460.98 \text{ kN} - m$

Realizado por: Logroño, 2024

$$C_b = \frac{12.5 M_{max}}{2.5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$

$$C_b = 1.189$$

**Tabla 3-26:** Longitud sin arriostrar

$L_b = L_1$	$L_b = 914.4 \text{ cm}$
$L_p = 1.76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$L_p = 416.7 \text{ cm}$
$r_{ts} = \sqrt{\frac{I_y C_w}{S_x}}$	$r_{ts} = 12.57 \text{ cm}$
$L_r = 1.95 r_{ts} \frac{E}{0.7 F_y} \sqrt{\frac{Jc}{S_x h_o}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6.76 \left( \frac{0.7 F_y S_x h_o}{E Jc} \right)}}$	$L_r = 3499.1 \text{ cm}$

Realizado por: Logroño, 2024

$$\text{Caso 1: } L_b \leq L_p$$

*El pandeo lateral torisonal no aplica*

$$\text{Caso 2: } L_b > L_r$$

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{Jc}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2}$$

$$M_{n2} = F_{cr} S_x$$

$$\text{Caso 2: } L_p < L_b \leq L_r$$

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

Caso utilizado: Caso <2>

$$M_{n2} = 4555 \text{ kN} - m$$

Momento en el eje x-x

$$M_{nx} = \min(M_{n1}; M_{n2})$$

$$M_{nx} = 4555 \text{ kN} - \text{m}$$

Relación demanda-capacidad

$$\phi = 0.9 \text{ LRFD}$$

$$DC_{moment-xx} = \frac{M_x}{\phi M_{nx}}$$

$$DC_{moment-xx} = \frac{1494}{0.9 * 4555}$$

$$DC_{moment-xx} = 0.36$$

*Cumple el criterio de resistencia*

- Deflexión de la viga carrilera

Deflexión vertical

Deflexión permisible vertical (Clase B)

$$\delta_{perm-v} = B_v$$

$$B_v = \frac{L}{600}$$

$$B_v = 0.015 \text{ in}$$

Deflexión máxima vertical

$$\delta_{max-v} = \frac{P_{max} \left( \frac{L_1 - d_1}{2} \right) \left( 3L_1^2 - 4 \left( \frac{L_1 - d_1}{2} \right)^2 \right)}{24EI_x} * 1728$$

$$\delta_{max-v} = 0.015 \text{ m}$$

Relación demanda-capacidad

$$DC_{def-v} = \frac{\delta_{max-v}}{\delta_{perm-v}}$$

$$DC_{def-v} = \frac{0.015}{0.015}$$

$$DC_{def-v} = 1$$

*Cumple el criterio de rigidez*

Límite de deflexión horizontal

$$\delta_{perm-h} = B_h$$

$$B_h = \frac{L}{400}$$

$$B_h = \frac{9.15}{400}$$

$$B_h = 0.023 \text{ m}$$

Deflexión máxima horizontal

$$I_t = \frac{bf^3 * tf}{12}$$

$$I_t = 907.92 \text{ in}^4$$

$$\delta_{max-h} = \delta_{max-v} * \frac{I_x}{I_t} * \frac{P_h}{P_{max}}$$

$$\delta_{max-h} = 0.003$$

$$DC_{def-h} = \frac{\delta_{max-h}}{\delta_{perm-h}}$$

$$DC_{def-h} = \frac{0.003}{0.023}$$

$$DC_{def-h} = 0.15$$

*Cumple el criterio de rigidez*

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS

La validación de software es un proceso esencial en el desarrollo de aplicaciones, destinado a garantizar que el software cumpla con los requisitos y expectativas establecidos por los usuarios y las partes interesadas. En el contexto del software de diseño de vigas de carril, la validación adquiere una importancia aún mayor, ya que la seguridad y la integridad estructural de las infraestructuras dependen en gran medida de la precisión y confiabilidad de este tipo de herramientas.

El presente apartado tiene como objetivo llevar a cabo una evaluación exhaustiva del software de diseño de vigas de carril, con el fin de verificar su funcionalidad, usabilidad, rendimiento y seguridad. Se busca asegurar que el software cumpla con los estándares de calidad requeridos y que sea capaz de proporcionar resultados precisos y confiables en el diseño y cálculo de vigas de carril para diversas aplicaciones y escenarios.

En este apartado, se describirán los objetivos de la evaluación, los criterios de evaluación y las metodologías utilizadas para llevar a cabo la validación del software. Además, se presentarán los resultados de la evaluación y se ofrecerán recomendaciones para mejorar el software y abordar posibles áreas de mejora identificadas durante el proceso de validación.

La validación de software es un proceso continuo y dinámico que requiere la colaboración de múltiples partes interesadas, incluidos los desarrolladores, los usuarios finales y los expertos en el dominio de la ingeniería estructural. Al realizar una evaluación rigurosa y sistemática del software de diseño de vigas de carril, se contribuye a garantizar la seguridad y la calidad de las infraestructuras ferroviarias, así como a mejorar la eficiencia y la productividad en el diseño y la construcción de estas.

#### 4.1. Validación por comparación

##### 4.1.1. Alcance

La validación por comparación se enfocará en verificar la precisión y coherencia de los resultados obtenidos por el software de diseño de vigas de carril en comparación con resultados de referencia calculados manualmente o disponibles en la literatura técnica. Se evaluarán diferentes casos de prueba que abarquen una variedad de situaciones y condiciones de diseño típicas en ingeniería ferroviaria.

