

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY

DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERIA



TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.

SOFTWARE EDUCATIVO PARA DISEÑO DE NAVES
INDUSTRIALES

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

ESPECIALIDAD EN INGENIERIA Y ADMINISTRACION
DE LA CONSTRUCCION CON ACENTUACION
EN INGENIERIA ESTRUCTURAL

POR

CARLOS MARIO PEÑA TAPIA

DICIEMBRE DEL 2005

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY
CAMPUS MONTERREY

DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

SOFTWARE EDUCATIVO PARA DISEÑO DE NAVES INDUSTRIALES

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN DE LA
CONSTRUCCIÓN CON ACENTUACIÓN EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

POR:

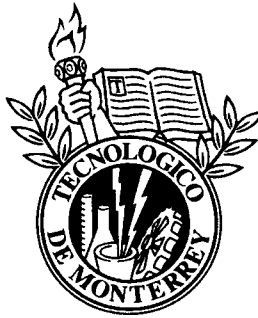
CARLOS MARIO PEÑA TAPIA

MONTERREY, N.L.

DICIEMBRE DE 2005

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY
CAMPUS MONTERREY

DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

SOFTWARE EDUCATIVO PARA DISEÑO DE NAVES INDUSTRIALES

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN DE LA
CONSTRUCCIÓN CON ACENTUACIÓN EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

POR:

CARLOS MARIO PEÑA TAPIA

MONTERREY, N.L.

DICIEMBRE DE 2005

AGRADECIMIENTOS

Hay mucho por agradecer, y son escasas las palabras para expresar, gracias por todo.

A Dios, por todas las bendiciones que me ha dado en todos estos años y por permitirme finalizar esta meta.

A mi esposa, por haber estado conmigo en todo momento, sin su comprensión y apoyo, esta investigación no hubiera llevado el curso que siguió.

A mi madre y hermana, por el apoyo incondicional brindado en el transcurso de mis estudios.

A mi niña, por ser quien me impulso para culminar este proyecto.

Al Ing. Carlos Nungaray, por su paciencia y su apoyo en el trayecto de esta investigación, así como también, en el tiempo en que estuve colaborando como su asistente.

Agradezco al Dr. Francisco Yeomans y al Dr. Sergio Gallegos por los conocimientos que me dieron durante todo este tiempo.

Al Dr. Felipe Orozco, que en paz descanse, por abrirme las puertas para colaborar como asistente de docencia en el Departamento de Ingeniería Civil durante el transcurso de la maestría.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	1
1.2. ANTECEDENTES	3
1.3. INTRODUCCIÓN.....	5
1.4. COMPETITIVIDAD INDUSTRIAL	7
1.5. PROPÓSITO Y ALCANCE.....	9
1.6. METODOLOGÍA	9
CAPÍTULO 2. ARQUITECTURA INDUSTRIAL	11
2.1. PLANTEAMIENTO DEL EDIFICIO INDUSTRIAL.....	11
2.2. FORMAS DE NAVES INDUSTRIALES EN PLANTA	12
2.3. UTILIZACIÓN DE ACERO EN EL DISEÑO DE NAVES INDUSTRIALES.....	14
2.4. IMPORTANCIA DE LA ILUMINACIÓN NATURAL EN NAVES INDUSTRIALES	15
2.5. USO DE ARMADURAS EN NAVES INDUSTRIALES	16
2.6. RECUBRIMIENTOS DE NAVES INDUSTRIALES	19
2.7. POLÍN ESTRUCTURAL EN NAVES INDUSTRIALES.....	25
2.8. DIMENSIONES BÁSICAS DE NAVES INDUSTRIALES DE PLANTA RECTANGULAR	28
2.9. OPTIMIZACIÓN DE MATERIALES EN EL DISEÑO DE NAVES INDUSTRIALES.....	29
CAPÍTULO 3. CARGAS ACCIDENTALES	33
3.1. DISEÑO POR VIENTO.....	36
3.1.1. Alcance.....	36
3.1.2. Requisitos generales para el análisis y diseño estructural	36
3.1.3. Clasificación de las estructuras según su importancia	37
3.1.4. Procedimientos para determinar las acciones por viento	38
3.1.5. Determinación de la velocidad de diseño, V_D	39
3.1.6. Determinación de la presión dinámica de base, q_z	44
3.1.7. Análisis estático.....	45
3.1.8. Presiones y fuerzas debido a la acción del viento	46
3.2. DISEÑO POR SISMO.....	54
3.2.1. Clasificación de las estructuras según su importancia	54
3.2.2. Factor de comportamiento sísmico, "Q"	55
3.2.3. Factor reductivo por ductilidad.....	55
3.2.4. Regionalización sísmica de la República Mexicana	56
3.2.5. Espectro para diseño sísmico	56

3.2.6. Elección del tipo de análisis sísmico.....	59
3.2.7. Análisis estático.....	59
3.2.8. Análisis modal espectral	63
CAPÍTULO 4. CRITERIOS DE DISEÑO DE TRABE CARRIL	71
4.1. ANALOGÍA ENTRE TORSIÓN Y FLEXIÓN EN EL PLANO.....	72
4.2. PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE UNA TRABE CARRIL.....	75
4.3. EVALUACIÓN DE LA CONSTANTE DE TORSIÓN "J".....	102
4.4. EVALUACIÓN DE LA CONSTANTE DE ALABEO C_w	107
CAPÍTULO 5. EJEMPLO DE APLICACIÓN	113
5.1. INTRODUCCIÓN DE DATOS AL PROGRAMA.....	115
5.2. REALIZACIÓN DEL DISEÑO	119
5.3. RESULTADOS	120
CAPÍTULO 6. MANUAL DEL USUARIO.....	127
6.1. PANTALLA PRINCIPAL.....	128
6.2. MENÚ ARCHIVO.....	129
6.3. MENÚ REQUERIMIENTOS DE NAVE.....	130
6.3.1. Características Generales.....	131
6.3.2. Viento y Sismo	132
6.3.3. Trabe Carril	134
6.4. MENÚ DISEÑO DE NAVE.....	137
6.5. MENÚ RESULTADOS	138
6.6. MENÚ PRESIÓN DE VIENTO	139
6.7. MENÚ TRABE CARRIL.....	140
6.7.1. Resultados de Trabe Carril	141
6.8. MENÚ BASES DE DATOS.....	143
6.8.1. Perfil W.....	144
6.8.2. Perfil W - Canal	145
6.8.3. Grúas.....	146
6.8.4. Rieles.....	147
6.8.5. Factor de Reducción β	148
6.9. MENÚ FORMATO.....	149
6.9.1. Color.....	150
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	151
7.1. CONCLUSIONES.....	151
7.2. RECOMENDACIONES.....	152

ANEXO A. ELABORACIÓN E INSTALACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE ACERO.....	154
ANEXO B. REGLAMENTOS DE ACERO.....	154
ANEXO C. TIPOS DE ESPECIFICACIONES.....	154
ANEXO D. DIAGRAMA DE FLUJO.....	157
BIBLIOGRAFÍA.....	158

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Revisión bibliográfica

Tal y como lo establece el Dr. James M. Fisher en su artículo “Industrial Building – Guidelines and Criteria”, la combinación de los elementos: lámina de cubierta, polines, armaduras, columnas y largueros para formar el edificio industrial más funcional y económico (sistema óptimo) representa una tarea compleja.

Al preguntar “¿Cuál es el edificio industrial óptimo?”, la respuesta es diferente, dependiendo a quien se le hace la pregunta. Para el dueño del edificio, la estructura óptima es aquella que permite la funcionalidad, que además tiene buena apariencia y también en la que el costo de la construcción final es inferior al costo del presupuesto. Para un diseñador joven, el edificio óptimo es el de menor peso o costo. Un ingeniero de proyectos experimentado piensa que el edificio óptimo es aquel que satisface las necesidades del dueño y que además, en el que no hay confusión durante la construcción por la mala interpretación de planos y/o documentos.

Fisher menciona que para tener un edificio óptimo que cumpla con los diferentes opiniones de los participantes en el proyecto, se deben estudiar con especial atención cada uno de los puntos que se enlistan a continuación:

1. Identificación de los requerimientos del cliente.
2. Identificación de los requerimientos estructurales.
3. Selección del material de cubierta y muro.
4. Selección de las dimensiones de las bahías.
5. Selección del sistema de marcos.
6. Diseño de conexiones y componentes.
7. Preparación de especificaciones y planos.

El Ing. Bakota en su artículo “Mill Building Design Procedure” establece una lista de puntos a seguir en el diseño de naves industriales, misma que concuerda con los puntos importantes a seguir en la lista de Fisher.