##### 4.1.2. Objetivos

Los objetivos para la validación por comparación del software de diseño de vigas de carril son: Verificar la precisión de los cálculos realizados por el software en comparación con resultados conocidos o aceptados.

- Evaluar la consistencia de los resultados obtenidos en diferentes condiciones de entrada.

- Identificar y corregir posibles discrepancias o errores en los cálculos realizados por el software.
- Validar el rendimiento del software en una variedad de casos de uso representativos de situaciones reales.
- Proporcionar confianza a los usuarios en la exactitud y fiabilidad del software para su aplicación en proyectos de diseño de vigas de carril.
- Contribuir al proceso de mejora continua del software mediante la identificación de áreas de mejora y optimización.
- Documentar de manera exhaustiva los resultados de la validación y cualquier hallazgo relevante para garantizar la transparencia y trazabilidad del proceso.

#### **4.2. Definición de los casos de Prueba**

Los casos de prueba que se muestran a continuación serán los empleados para verificar que el software sea correcto en cuanto a los resultados obtenidos, se tomarán en cuenta los diferentes tipos de sistema y configuraciones de puentes posibles para poder solventar la mayoría de los casos de diseño.

##### **4.2.1. *Dos ruedas con sistema métrico***

- Configuración: Dos ruedas colocadas simétricamente en la viga de carril.
- Unidades de medida: Sistema métrico (metros, kilonewtons, megapascales, etc.).
- Entradas: Dimensiones de la viga, carga aplicada por las dos ruedas, propiedades del material, etc.
- Salida esperada: Resultados de los cálculos de esfuerzos, deflexiones y factores de seguridad.

##### **4.2.2. *Dos ruedas con sistema inglés***

- Configuración: Dos ruedas colocadas simétricamente en la viga de carril.
- Unidades de medida: Sistema inglés (pies, libras, psi, etc.).
- Entradas: Dimensiones de la viga, carga aplicada por las dos ruedas, propiedades del material.
- Salida esperada: Resultados de los cálculos de esfuerzos, deflexiones y factores de seguridad.

##### **4.2.3. *Cuatro ruedas con sistema métrico***

- Configuración: Cuatro ruedas colocadas simétricamente en la viga de carril.
- Unidades de medida: Sistema métrico (metros, kilonewtons, megapascales, etc.).
- Entradas: Dimensiones de la viga, carga aplicada por las cuatro ruedas, propiedades del material.

- Salida esperada: Resultados de los cálculos de esfuerzos, deflexiones y factores de seguridad.

#### 4.2.4. *Cuatro ruedas con sistema inglés*

- Configuración: Cuatro ruedas colocadas simétricamente en la viga de carril.
- Unidades de medida: Sistema inglés (pies, libras, psi, etc.).
- Entradas: Dimensiones de la viga, carga aplicada por las cuatro ruedas, propiedades del material.
- Salida esperada: Resultados de los cálculos de esfuerzos, deflexiones y factores de seguridad.

Estos casos de prueba permitirán verificar la capacidad del software para manejar diferentes configuraciones de carga y unidades de medida, garantizando así su versatilidad y precisión en diversos contextos de aplicación.

### 4.3. **Obtención de Resultados de referencia**

Con los casos de prueba establecidos, se realizó el cálculo detallado de cada uno de los escenarios, donde se encontraron resultados, de cargas, deflexiones y momentos críticos que se emplearán para conocer los resultados del diseño y compararlos con el software.

#### 4.3.1. *Dos ruedas con sistema inglés*

**Tabla 4-1:** Resultados para el ejercicio práctico con 2 ruedas en sistema inglés

Momento en x	$M_x$	61.1
Momento nominal del perfil	$M_{nx}$	270.56
Relación demanda-capacidad por resistencia	$r_M$	0.25
Deflexión máxima vertical	$\delta_{max-v}$	0.05
Relación demanda-capacidad por flexión vertical	$r_{DC-v}$	0.167
Deflexión máxima horizontal	$\delta_{max-h}$	0.285
Relación demanda-capacidad por flexión horizontal	$r_{DC-H}$	0.633

Realizado por: Logroño, 2024

#### 4.3.2. *Dos ruedas con sistema métrico*

**Tabla 4-2:** Resultados para el ejercicio práctico con 2 ruedas en sistema métrico

Momento en x	$M_x$	578.8
Momento nominal del perfil	$M_{nx}$	1070.15
Relación demanda-capacidad por resistencia	$r_M$	0.6

Deflexión máxima vertical	$\delta_{max-v}$	0.015
Relación demanda-capacidad por flexión vertical	$r_{DC-v}$	0.938
Deflexión máxima horizontal	$\delta_{max-h}$	0.0154
Relación demanda-capacidad por flexión horizontal	$r_{DC-H}$	0.642

Realizado por: Logroño, 2024

#### 4.3.3. Cuatro ruedas con sistema inglés

**Tabla 4-3:** Resultados para el ejercicio práctico con 4 ruedas en sistema inglés

Momento en x	$M_x$	1068.87
Momento nominal del perfil	$M_{nx}$	1738.1
Relación demanda-capacidad por resistencia	$r_M$	0.68
Deflexión máxima vertical	$\delta_{max-v}$	0.562
Relación demanda-capacidad por flexión vertical	$r_{DC-v}$	0.94
Deflexión máxima horizontal	$\delta_{max-h}$	0.564
Relación demanda-capacidad por flexión horizontal	$r_{DC-H}$	0.63