Dentro de los requerimientos estructurales se encuentra el análisis y diseño de las trabes carril, mismo que representa uno de los criterios estructurales más importantes en el diseño de naves industriales por el riesgo que se tiene al haber cargas móviles ocasionadas por los materiales que transportan las grúas viajeras, y que además dichas cargas en la mayoría de los casos son desconocidas con exactitud por el diseñador estructural al no contar con las características reales de las grúas a instalar, por lo que típicamente, dichas propiedades son tomadas en base a las grúas de un proveedor conocido en el medio.

David T. Ricker establece que para tener un buen comportamiento de las trabes carril ante la presencia de cargas móviles en diversos sentidos, es necesario cuidar las siguientes recomendaciones:

1. Revisar el límite de deflexión de las trabes carril.
2. No usar vigas en cantiliver.
3. No realizar continuidad con las trabes carril.
4. No usar contraventeo de rodilla en trabes carril.
5. Conectar el patín superior de la trabe carril a la columna para resistir la carga lateral.
6. No conectar el alma de la trabe carril con la columna.
7. Usar tornillos de alta resistencia en las conexiones de las trabes carril.
8. Verificar la peor condición de operación de grúas posible, por que es seguro que suceda en algún momento.

Debido a la gran cantidad de cálculos que se tienen que elaborar para realizar el diseño y/o análisis de edificios industriales, ha sido necesario

aprovechar el advenimiento de las computadoras para la realización de software que nos permitan incrementar la productividad de la ingeniería estructural considerablemente (Gossett, 1982). A lo largo de los años varias universidades de diversas partes del mundo, han implementado la creación de software educativo para elevar el nivel académico, a tal grado que se ha llegado a la comercialización de algunos de ellos para usarlos a nivel profesional.

1.2. Antecedentes

Las naves industriales son estructuras ligeras que soportan cargas gravitacionales y cargas accidentales con criterios de serviciabilidad y resistencia, y su función principal es brindar el espacio necesario a la industria maquiladora para llevar adecuadamente diferentes procesos. Dentro de las cargas gravitacionales se encuentran la carga viva y la carga muerta, mientras que en el grupo de las cargas accidentales tenemos la carga de viento y sismo. Regularmente, las naves se encuentran ubicadas en forma dispersa dentro de áreas incongestionadas en donde los vehículos y camiones tienen un acceso rápido.

Los marcos principales que componen a los edificios industriales pueden ser de dos tipos: el primero de ellos a base de vigas y columnas comúnmente conocido como marco rígido, y el segundo conformado por armaduras y columnas (marco semirrígido). El polín o el joist son los elementos que se utilizan para formar parte del sistema de cubierta. El elemento usado para conformar la fachada es el polín.

La construcción de naves industriales metálicas se inició a mediados del siglo XIX cuando el hierro se impuso como un material de primer orden al desplazar a varios de los materiales empleados hasta ese momento, debido a sus propiedades de resistencia. Con el paso de los años los edificios industriales empezaron a requerir espacios libres cada vez mayores a tal grado que las

cualidades del hierro fueron insuficientes. Por tal motivo, la siderurgia se vio en la necesidad de realizar investigaciones más profundas para desarrollar un material más adecuado, y es entonces cuando surge el acero, que es un producto ferroso que se obtiene por fusión y contiene entre 0.4 y 1.5 % de carbón. El acero funde a 1400 °C y carece de escorias.

Con el paso de los años el acero fue adquiriendo una mayor importancia en el ámbito de la construcción de estructura metálica, a tal grado que se empezaron a formar asociaciones para regular mediante especificaciones el uso adecuado del mismo.

En 1898 se creó la sociedad del ASTM (American Society for Testing and Materials), dentro de sus objetivos se encuentra el control del uso de tomillería de baja y alta resistencia.

En el año de 1921 se establecieron las normas AISC (American Institute of Steel Construction) con el propósito de promover el uso del acero estructural, códigos, especificaciones, certificación y estandarización de técnicas de calidad.

En 1956 se fundó el MBMA (Metal Building Manufacturers Association) cuyo objetivo es el de regular el diseño de las naves industriales y realizar investigaciones en el ámbito industrial. En la actualidad, esta asociación ha desarrollado un programa llamado MBS (Metal Building System), mismo que sirve para diseñar, dibujar y detallar planos de montaje y fabricación, además de realizar costos y presupuestos de edificios industriales que cuentan con una forma rectangular.

En el año de 1989 se establecieron las especificaciones del AWS (American Welding Society) que representan al código de soldadura estructural.

El día 1 de enero de 2004, la asociación del AISE (Association of Iron and Steel Engineers) y la asociación del ISS (Iron and Steel Society) se unieron para formar la AIST (Association for Iron and Steel Technology) con la función principal de promover especificaciones para el diseño y construcción de naves industriales.

Cada una de las especificaciones conforman un factor muy importante de aprendizaje para estudiantes de ingeniería civil, que están a un paso de laborar profesionalmente en el ramo del diseño de estructura metálica industrial, campo que actualmente se encuentra muy competido. Adicionalmente a las especificaciones, es necesario para el estudiante, contar con una herramienta computacional para adquirir una formación profesional y especializada. Desafortunadamente, en las escuelas no existe tal herramienta, debido a que los programas especializados en el diseño de naves industriales son muy caros, lo cual limita su disponibilidad, mientras que los programas comerciales de análisis no están enfocados 100% al diseño de naves industriales.

1.3. Introducción

La industria es una creación muy antigua en la historia de la humanidad. Desde siglos anteriores se realizaban actividades de carácter industrial, como la artesanal, desarrollada por familias que iban heredando de generación en generación. Dicha actividad se mantuvo por muchos años sin crecimiento apreciable.

La revolución industrial dio un gran crecimiento con el invento de la máquina de vapor en el año de 1769. A raíz de esto, comienza la industria como se conoce en la actualidad, en la que grupos de personas se dirigen a un determinado lugar a realizar procesos de fabricación.

La industria maquiladora ha tenido recientemente un crecimiento a nivel mundial. El éxito económico obtenido por países como Estados Unidos, Japón,

Alemania, Inglaterra y Canadá, entre otros, al aplicar la producción en serie, ha motivado a países subdesarrollados a adoptar los sistemas de producción, como recurso para su desarrollo.

México no podía ser la excepción, puesto que al ser vecino de Estados Unidos está influenciado por su economía; prueba de ello es la gran cantidad de maquiladoras que se han instalado en la parte norte, principalmente en los estados de Baja California, Sonora, Chihuahua, Durango, Nuevo León y Tamaulipas.

La industria de la construcción ha sido beneficiada en gran medida con este advenimiento de la industria maquiladora, puesto que cada día son más las naves industriales que se tienen que diseñar y construir, por lo regular a base de acero. Por lo tanto se deben tomar en cuenta, además de las especificaciones y técnicas de planeación, los procesos de elaboración de los elementos de acero hasta su instalación en obra (Anexo A).

Los inversionistas, tanto nacionales como extranjeros, destinan grandes cantidades de recursos económicos a la construcción de sus instalaciones, con la intención de recuperar la inversión lo más pronto posible, por lo cual exigen a los ingenieros civiles un diseño económico y factible, que se pueda implantar en un tiempo relativamente corto y al menor costo posible. Por consiguiente, se opta en la mayoría de los casos, por hacer la selección de materiales de tal forma que se obtengan los más económicos, cumpliendo con los requerimientos de resistencia y servicio adecuados para dicho proyecto, con base en los reglamentos aplicables (Anexo B).

El ingeniero, ante la presión por parte del cliente de entregar el diseño en un lapso de tiempo corto, en ocasiones no toma en cuenta los procedimientos de construcción como una acción prioritaria, por lo que en estos casos se obtienen resultados desfavorables, en cuanto a costo y tiempo, ya que se ha demostrado

que los procesos constructivos son un factor importante en el costo total de una obra.

1.4. Competitividad industrial

En la actualidad, en México se han instalado diversas compañías nacionales e internacionales dedicadas a la fabricación de estructuras ligeras. Cada una de estas empresas surte en el mercado alrededor de 12,000 toneladas de acero por año. En algunas ocasiones una compañía se encarga de realizar el diseño de un estructura, de suministrar el acero y además de realizar el montaje, mientras que en otras ocasiones, sólo llevan a cabo uno o dos de los puntos mencionados. Sin duda alguna, cuando una sola compañía se encarga de realizar todo el proceso constructivo, se tienen algunas ventajas, como: rapidez en el suministro de la estructura, solución integral de todos los componentes del edificio y rapidez en el montaje, entre otras.

Algunas de las instituciones más importantes de Estados Unidos y Canadá relacionadas con el diseño de estructuras de acero, tales como el American Iron and Steel Institute (AISI), 2001, crearon reglamentos con criterios unificados de los tres países firmantes del Tratado de Libre Comercio de Norteamérica. Sin embargo, sería deseable que esta idea se extendiera a otros aspectos del diseño incluyendo la definición de cargas, análisis y criterios básicos, que es quizá donde mayores diferencias puede haber, especialmente en lo que se refiere a sismos. De lograrse esto no sólo se tendría confianza en los diseños de estructuras fabricadas en el extranjero, sino que permitiría a los fabricantes mexicanos la posibilidad de exportar sus productos.

Independientemente del país donde se realice un proyecto de construcción, se requieren dos elementos principales: Especificaciones de Construcción y Planos Constructivos. Las primeras son las representaciones escritas requeridas para llevar a cabo el proyecto; describen al mismo en forma

lógica y organizada en divisiones y secciones que muestran los oficios y labores que deben realizarse en la construcción, lo cual facilita la ejecución de presupuestos y preparación de licitaciones. No es práctico que el ingeniero y el arquitecto incluyan en los planos notas extensas y detalles que describan todos los productos y métodos necesarios para un proyecto de construcción. Estas descripciones minuciosas deben incorporarse en las especificaciones.

Los contratistas analizan las especificaciones a fin de informarse sobre: detalles o materiales necesarios, secuencia del trabajo, calidad de la mano de obra y apariencia del producto terminado, entre otros. Con base en esta información proceden a calcular los costos de las diversas especialidades y la mano de obra necesarias. Si no se determina en forma adecuada la mano de obra requerida, los cálculos de costos no serán realistas. Si las especificaciones son apropiadas, se podrá: ampliar y aclarar los planos, determinar la calidad de los materiales y la mano de obra, definir el alcance de la obra, y describir las responsabilidades del contratista.

Las especificaciones requieren para su preparación una labor prolongada y compleja, y su objetivo es: “aportar una representación escrita del proyecto, y sin presentar gráficamente su forma física y dimensiones, describen los detalles de los materiales, tanto externos como internos, del proyecto y el equipo fijo necesario para el funcionamiento normal de la obra” (García, 2001).

Si las especificaciones se preparan adecuadamente, están bien organizadas, son integrales y disponen de un índice, se podrá identificar mediante ellas cualquier tipo de obra, material o pieza de equipo utilizado en el proyecto. Las especificaciones técnicas cubren los principales tipos de obra de un proyecto: mecánicas, eléctricas, civiles, estructurales y arquitectónicas. En un proyecto de construcción pueden utilizarse uno o más tipos de especificaciones técnicas (Anexo C).

"Existen algunas instituciones que proporcionan guías estandarizadas para especificaciones técnicas, que incluyen una lista maestra de títulos y números de secciones. Una de las más completas es la publicada por el CSI (Construction Specifications Institute) de los Estados Unidos" (García, 2001).

Los planos constructivos contienen los detalles más importantes de una obra, por lo que junto con las especificaciones de construcción, forman la información completa de un proyecto. Tanto planos constructivos, como especificaciones de construcción, sirven de referencia a las técnicas de planeación para llevar un control adecuado de los materiales, maquinaria, fuerza de trabajo, recursos económicos y de tiempo; puntos que son esenciales en el éxito de un proyecto.

1.5. Propósito y alcance

El objetivo es investigar criterios básicos de diseño industrial en diferentes compañías dedicadas al ramo de la construcción, y además interrelacionarlos con los reglamentos de acero, de viento y sismo, de tal manera que esto permita crear una herramienta con criterios básicos para el diseño de edificios industriales, mediante una interrelación entre las diversas etapas de los procesos constructivos.

1.6. Metodología

En el campo de diseño se investigará sobre propiedades de productos estructurales de acero, criterios para diseño por cargas gravitacionales, viento y sismo conforme al reglamento del LRFD*, y por último se investigarán las diferentes opciones de diseño estructural para un mismo proyecto. El reglamento del que se hará uso principalmente es el AISC-LRFD (American Institute of Steel Construction), además se tomarán como referencia en caso de ser necesario el MBMA (Metal Building Manufacturers Association), AIST (Association for Iron

and Steel Technology), AISI (American Iron and Steel Institute) y además manuales de diseño como el del Light Gage Structural Institute.

Referente al tema de construcción, se realizarán entrevistas con compañías dedicadas a la construcción de estructuras de acero, para considerar opiniones y recomendaciones, las cuales quedarán plasmadas en el software educativo.

Después de tener una visión clara de todos los aspectos importantes que conforman el diseño y construcción de un proyecto, se procederá a integrar el programa computacional para obtener solo el diseño completo de una nave industrial, para el cual se utilizará el Visual Basic 6.0, puesto que es uno de los recursos con que se cuenta**, y además, por la facilidad de hacer que el programa sea más gráfico por medio de diferentes ventanas del mismo programa, lo cual hace que su uso sea más fácil y amigable para el usuario. Otra de las razones de usar el Visual Basic, es que presenta varias formas accesibles de trabajar con bases de datos. También permite almacenar y leer rápidamente gran cantidad de cálculos y/o resultados.

* las siglas en inglés, LRFD, significan: Load and Resistance Factor Design.

** La investigación se realizará en el ITESM, Campus Monterrey.

CAPÍTULO 2. ARQUITECTURA INDUSTRIAL

La Arquitectura industrial se basa en la conjunción y armonización de un gran número de oficios o técnicas que son los participantes en ella, para llegar a la materialización de un fin. El ingeniero y el arquitecto no sólo deben tomar en cuenta la resistencia y apariencia de la construcción, sino además otros factores, por ejemplo, las condiciones de servicio adecuadas de tal forma que no se produzcan deflexiones ni desplazamientos mayores a los permisibles, además las exigencias de confort que ayuden a realizar un trabajo adecuado, entre otros.

“El fin principal de la Arquitectura Industrial es proyectar y construir instalaciones industriales de toda índole, en donde los edificios puedan tener carácter secundario o incluso no existir como elementos principales de la construcción, y en donde todo ha de estar dirigido hacia el cumplimiento de las necesidades impuestas por el proceso industrial de producción. Por tanto, los factores económicos son preponderantes, ya que lo que se ha de proyectar y construir es solo un medio para la producción. Y ello sin olvidar nunca que como en la producción entran hombres para realizarla, hay también que atender todas sus necesidades, pero no solo tomadas como factor para incrementar la productividad de la fabricación que se haya de realizar en la planta objeto de cada caso de la Arquitectura Industrial, sino también como una exigencia natural, consustancial con el hombre” (Heredia, 1981).

2.1. Planteamiento del edificio industrial

Al momento de diseñar un edificio industrial es de suma importancia tener en mente un conocimiento perfecto del proceso de fabricación y de la organización de la producción que se va a realizar dentro de él. En la Arquitectura Industrial, hace falta establecer un planteamiento exacto y preciso, es decir, saber qué se va a fabricar, para qué va a servir y para quien se va a hacer.

El desarrollar un buen planteamiento es con la finalidad de establecer instalaciones en las que se realice un proceso que permita una producción en condiciones económicamente rentables. Este proceso involucra a la maquinaria, equipo, personal y materia prima que interviene en el edificio industrial.

El ingeniero civil no debe olvidar que está creando un medio para desarrollar una actividad en condiciones óptimas desde todos los puntos de vista y atendiendo a todos los factores de la producción.

2.2. Formas de naves industriales en planta

Hay una gran variedad en la forma que adoptan las naves industriales en planta, la cual es dada por el proyectista que se encuentra a cargo de su diseño, con base en el uso al que serán destinadas. Por lo regular, éstas adoptan formas geométricas regulares de carácter armonioso. Las formas en planta más comunes para este tipo de construcción son:

- Rectangulares.
- Cuadradas.
- En forma de U.
- En forma de L.
- En forma de H.

De las formas mencionadas, la que más se construye es la de forma rectangular, la cual es muy sencilla y además es práctica para la producción en serie. En la figura 2.1 se muestra una planta rectangular típica de una nave industrial conformada por 10 marcos principales separados entre sí por una distancia "s". Por los ejes laterales de la nave se aprecia 1 columna de viento entre cada marco, misma que sirve de soporte para la polinería de fachada. Regularmente la columna de viento es colocada entre marcos con separación mayor a 12 mts debido a que es el claro máximo para el polín que comúnmente