Realizado por: Logroño, 2024

#### 4.3.4. Cuatro ruedas con sistema métrico

**Tabla 4-4:** Resultados para el ejercicio práctico con 4 ruedas en sistema métrico

Momento en x	$M_x$	1494
Momento nominal del perfil	$M_{nx}$	4555
Relación demanda-capacidad por resistencia	$r_M$	0.364
Deflexión máxima vertical	$\delta_{max-v}$	0.562
Relación demanda-capacidad por flexión vertical	$r_{DC-v}$	0.94
Deflexión máxima horizontal	$\delta_{max-h}$	0.564
Relación demanda-capacidad por flexión horizontal	$r_{DC-H}$	0.63

Realizado por: Logroño, 2024

#### 4.4. Aplicación del Software

##### 4.4.1. Interfaz de Bienvenida

El software se inicia con una pequeña ventana de bienvenida que indica los datos de referencia de los desarrolladores y los involucrados en el proyecto, las instituciones y las personas encargadas de la revisión del proyecto, con un pequeño botón de inicio del programa.



**Ilustración 4-1:** Interfaz de bienvenida

Realizado por: Logroño, 2024

##### 4.4.2. Usuario y Contraseña

El software trabaja con una pequeña verificación de inicio de sesión de tipo usuario – contraseña, en el cual se accederá al software en el caso de que las credenciales son las adecuadas, además, en la misma ventana seremos capaces de registrar un nuevo usuario dentro de la base de datos del software, mediante un botón de registro, con lo cual se garantiza el acceso a nuevos usuarios en el caso de ser requerido.



**Ilustración 4-2:** Usuario y contraseña

Realizado por: Logroño, 2024

#### **4.4.3. Configuración de grúa y selección del sistema de unidades**

Luego de iniciar sesión de manera adecuada, se presenta una pequeña interfaz de configuración en donde se van a poder escoger dos aspectos fundamentales para el cálculo, la configuración de la grúa, es decir, cuantas ruadas por lado va a tener que soportar el riel, y el sistema de unidades empleado, que interviene directamente en el cálculo, las fórmulas empleadas y los perfiles con los que se vaya a trabajar, esto se muestra mediante dos combobox con cada uno de estos parámetros, y un botón para iniciar este programa con la configuración indicada.

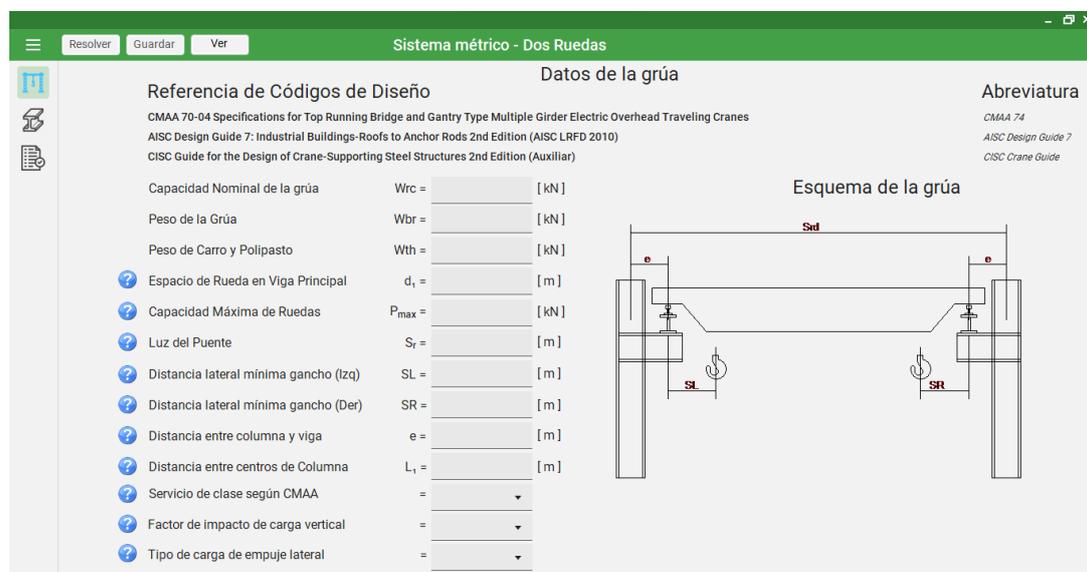


**Ilustración 4-3:** Configuración inicial

Realizado por: Logroño, 2024

#### 4.4.4. Ingreso de datos

A continuación, se presenta la interfaz principal del software, en la cual se realizarán todas las acciones posibles del software, incluidos el ingreso de los datos, el cálculo y la presentación de los resultados, así como el guardado de los ejercicios realizados, dentro de esta interfaz se ingresan los datos del puente grúa, así como las dimensiones para el carril y los diferentes perfiles que se vayan a emplear, en la primera pestaña, ingresamos los datos de la grúa, dentro de lo que se incluyen los parámetros de cargas, peso de la grúa y sus dimensiones,



**Ilustración 4-4:** Ingreso de datos

Realizado por: Logroño, 2024

#### 4.5. Comparación de resultado

Los resultados que se pueden extraer del software se comparan con los cuatro casos de ejercicios probables que se realizaron de manera manual dentro de la metodología del proyecto, teniendo una comparación clara de cada uno de los resultados, donde se obtienen los siguientes resultados comenzando con el sistema conformado por dos ruedas en dimensiones del sistema inglés.