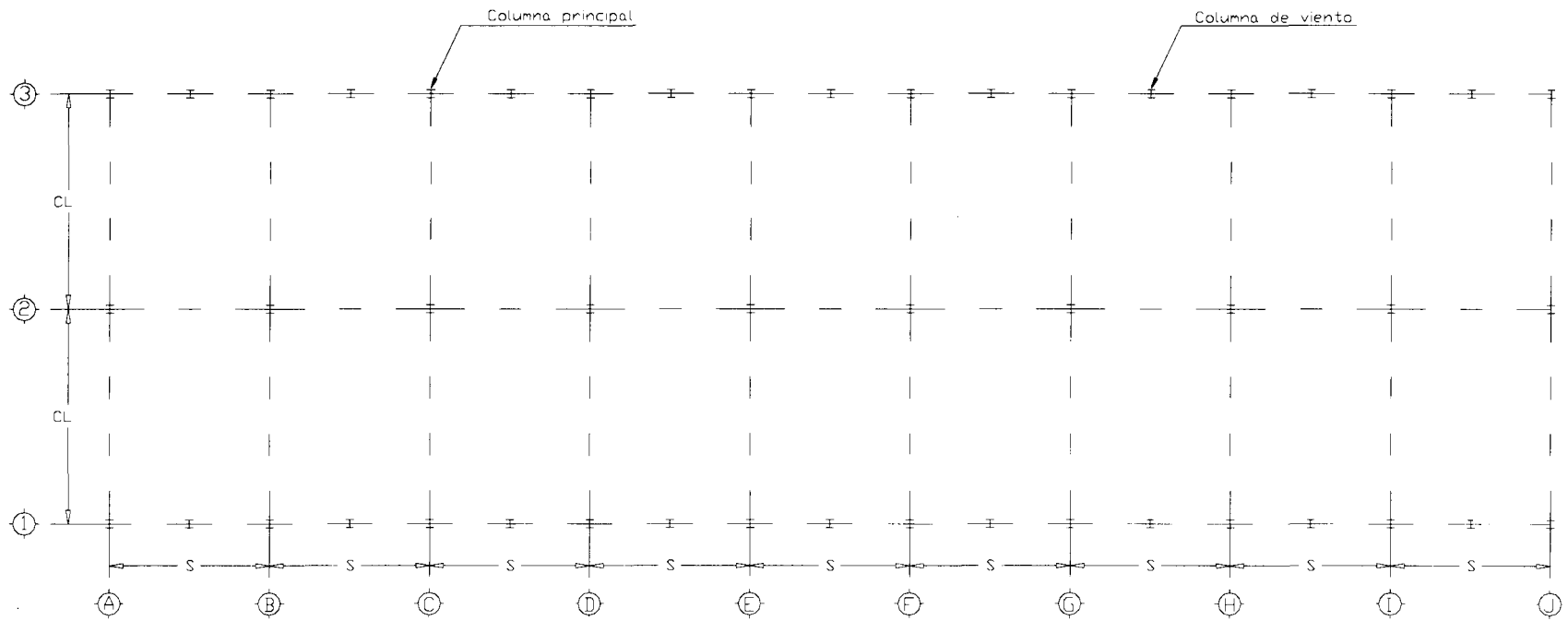


Figura 2.1. Vista en planta de una Nave Industrial

se vende en el mercado. El término de “soldier column” se aplica cuando la columna de viento es conectada en su parte superior con los dos joist más cercanos mediante elementos horizontales formando una conexión tipo bandera.

2.3. Utilización de acero en el diseño de naves industriales

El acero es el material más utilizado en la construcción de naves industriales debido a su gran resistencia a la tensión, compresión y flexión. Este elemento tiene ventajas sobre otro tipo de materiales estructurales, ya que soporta cargas elevadas con secciones relativamente pequeñas, soporta grandes claros libres, además, proporciona una rapidez en el montaje y no se pierde tiempo de fabricación en obra, puesto que ya se vende por piezas previamente elaboradas de diferentes secciones.

El uso del acero comenzó en el siglo XIX con la aparición del hierro forjado. En sus inicios, este elemento sólo se utilizaba para construir elementos de poca importancia, ya que no se tenía un gran desarrollo en las características mecánicas. En la actualidad, se han mejorado considerablemente sus características, por lo que es muy utilizado, además de que hay una gran variedad de tipos dependiendo del uso que se le vaya a dar.

El acero se distingue por su ductilidad, es decir, admite grandes deformaciones inelásticas antes de llegar a la falla. La elasticidad que tiene le permite recuperar su estado normal al eliminar la fuerza que lo deforma, siempre y cuando no se sobrepase el límite de elasticidad. Otra de las cualidades es que puede ser reutilizado, es fácil de fabricar y montar, permite realizar cambios en el momento en que se requiere sin importar si se encuentra instalado. Además, ayuda considerablemente a que la construcción de la obra se realice en menor tiempo en comparación con otros materiales tradicionales como el concreto. La desventaja del acero, es que ante la presencia del fuego es muy sensible y comienza rápidamente a perder capacidad de carga y rigidez.

2.4. Importancia de la iluminación natural en naves industriales

La iluminación natural tiene ventajas incuestionables sobre la luz artificial, no solo desde el punto de vista económico, sino también desde el punto de vista psicológico y fisiológico. La iluminación de las naves industriales es un factor básico, del cual depende el rendimiento de los trabajadores, el porcentaje de accidentes, las enfermedades de la vista, entre otros factores (Heredia, 1981).

Las tomas de luz más simple consisten en dejar en la cubierta, un espacio hueco sobre el que se instala una cobertura transparente regularmente en forma de domo. Éstas tienen la característica de colocarse con selladores especiales y desviadores con la finalidad de evitar la filtración del agua, que es uno de los mayores problemas que se presentan.

En la figura 2.2, se presenta la forma en que queda un domo transparente instalado sobre una cubierta, mientras que en la figura 2.3 se muestra la sección transversal del domo.

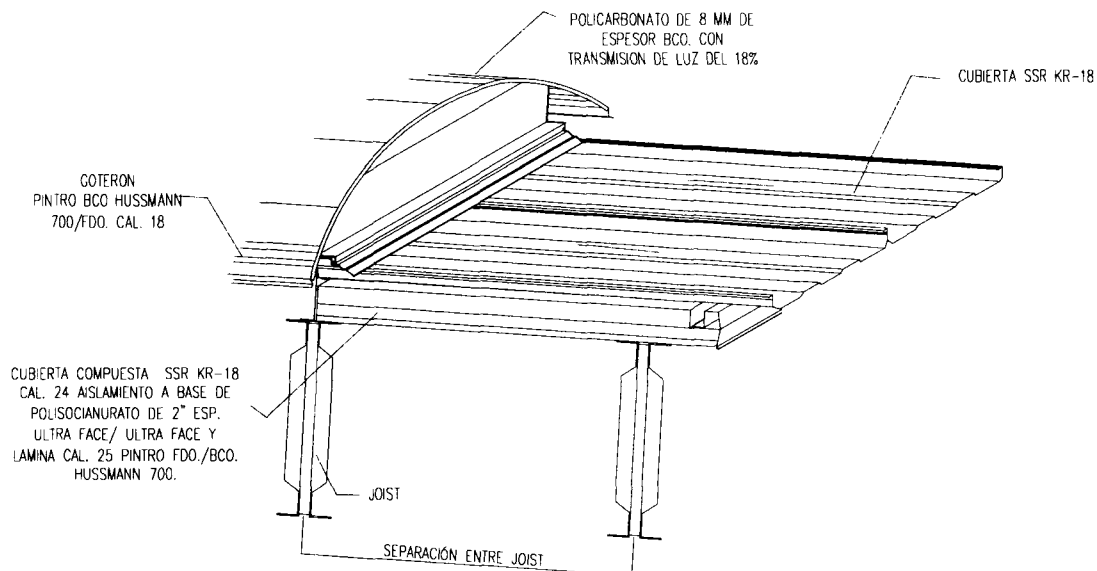


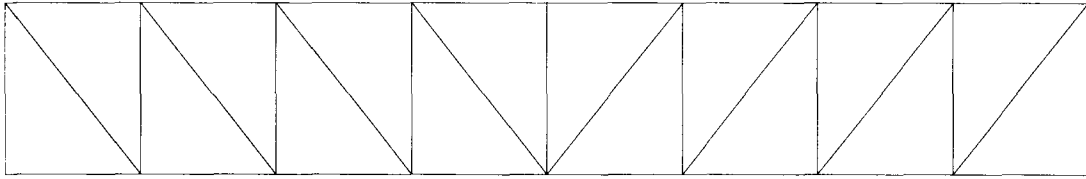
Figura 2.2. Segmento de una cubierta con un domo transparente

como sistemas de miembros unidos en sus extremos por medio de pasadores (sin transferencia de momento en la unión), formando triángulos.

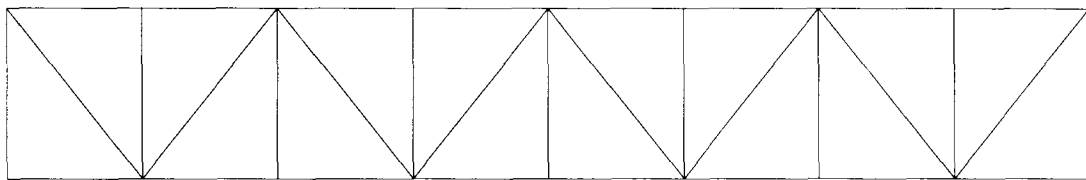
En naves industriales, es muy común el empleo de las armaduras debido a que soportan grandes claros con cantidad de acero relativamente pequeña, además por proporcionar una gran facilidad en el montaje. El claro libre que se puede abarcar con armadura llega hasta los 50 metros. A claros mayores ya no es eficiente su uso, debido a que las deflexiones empiezan a ser considerablemente grandes, al igual que el peralte de las mismas. Los peraltes prácticos que se utilizan varían entre $L/20$ hasta $L/10$.

Las armaduras se distinguen por la forma en que se combinan los diferentes sistemas de triangulación y algunas de ellas han tomado el nombre del primer ingeniero que las usó. Como ejemplo de ellas se pueden mencionar las siguientes:

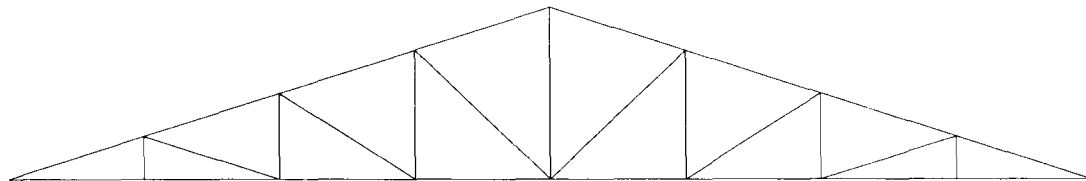
- Armadura Pratt.
- Armadura Howe.
- Armadura Warren.



a) Armadura Pratt cuadrangular



b) Armadura Warren cuadrangular



c) Armadura Howe

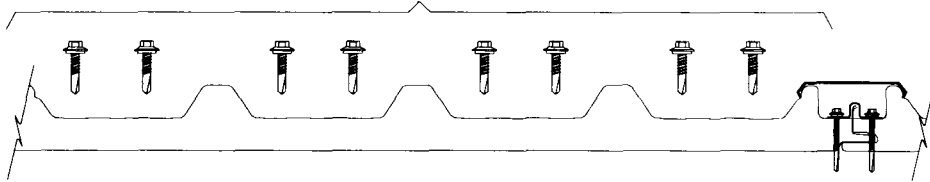
Figura 2.4. Tipos de armaduras

2.6. Recubrimientos de naves industriales

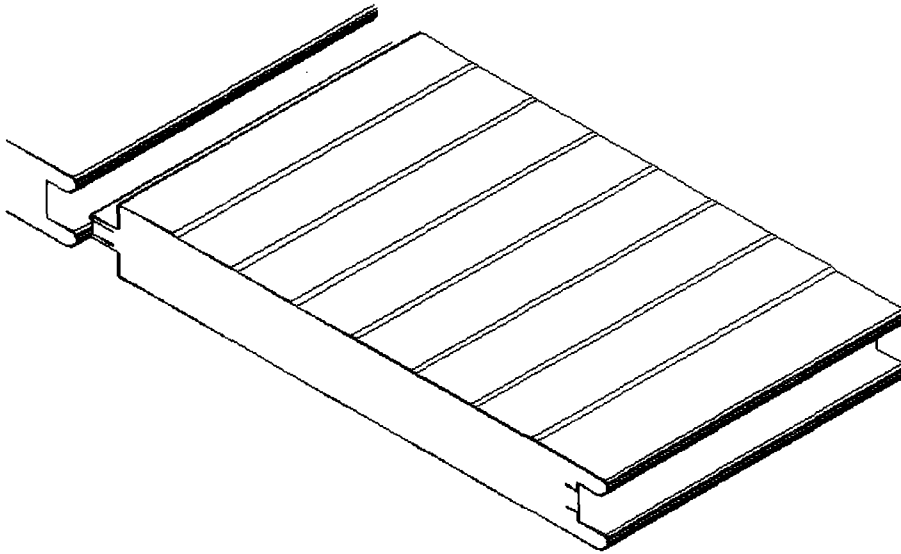
En el mercado existe una gran variedad de láminas y paneles de recubrimiento de fabricantes tanto nacionales como internacionales. Cada uno de ellos fabrica diversos tipos de recubrimientos que se adecuan a las necesidades que se requiera.

En el mercado existen paneles de recubrimiento para la cubierta y para los muros, como los mostrados en la figura 2.5. Se tienen diversos espesores para cada uno de los paneles, mismos que se seleccionan dependiendo de las cargas que soportarán y del tipo de apoyo al que serán sujetos, es decir, apoyo simple o continuo de uno o más claros. Estos productos son fabricados mediante un proceso continuo, compuesto por una cara exterior de acero galvanizado y una cara interior en distintos acabado; unidos por un núcleo de espuma rígida de poliuretano, formando un elemento tipo sandwich y con diseño de junta tipo hembra y macho (Figura 2.6).

PIJA AUTOTALADRANTE MAXISEAL
ACABADO CLIMASEAL No. 1/4X7/8" CON
ARANDELA PLASTICA
(DOS POR VALLE).



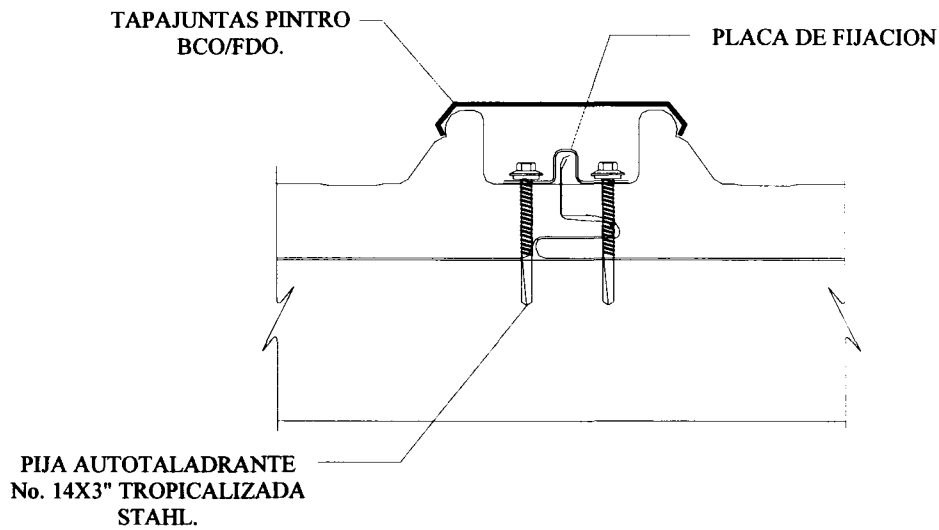
a) Recubrimiento para techo



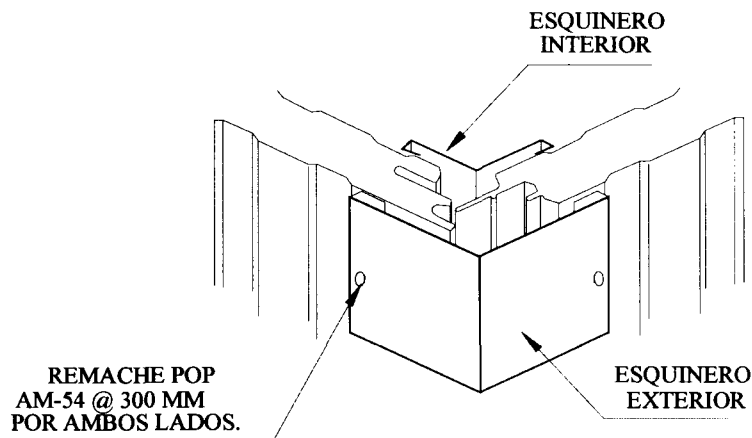
b) Recubrimiento para muro

Figura 2.5. Tipos de lámina de recubrimiento con aislamiento para muro y techo

Estos recubrimientos son diseñados para cubrir todas aquellas necesidades constructivas en donde se requiera de aislamiento térmico, para crear espacios confortables y mantener un control adecuado de la temperatura interior, además de ser, un material económico, higiénico, funcional, estructural y estéticamente agradable.



a) Junta típica para techo



b) Junta típica para muro

Figura 2.6. Tipos de juntas para muro y techo

Existe un innovador y práctico sistema de techado llamado *SSR*, el cual permite que los paneles de lámina de acero recubierto se instalen uno tras otro en forma rápida para posteriormente sellarse y lograr así una mayor impermeabilidad con una efectiva instalación. El sistema *SSR* ofrece además resistencia, protección, seguridad, durabilidad y un menor mantenimiento que los sistemas de techado tradicionales, y luce una mejor apariencia y versatilidad. Este sistema ofrece una solución eficiente a cualquier diseño de cubiertas metálicas, su geometría ofrece gran capacidad estructural e hidráulica, así como un traslape lateral hermético y seguro.