##### 4.5.1. Dos ruedas con sistema inglés

**Tabla 4-5:** Resultados para el ejercicio práctico con 2 ruedas en sistema inglés

Resultado	Cálculo Manual	Software
Momento en x	61.11	61.1
Momento nominal del perfil	270.54	270.56
Relación demanda-capacidad por resistencia	0.25	0.25
Deflexión máxima vertical	0.05	0.05
Relación demanda-capacidad por flexión vertical	0.167	0.167
Deflexión máxima horizontal	0.285	0.285
Relación demanda-capacidad por flexión horizontal	0.633	0.633

Realizado por: Logroño, 2024

Se observa que en este caso el cálculo manual no difiere en mayor medida con los resultados del software, si esto pasa con frecuencia se puede atribuir a que la mayoría de los cálculos manuales se tomaron con el uso de tres decimales, mientras que los cálculos de software al ser una calculadora virtual, son completamente exactos y no pierden decimales, mismo aspecto que se muestra cuando se nota que los resultados que implican cantidades pequeñas no se alteran en gran medida, como la deflexión máxima vertical o la relación demanda capacidad que apenas se ve mermada en este sistema

El sistema más común en el entorno industrial nacional es el sistema conformado por un puente grúa con dos ruedas y el sistema métrico, cuyos resultados se aprecian en la siguiente tabla, se tiene que tomar en cuenta que las fórmulas originales se encuentran en el sistema inglés, por lo que el sistema métrico es una adaptación de las mismas para nuestro propio entorno empresarial.

##### 4.5.2. Cuatro ruedas con sistema métrico

**Tabla 4-6:** Resultados para el ejercicio práctico con 2 ruedas en sistema métrico

Resultado	Cálculo Manual	Software
Momento en x	578.6	578.8
Momento nominal del perfil	1070.25	<u>1070.15</u>

Relación demanda-capacidad por resistencia	0.59	0.6
Deflexión máxima vertical	0.015	0.015
Relación demanda-capacidad por flexión vertical	0.94	0.938
Deflexión máxima horizontal	0.0154	0.0154
Relación demanda-capacidad por flexión horizontal	0.642	0.642

**Realizado por:** Logroño, 2024

En los resultados obtenidos mediante software se observa una exactitud mayor a los resultados que se obtienen por el cálculo manual, esto es debido a que las fórmulas se vuelven un poco más pequeñas en cuanto a sus magnitudes debido a que las mismas tienen una relación de conversión menor en comparación con el sistema inglés, esto incide directamente en la exactitud de las aproximaciones que se realizan el cálculo manual de las cantidades las cuales tienden a acortarse un poco, estos resultados son visibles de manera clara en los números con un mayor número de cifras, los cuales varían en decimales, pero es apenas divisible en las cantidades pequeñas como las deflexiones o la demanda capacidad.

#### 4.5.3. *Cuatro ruedas con sistema inglés*

A continuación, tenemos que comparar los resultados del sistema inglés funcionando con un puente grúa de cuatro ruedas, sistema muy poco empleado en la industria debido a su alto costo de elaboración, pero que es muy empleado en el sector de la construcción y el montaje, se espera para esta comparación resultados similares el del sistema inglés de 2 ruedas.

**Tabla 4-7:** Resultados para el ejercicio práctico con 4 ruedas en sistema inglés

Resultados	Cálculo Manual	Software
Momento en x	1068.86	1068.87
Momento nominal del perfil	1738.1	1738.1
Relación demanda-capacidad por resistencia	0.69	0.68
Deflexión máxima vertical	0.561	0.562
Relación demanda-capacidad por flexión vertical	0.94	0.94
Deflexión máxima horizontal	0.56	0.564

Relación demanda-capacidad por flexión horizontal	0.63	0.63
--	------	------

Realizado por: Logroño, 2024

Los resultados son los esperados, debido a que lo que principalmente se puede apreciar es un ligero cambio dentro de los valores considerados magnitudes más grandes a comparación con el software dentro del cálculo manual, debido en gran parte a la imposibilidad de emplear todos los decimales durante el cálculo, esto es esperable y está dentro de los parámetros que se pueden considerar normales dentro de un cálculo de diseño de ingeniería, esto se comprueba además en los cálculos de deflexiones, donde se puede apreciar un resultado similar y un diseño adecuado.

#### 4.5.4. Cuatro ruedas con sistema métrico

El último de los sistemas que debemos comprobar es el conformado por cuatro ruedas en el sistema métrico, en este sistema es esperable que la mayoría de los momentos y las deflexiones se vuelvan un poco menores a su contraparte de dos ruedas, esto debió al aumento de puntos de apoyo, esta configuración es habitual para puentes grúa que requieran mayor cantidad de carga de trabajo, observando los siguientes resultados.

**Tabla 4-8:** Resultados para el ejercicio práctico con 4 ruedas en sistema métrico

Resultados	Cálculo Manual	Software
Momento en x	1494	1494
Momento nominal del perfil	4555	4555
Relación demanda-capacidad por resistencia	0.36	0.364
Deflexión máxima vertical	0.56	0.562
Relación demanda-capacidad por flexión vertical	0.94	0.94
Deflexión máxima horizontal	0.56	0.564
Relación demanda-capacidad por flexión horizontal	0.63	0.63

Realizado por: Logroño, 2024

Como se puede apreciar en los resultados obtenidos por ambos métodos, las cantidades son prácticamente iguales, salvo que en el cálculo manual se eliminan un poco los decimales debido a que se emplean un número determinado de decimales para simplificar el cálculo, pero cuyas diferencias no son relevantes para el diseño, dando como válido el software.

#### 4.6. Análisis de Discrepancia

Se reúnen todos los resultados obtenidos en la comparación de los ejercicios manuales con la ejecución del software, y se realiza un análisis de discrepancia de los resultados de 4 niveles, sin

discrepancia, mínima, moderada y grave, para lo cual se emplea una tabla unificando los valores que se obtuvieron analizando su diferencia relativa o error absoluto.

**Tabla 4-9:** Análisis de discrepancias

Resultados	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Total	Discrepancia
Momento en x	0,01	0,2	0,01	0,01	0,23	Moderada
Momento nominal del perfil	0,02	0,1	0	0	0,12	Moderada
Relación demanda-capacidad por resistencia	0	0,01	0,01	0,01	0,03	Mínima
Deflexión máxima vertical	0	0	0,001	0,001	0,002	Mínima
Relación demanda-capacidad por flexión vertical	0	0,002	0	0	0,002	Mínima
Deflexión máxima horizontal	0	0	0,004	0,004	0,008	Mínima
Relación demanda-capacidad por flexión horizontal	0	0	0	0	0	Sin Discrepancia

Realizado por: Logroño, 2024

1. **Momento en x:** La diferencia entre los resultados es mínima, lo que indica una coincidencia casi exacta entre el cálculo manual y el software.
2. **Momento nominal del perfil:** No hay discrepancia entre los resultados del cálculo manual y el software.
3. **Relación demanda-capacidad por resistencia:** Existe una discrepancia moderada entre los resultados, con una ligera diferencia en los valores.
4. **Deflexión máxima vertical:** La diferencia entre los resultados es mínima, lo que sugiere una coincidencia cercana entre el cálculo manual y el software.
5. **Relación demanda-capacidad por flexión vertical:** No hay discrepancia entre los resultados del cálculo manual y el software.
6. **Deflexión máxima horizontal:** Existe una discrepancia moderada entre los resultados, con una diferencia notable en los valores.
7. **Relación demanda-capacidad por flexión horizontal:** No hay discrepancia entre los resultados del cálculo manual y el software.

Como podemos apreciar, la mayoría de los resultados muestran una coincidencia cercana entre el cálculo manual y el software, con discrepancias mínimas o inexistentes en algunos casos. Sin embargo, en algunos aspectos, como los momentos, hay discrepancias moderadas que podrían requerir una revisión adicional para determinar la causa exacta de las diferencias, aunque no son determinantes en cuanto al diseño mecánico debido a de la relación demanda capacidad apenas se ve afectada.

#### 4.7. Optimización y mejora

Con el objetivo de mejorar la exactitud del modelo y tratar de mermar la discrepancia presente en varios cálculos en comparación con el cálculo manual verificado, un procedimiento muy usual es cambiar el tipo de variable empleada, esto debido a que el lenguaje de programación C# admite dos tipos de variables para números naturales, float y double cuya principal diferencia radica en la precisión que posee cada uno, la variable float posee aproximadamente 7 dígitos decimales de precisión, y la variable double tiene 15 dígitos decimales de precisión.

La elección entre double y float depende de varios factores, debido a que la precisión es relativa de acuerdo a los valores y las ecuaciones de aplicación, si se requiere una aplicación con mayor precisión es recomendable emplear double, sin embargo, el gasto computacional también se duplica por lo que es necesario determinar si es una opción viable o resulta en cálculos similares a los empleados por el procedimiento anterior, cuyos resultados para un ejercicio práctico se muestran en la siguiente tabla, recalando que para estudiar el procedimiento se quitó el redondeo obligatorio de los resultados, y se muestra toda la magnitud del parámetro de diseño.

**Tabla 4-10:** Optimización y mejora

Resultados	Float	Double
Momento en x	1493,987655	1493,9876555555555555
Momento nominal del perfil	4554,985323	4554,98532675454
Relación demanda-capacidad por resistencia	0.3610897	0.3610897555555555
Deflexión máxima vertical	0.5555555	0.5555555555555555
Relación demanda-capacidad por flexión vertical	0.9399999	0.9399999999999999
Deflexión máxima horizontal	0.5898989	0.589898989898989
Relación demanda-capacidad por flexión horizontal	0.6333333	0.6333333333333333

**Realizado por:** Logroño, 2024

Se observa que los cálculos no inciden de manera significativa entre los diferentes tipos de variable, sin embargo, se observa también que el gasto computacional tampoco se ve afectado, por lo que vamos a optar por emplear valores declarados como double y aumentaremos un poco la exactitud de las cantidades mostradas, aunque no es un parámetro que se pueda considerar como muy significativo, con esto se valida de manera completa el software desarrollado.