Dentro de este sistema *SSR* se tienen 3 tipos de láminas, las cuales se enlistan a continuación:

- Sistema *SSR 3/24*. Esta lámina se ofrece en dos tipos de traslape: *SSR SNAP* (Embonable) y *SSR GRID* (Engargolable), mismos que se pueden apreciar en las figuras 2.7 y 2.8, respectivamente.
- Sistema *SSR KR-18*. La sección transversal de la lámina *KR-18* es como se muestra en la figura 2.9. Este tipo de lámina es muy práctico debido a que se vende en rollos, por lo que no tiene restricciones de longitud, es decir, se corta en obra a la medida requerida con una máquina especial.
- Sistema *SSR KR-24*. También se corta en obra a la medida requerida, pero tiene menor resistencia que la cubierta *KR-18* (Figura 2.10).

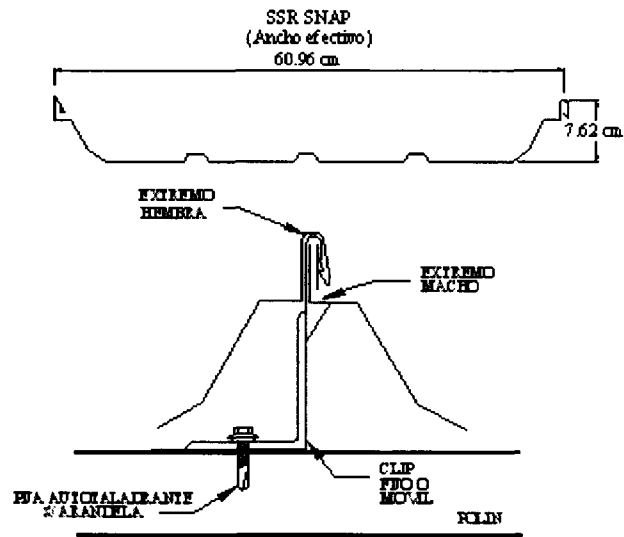


Figura 2.7. Lámina SSR con traslape SNAP

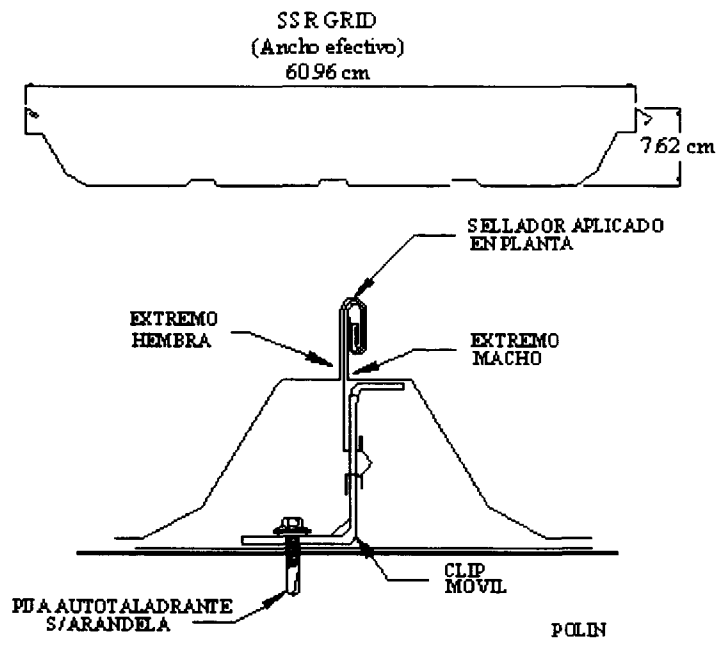


Figura 2.8. Lámina SSR con traslape GRID

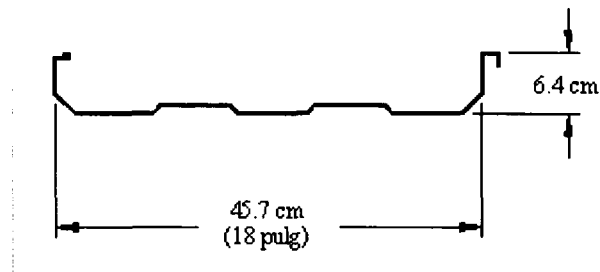


Figura 2.9. Lámina KR-18

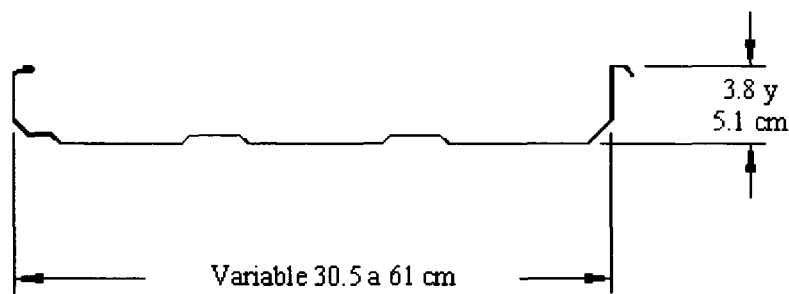


Figura 2.10. Lámina KR-24

La calidad del recubrimiento del sistema *SSR* protege totalmente contra los embates de la corrosión. La variedad de los colores brinda una versátil opción para construir, remodelar o modificar proyectos.

El tipo de lámina *KR-18* se vende por rollos, en obra se corta parte por parte y al mismo tiempo se le realiza el doblado con una máquina especial para formar la sección transversal típica. La máquina utilizada para realizar el doblado, es como la mostrada en la figura 2.11. Este tipo de recubrimiento en la actualidad se está usando mucho por la rapidez de su instalación y además por el bajo costo que tiene.

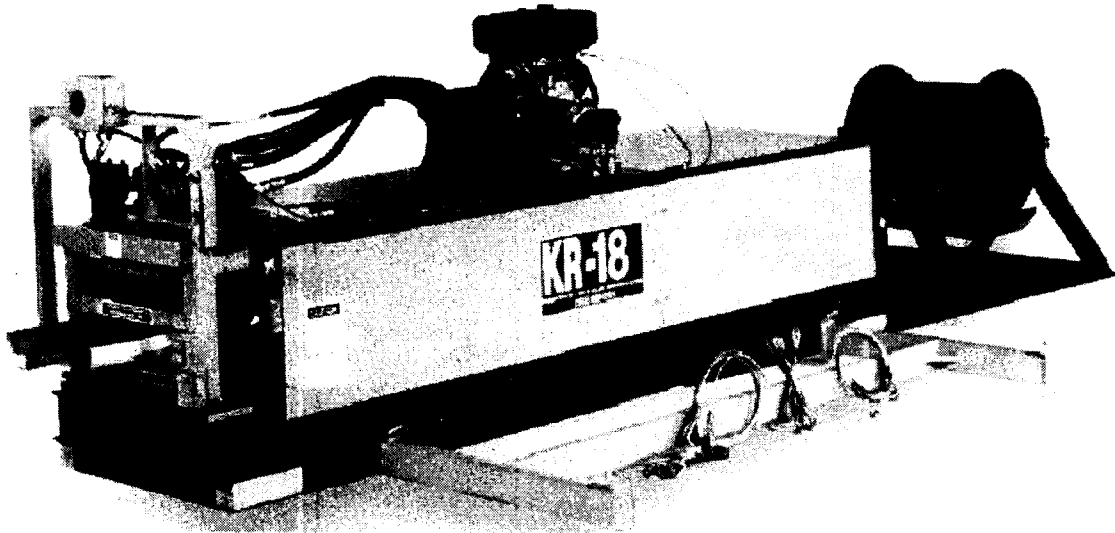


Figura 2.11. Máquina para doblar la lámina *KR-18* (Knudson, 2003)

Los proveedores de láminas de recubrimiento, establecen en sus catálogos las cargas permisibles por succión de viento de cada una de las láminas, así como también las cargas vivas permisibles, por lo tanto, es de gran importancia el análisis por viento, ya que gracias a éste por lo general se obtienen los elementos mecánicos actuantes máximos sobre las superficies de recubrimiento, sean muros o techos.

Por lo general, los recubrimientos se uniformizan para techo y muro, es decir, se localiza el punto más crítico en el techo y en el muro, y sobre estos se realiza la selección, facilitando así el proceso constructivo.

2.7. Polín estructural en naves industriales

El polín estructural representa un elemento secundario muy importante en las naves industriales. Éste es el encargado de transmitir las cargas

accidentales, cargas vivas y una parte del total de la carga muerta a la estructura principal. La carga es transmitida en forma puntual.

Existen 2 tipos de polín:

- Polín de sección "C".
- Polín de sección "Z".

Ambas secciones son muy utilizadas en el ámbito industrial. Por lo regular las secciones en "C" se usan simplemente apoyadas, mientras que las secciones en "Z" por la forma que tienen se pueden traslapar muy fácilmente y atornillarse, con lo cual se produce continuidad y por lo mismo una mejor eficiencia del elemento, resultando una disminución de material considerable. En la figura 2.12 y 2.13, se presentan ambas secciones.

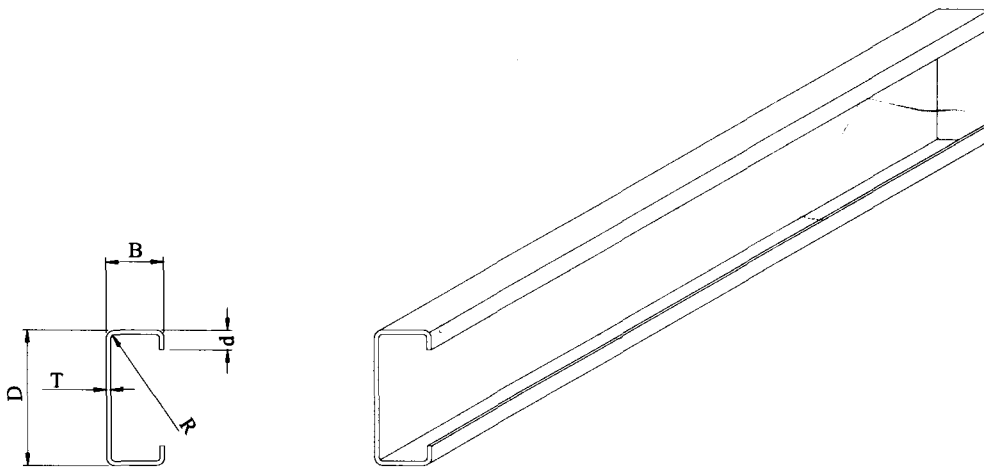


Figura 2.12. Polín "C"

En la actualidad se está usando mucho un elemento llamado monten, el cual se instala en ciertas partes de la cubierta para dar una mayor rigidez

longitudinal a la estructura. Este elemento consta de 2 secciones en "C" formando una sección cajón como se muestra en la figura 2.14.

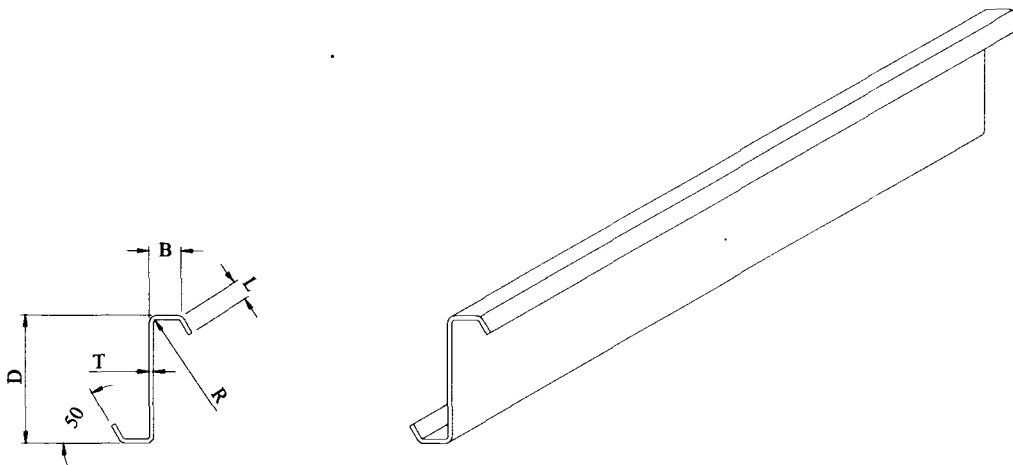


Figura 2.13. Polín "Z"

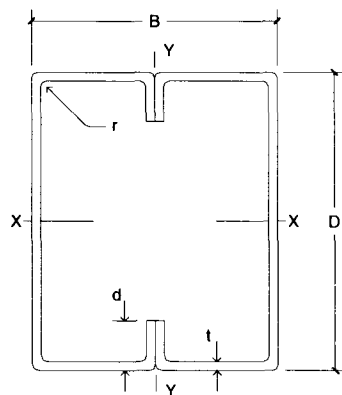


Figura 2.14. Sección cajón a base de 2 secciones en "C"

2.8. Dimensiones básicas de naves industriales de planta rectangular

En el tipo de naves industriales de planta rectangular, hay 3 dimensiones básicas que deben ser definidas desde el inicio de su diseño. Éstas se definen a continuación y se pueden ver gráficamente en las figura 2.1 y figura 2.15:

- Separación entre armaduras, "S". La separación entre armaduras es un factor muy importante en el costo de una nave industrial. Para un diseño óptimo se deben analizar varias opciones con separaciones distintas de tal forma que se pueda hacer una comparación de costos, tanto del punto de vista del peso de la estructura como de la fabricación y montaje de la misma. Al haber una separación grande, implicaría usar menor cantidad de armaduras pero con elementos robustos de tal forma que sean capaces de soportar grandes cargas, mientras que al tener una separación pequeña, la cantidad de armaduras es mayor aunque con elementos esbeltos. Por estas razones, la separación práctica varía en el rango de 8 a 15 metros. Al cumplir con este rango, además de disminuir los costos, la nave industrial adquiere una forma estética debido a que los elementos son de regular tamaño.
- Claro libre entre columnas, "CL". Esta dimensión está ligada directamente a 2 factores que por lo general están dados por el dueño de la nave industrial. El primer factor esta en función del proceso a realizar dentro de la nave, es decir, las maniobras de maquinaria o la instalación de equipo u otras cosas, requieren cierto espacio al que se tiene que ajustar el claro libre entre columnas. El segundo factor se relaciona al espacio interior solicitado por el cliente; en ciertas ocasiones simplemente requiere que se vea más amplio en el interior. Estos 2 factores impactan directamente en el costo; a

medida que el claro sea mayor el costo también será mayor y viceversa.

- **Altura libre, "H".** La altura libre mínima o altura libre necesaria en un edificio industrial, está en función del proceso de fabricación, que por lo general se fija en razón de las necesidades de renovación de aire y de la altura de la máquina o elemento más alto que haya de instalarse. Cuando se requiere grúa viajera en la nave industrial, este elemento es el que determina la altura libre, y en caso de no requerirse, la armadura será la que imponga la altura libre interior.

2.9. Optimización de materiales en el diseño de naves industriales

La optimización de los materiales da como resultado una disminución de costos, que beneficia tanto al cliente como al constructor. El concepto optimizar es un criterio indispensable en la economía, siempre y cuando no se afecte la seguridad estructural ni las condiciones de servicio de la obra. En otras palabras, al reducir la cantidad de materiales no debe haber una menor resistencia en comparación con la requerida, ni tampoco deflexiones mayores a las permitidas. La resistencia estructural es primordial en toda obra, de nada sirve reducir materiales si se pone en peligro a los habitantes de la construcción en caso de alguna falla.

Los fabricantes de perfiles proporcionan tablas de diseño para cada uno de los perfiles elaborados con sus características respectivas. Esto se puede aprovechar al introducir dichas tablas en cualquier tipo de bases de datos, de tal forma que sea posible tomar datos de determinados perfiles para la realización de diseño o análisis de algún elemento.

El diseño óptimo de una trabe carril a base de un perfil rolado W, consiste en determinar el perfil W más liviano que cumpla con los criterios de serviciabilidad y resistencia. Por tal razón, se pueden introducir en una base de datos a todos los perfiles W existentes acomodados de menor a mayor peso. Se realiza un algoritmo que involucre todos los pasos necesarios para analizar la trabe carril y que además tenga la capacidad de leer de una base de datos. Con esto es suficiente para ir analizando cada uno de los perfiles empezando por el de menor peso, e ir desechando los que no cumplan con un determinado requisito, hasta llegar al primer perfil que pase todos los requisitos, mismo que representa el perfil óptimo en cuanto al peso.

Similar a lo dicho en el párrafo anterior se pueden hacer algoritmos para analizar cualquier elemento y optimizarlo.

La optimización de materiales no significa hacer solamente diseños óptimos de elementos, sino también implica realizar una planeación adecuada de las dimensiones de la nave, por ejemplo las mencionadas en el inciso 2.9, misma que involucra directamente al costo total de la obra. Al final de este capítulo se muestra una cadena productiva en donde se involucran a todos los participantes en el desarrollo de una obra. La cadena empieza desde la planeación, prosigue con aspectos de diseño estructural, posteriormente se pasa a la construcción y por último se concluye con la operación.

En resumen, son diversos los factores que intervienen en la optimización de una obra, y por lo tanto es indispensable hacer un buen equipo en donde se interrelacione a todos los participantes de la obra.