## CONCLUSIONES

- El software de diseño de vigas de carril demostró ser una herramienta eficaz para el diseño y análisis de vigas de carril para puentes grúa. Su capacidad para generar rápidamente modelos detallados y realizar cálculos precisos facilita el proceso de diseño para ingenieros y profesionales del sector industrial, lo que genera un gran aporte ingenieril a la sociedad.
- Aunque el software ofrece resultados precisos en la mayoría de los casos, se observaron discrepancias menores entre los resultados del software y los cálculos manuales en ciertos escenarios. Estas discrepancias pueden atribuirse a la aproximación numérica utilizada por el software, a la declaración de las variables y otros factores, donde resaltan la importancia de la validación de los resultados mediante métodos adicionales.
- La interfaz de usuario del software se caracteriza por su simplicidad y facilidad de uso, tratando la simplicidad como primer factor de uso. Los usuarios pueden navegar fácilmente por las diversas funciones y herramientas del software, debido en gran parte a la biblioteca empleada y sus herramientas, lo que reduce la curva de aprendizaje y permite una rápida familiarización con la plataforma, y a la gran mayoría de funciones que posee el software.
- El software ofrece una variedad de opciones de personalización que permiten a los usuarios ajustar los parámetros de diseño según las necesidades específicas del proyecto en el que se esté trabajando. Esta flexibilidad es fundamental para adaptarse a diferentes requisitos de diseño y condiciones de carga, y está orientada a trabajar en diferentes sistemas y diferentes configuraciones que se pueden dar en un caso práctico tanto en la industria ecuatoriana como en el entorno internacional.
- El programa de diseño de vigas de carril para puentes grúa tiene amplias aplicaciones en la industria en general, desde la planificación de nuevas líneas de desarrollo y distribución de materia prima y montaje, hasta la rehabilitación y adecuación de estructuras existentes a puentes no convencionales. Su capacidad para generar diseños óptimos y evaluar la capacidad de carga de las vigas lo convierte en una herramienta valiosa para ingenieros y consultores en todos los sectores industriales aplicables.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar pruebas físicas en prototipos de vigas de carril diseñadas mediante el software, comparando los resultados experimentales con las predicciones del software y los cálculos teóricos. Esto ayudará a validar la precisión y confiabilidad del software en condiciones reales.
- Es importante que el software se mantenga actualizado con las últimas normativas y estándares de diseño para puentes grúa y vigas de carril. Se sugiere establecer un proceso de actualización regular para incorporar cambios en las normativas y mejoras tecnológicas.
- Se recomienda proporcionar capacitación técnica y práctica a los usuarios del software para garantizar su correcta utilización. Esto incluye cursos de formación, manuales detallados y soporte técnico continuo para resolver dudas y problemas que puedan surgir durante el uso del software.
- Para mejorar la experiencia del usuario, se sugiere la integración de nuevas funcionalidades que puedan facilitar el diseño, análisis y documentación de vigas de carril para puentes grúa. Esto podría incluir herramientas de modelado avanzado, análisis dinámico y generación automática de informes.
- Optimización de Rendimiento: Es importante optimizar el rendimiento del software para garantizar tiempos de respuesta rápidos y eficiencia en el procesamiento de grandes modelos de diseño. Se recomienda realizar pruebas de rendimiento y optimización de código para mejorar la velocidad y estabilidad del software.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **ANSI/AISC 360-16.** *Specification for Structural Steel Buildings.*
2. **AYALA HERRERA, Á. & CABRERA DÁVALOS, E.** Elaboración de un programa en JAVA para diseño de la viga principal y selección de elementos mecánicos para puentes grúa de capacidad hasta 50 toneladas y luz entre 3 y 30 metros con vigas tipo cajón. [En línea]. (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica Salesianas, Quito-Ecuador. 2018. [Consulta: 2024-04-24]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15118>
3. **BARRIOS, S.** Dimensionamiento óptimo de una estructura metálica para determinar las cargas mínimas de diseño–Juliaca 2016. [En línea]. (Trabajo de titulación). Universidad Alas Peruanas, Juliaca-Perú. 2017. [Consulta: 2024-04-22]. Disponible en: <https://repositorio.uap.edu.pe/handle/20.500.12990/3738>
4. **BROCKENBROUGH, R. & MERRITT, F.** *Structural Steel Designer's Handbook.* 5ª ed. New York-USA: McGraw-Hill Education, 2011.
5. **CHAVARRÍA JARAMILLO, C. & SALAZAR MARTÍNEZ, S.** Cálculos estructurales, fabricación y montaje puente grúa de 1 tonelada. [En línea]. (Trabajo de titulación). Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia. 2023. [Consulta: 22 abril 2024]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/35525>
6. **CISC 2009.** *Guide for the Design of Crane-Supporting Steel Structures.* Canadian Institute of Steel Construction.
7. **CITARELLI, S. & FELDMANN, M.** 2019. “Fatigue Failure of runway beams due to wheel loads”. *Ce/Papers* [en línea], 2019, (Denmark), vol. 3, págs. 3-4. [Consultado: 22 abril 2024]. DOI 10.1002/cepa.1110. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/cepa.1110>
8. **CMAA 70 - 2020.** *Specification for Top Running Bridge and Gantry Type Multiple Girder Electric Overhead Traveling Cranes.*
9. **CMAA 74 - 2020.** *Specification for Top Running and Under Running Single Girder Electric Overhead Cranes Utilizing Under Running Trolley Hoist.*
10. **DEREJE, J; et al.** *Software Development for the Structural Design of Structural Elements to the Ethiopian Building Code Standards.* S-I: Addis Ababa University, 2003.
11. **DOMÍNGUEZ AGUIRRE, J.** Análisis del comportamiento de vigas carrileras. [En línea]. (Trabajo de titulación). Universidad del País Vasco. 2016. [Consulta: 2024-04-22]. Disponible en: <https://addi.ehu.es/handle/10810/19427>

12. **DOMÍNGUEZ EQUIZA, J.** “Tablas de cálculo para vigas carril en puentes-grúa”. *Arista digital* [en línea], 2011, vol. 12, ISSN: 2172-4202. Disponible en: <https://fundacionarista.es/project/numero-12-septiembre-2011/>
13. **KOSSAKOWSKI, P. et al.** “Failure of the overhead crane runway”. *MATEC Web Of Conferences* [en línea], 2019, (Poland), vol. 284. [Consultado: 22 abril 2024]. DOI 10.1051/mateconf/201928409001. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928409001>
14. **LOYOLA HUATAY, J.** Propuesta de pórtico estructural de una nave industrial con puente grúa de 6.3tn de capacidad, mediante programa Sap2000 para ampliación del área de estructurado de la planta 1 de Técnicas Metálicas Ingenieros, Villa El Salvador. [En línea]. (Trabajo de titulación). Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Villa El Salvador-Perú. 2017. [Consulta: 2024-04-22]. Disponible en: <http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/467>
15. **MANDAMIENTO, H.** Supervisión de la fabricación y montaje de un puente grúa con capacidad de 15Tn para el proyecto en la empresa Parecer Chilca-Cañete. [En línea]. (Trabajo de titulación). Universidad Nacional del Callao, Callao-Perú. 2022. [Consulta: 2024-04-22]. Disponible en: <https://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/7682>
16. **OLCINA REIG, I.** Proyecto de edificio industrial para la fabricación de prefabricados de hormigón con oficinas y dos puentes grúa. [En línea]. (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia-España. 2017. [Consulta: 2024-04-22]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/87884>
17. **PITRÉ, A.** Estudio, diseño y mejora de un puente-grúa. [En línea]. (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica de Catalunya, Catalunya-España. 2024. [Consulta: 2024-04-22]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/403681>
18. **PORRAS JIMÉNEZ, A.** Estandarización de diseño de estructuras de acero para soportar grúas viajeras. [En línea]. (Trabajo de titulación). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. 2011. [Consulta: 2024-04-22]. Disponible en: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6082>
19. **RIVERA, D.** Propuesta de diseño para la implementación de un sistema de izaje para manipulación de carga hecho a medida. [En línea]. (Trabajo de titulación). Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia. 2023. [Consulta: 2024-04-22]. Disponible en: <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/34032>
20. **ROSALES VÁZQUEZ, D.** Diseño mecatrónico de un sistema transportador con sujeción automática para nave industrial para la movilización de productos plásticos rotomoldeados. [En línea]. (Trabajo de titulación). Instituto Tecnológico de Tuxtla

- Gutiérrez, Tuxtla Gutiérrez-México. 2015. [Consulta: 2024-04-22]. Disponible en: <http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/handle/123456789/1837>
21. **SANTACRUZ BERMEO, J.** Diseño de un Puente Grúa con Vigas Laminadas para un Galpón de una Planta Metalmecánica en Operación. [En línea]. (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil-Ecuador. 2015. [Consulta: 2024-04-22]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/30294>
  22. **SITTHIPONG, S; et al.** “Design Analysis of Overhead Crane for Maintenance Workshop”. *MATEC Web Of Conferences* [en línea], 2018, (Thailand), vol. 207, DOI 10.1051/mateconf/201820702003. Disponible en: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201820702003>
  23. **SOLORZANO MOGOLLÓN, V. & VARGAS LEÓN, K.** Guía de diseño de viga carrilera de naves industriales con puente-grúa con base en la norma norteamericana y algunas normativas latinoamericanas. [En línea]. (Trabajo de titulación). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima-Perú. 2019. [Consulta: 2024-04-22]. Disponible en: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/626503>
  24. **TRAHAIR, N.S.** “Limit states design of crane runway girders”. *Engineering Structures/Engineering Structures (Online)* [en línea], 2021, vol. 240, DOI 10.1016/j.engstruct.2021.112395. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112395>
  25. **VAŠKOVÁ, V; et al.** “Analysis of a Crane Runway Failure”. *Procedia Engineering* [en línea], 2017, (Czech Republic), vol. 190, DOI 10.1016/j.proeng.2017.05.335. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.335>

## ANEXOS

### ANEXO A: Codificación

Para poder lograr un control del código eficaz y eficiente para cualquier usuario o desarrollador, es menester que se tengan buenas prácticas de programación, entre los que se incluyen ciertos estándares de nomenclatura de variables, tablas y bases de datos con los cuales se busca poder tener un código más organizado y universal, esta codificación se divide en los siguientes aspectos. Codificación de la base de Datos.

1. Las tablas de la base de datos deberán escribirse con minúscula, salvo la primera letra que deberá escribirse con mayúscula, de manera similar a los nombres propios.
2. Los nombres de las columnas deberán escribirse únicamente con letras mayúsculas y en el caso de contener espacios, estos deberán ser reemplazados con un guion bajo.

Ejemplo

Tabla: Perfiles

Columna: HS\_METRICO

Codificación dentro del código de ejecución del programa.

1. Nombres de las variables de cálculo, todas las variables de cálculo se nombrarán en la medida de lo posible de la misma manera en la que se encuentran en la norma, para evitar confusiones para la utilización de estas, reemplazando los subíndices por su equivalente en texto convencional.

Ejemplo

Momento máximo:  $M_{cr}$  Variable declarada: M\_cr

Carga máxima:  $P_{max}$  Variable declarada: P\_max

2. El código debe estar correctamente organizado, debido a que se tienen varias ventanas que funcionan para cada tipo de unidades, se empleará una nomenclatura para no confundir un formulario con otro, en el cual la base del nombre será Runway, y se acompañará de un indicador del sistema y del número de ruedas.

Ejemplo

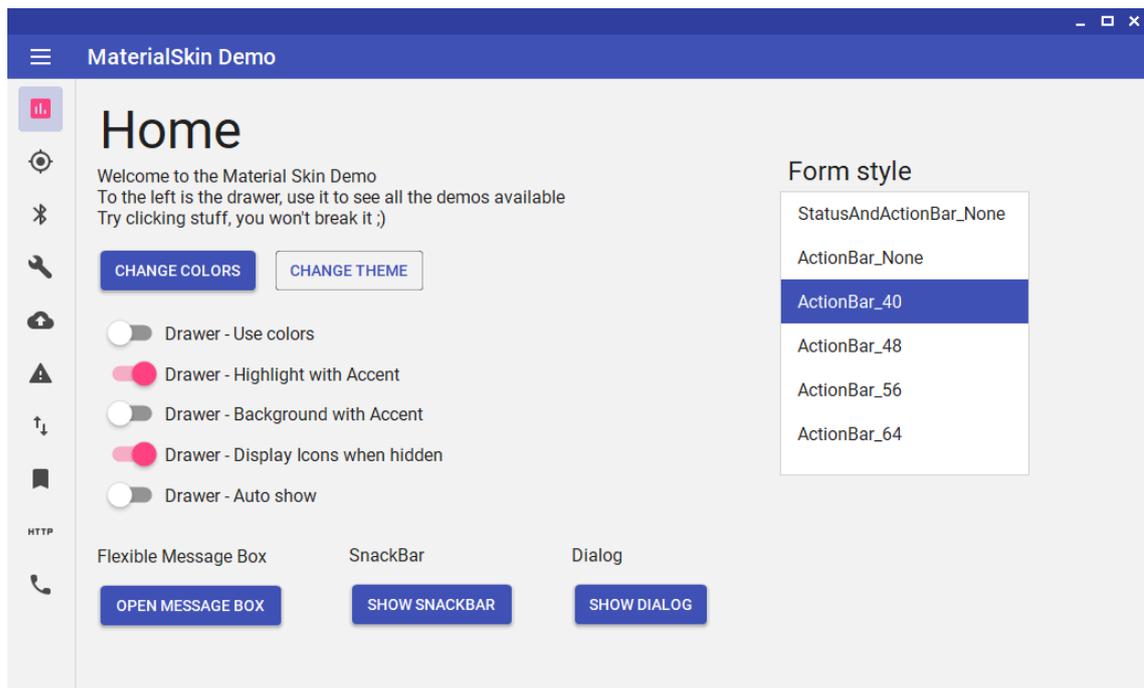
Formulario del sistema métrico con dos ruedas: Runway\_2m.cs

Formulario del sistema inglés con 4 ruedas: Runway\_4in.cs

Nota: En la medida de lo posible, todos los nombres que se emplean para variables, bases de datos, tablas, eventos y clases, deben ser lo más intuitivos posible, tratando de buscar siempre la simplicidad del código.

## ANEXO B: Instalación de la biblioteca de la interfaz de usuario

Se emplea la biblioteca MaterialSkin que es una enmascarización de .NET WinForms, C# y VB.Net basada en los principios de diseño de materiales de Google.



### Instalación de MaterialSkin2

1. Agregar a la biblioteca de nuestro proyecto

Método 1.

Si estamos en el entorno de desarrollo de Visual Studio en su versión más reciente, podemos buscar directamente a MaterialSkin.2 en el administrador de paquetes mguet del programa y agregarlo a nuestro proyecto.

Método 2.

Descargue el DLL recompilado de la versión que desee instalar disponible en: <https://github.com/leocb/MaterialSkin?tab=readme-ov-file> , y agregar como una referencia externa en el proyecto.

2. Agregar los componentes de la biblioteca al Toolbox de Visual Studio

Únicamente trasladar con el mouse el archivo denominado MaterialSkin.dll a la Caja de herramientas de Visual Studio y todos los controles que se encuentran disponibles en la biblioteca se agregarán.

3. Heredar de la biblioteca MaterialForm

Abrir el código detrás del formulario que deseamos personalizar, y hacemos que herede Material form en lugar de Form, no olvidemos poner la biblioteca como una biblioteca para usar en el formulario.

```
public partial class Form1 : MaterialForm
```

#### 4. Inicializa el esquema de colores

Establezca sus colores y temas preferidos. También agregue el formulario al administrador para que se mantenga actualizado si la combinación de colores o el tema cambia más adelante.

```
public Form1()
{
    InitializeComponent();

    var materialSkinManager = MaterialSkinManager.Instance;
    materialSkinManager.AddFormToManage(this);
    materialSkinManager.Theme =
MaterialSkinManager.Themes.LIGHT;
    materialSkinManager.ColorScheme = new
ColorScheme(Primary.BlueGrey800, Primary.BlueGrey900,
Primary.BlueGrey500, Accent.LightBlue200, TextShade.WHITE);
}
```