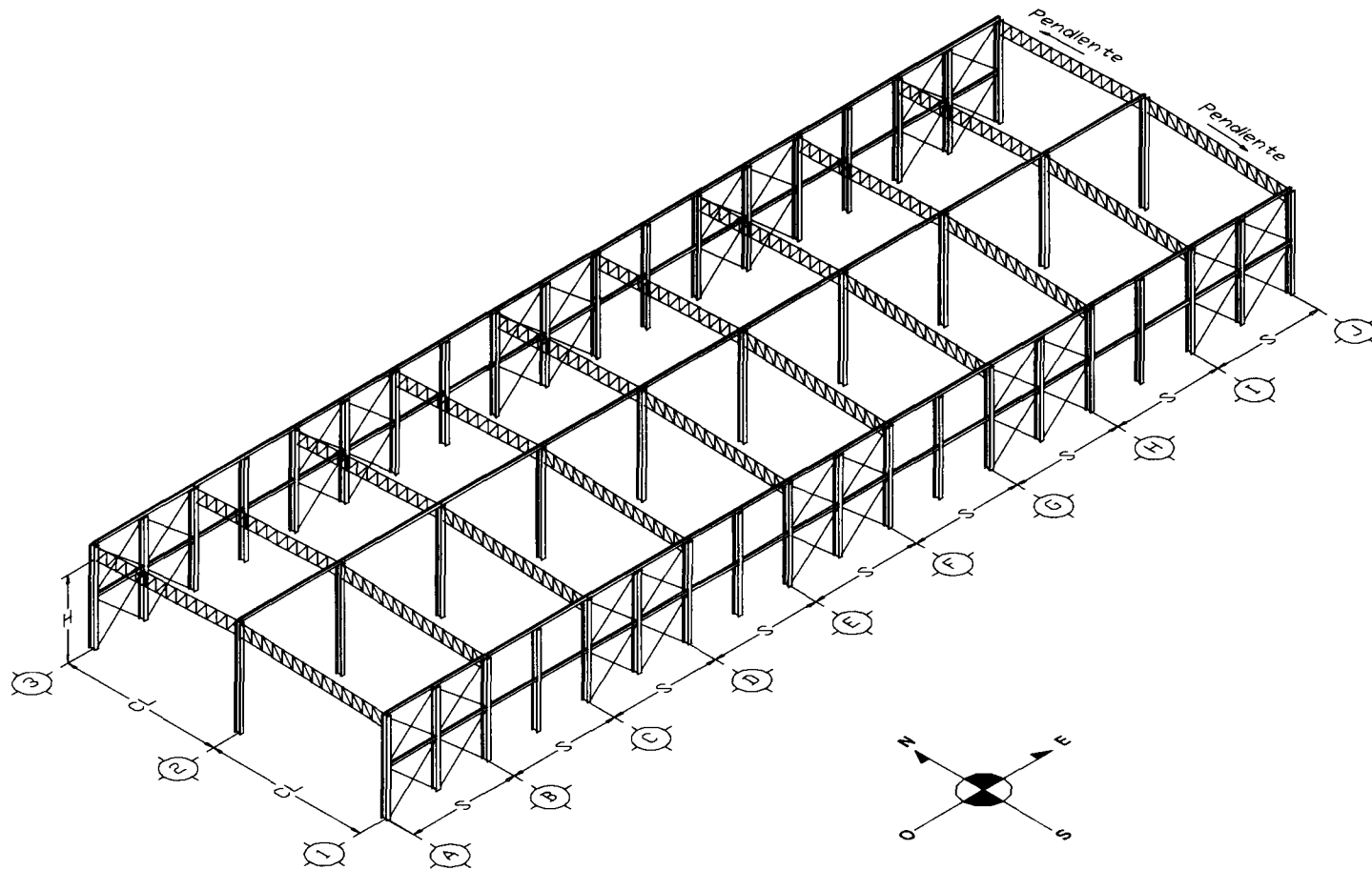
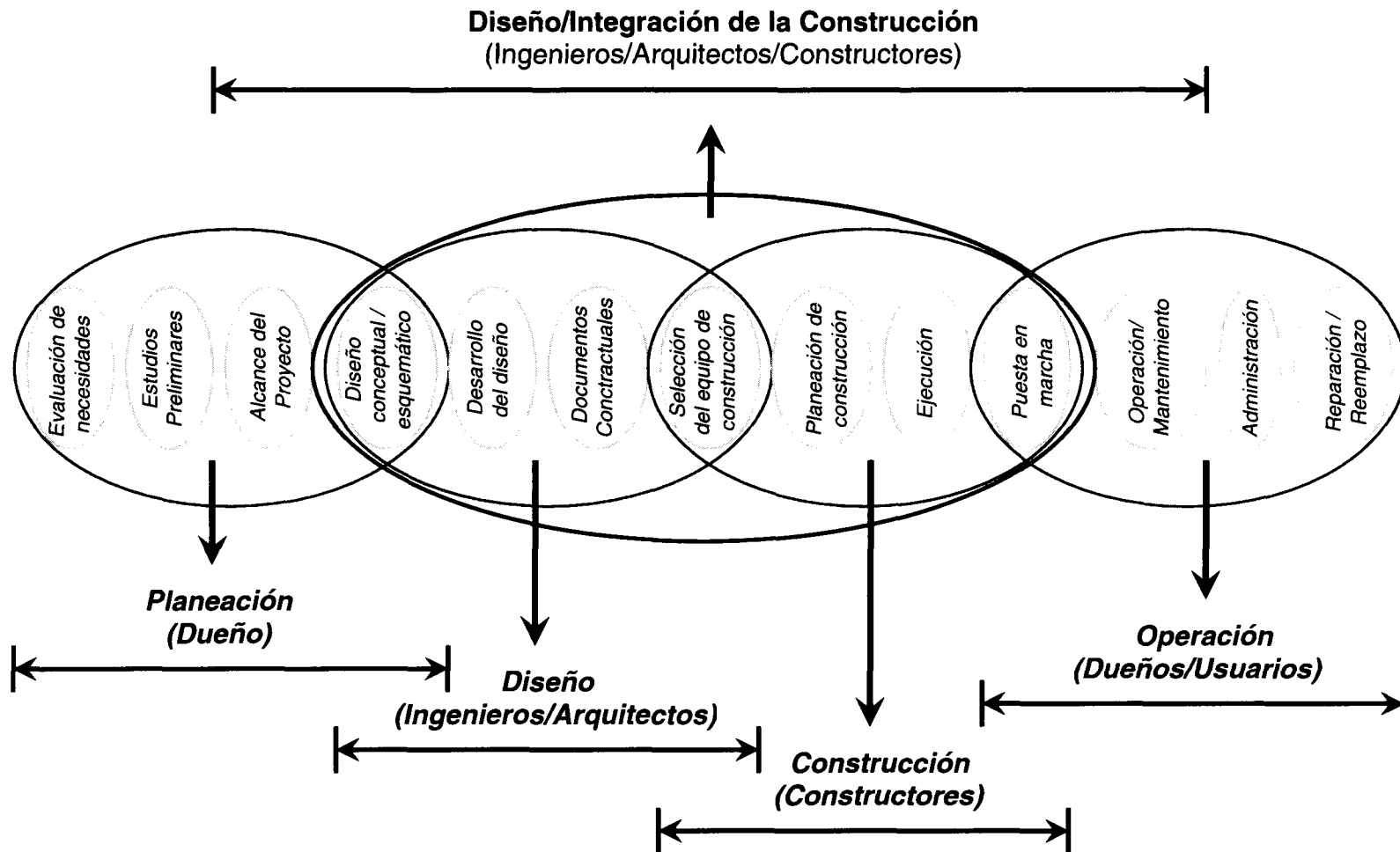


Figura 2.15. Isométrico de una Nave Industrial

Cadena Productiva de un Proyecto (García, 2001)



CAPÍTULO 3. CARGAS ACCIDENTALES

Toda estructura debe ser diseñada adecuadamente, de tal forma que brinde seguridad contra la aparición de todo estado límite de falla posible ante las combinaciones de acciones más desfavorables que puedan presentarse durante su vida esperada. Además no debe rebasar ningún estado límite de servicio ante combinaciones de acciones que corresponden a condiciones normales de operación. El estado límite de falla se refiere al punto en donde la estructura empieza a perder capacidad de carga debido al agotamiento de sus propiedades, por lo que esto puede llevar a que ocurran daños irreversibles que afecten significativamente el comportamiento de la estructura ante nuevas aplicaciones de carga.

El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, considera tres categorías de acciones, de acuerdo con el tiempo en que permanecen sobre las estructuras con su intensidad máxima:

1. Las acciones permanentes son acciones que permanecen en forma continua sobre la estructura y cuya intensidad varía poco con el tiempo. La principal acción que pertenecen a esta categoría es la carga muerta.
2. Las acciones variables son las que permanecen sobre la estructura con una intensidad que varía significativamente con el tiempo. La principal acción que entra en esta categoría es la carga viva.
3. Las acciones accidentales son las que no se deben al funcionamiento normal de la edificación y que pueden alcanzar intensidades significativas sólo durante lapsos breves. Pertenecen a esta categoría: las acciones sísmicas; los efectos del viento; los efectos de

explosiones, incendios y otros fenómenos que pueden presentarse en casos extraordinarios. Será necesario tomar precauciones en las estructuras, en su cimentación y en los detalles constructivos, para evitar un comportamiento catastrófico de la estructura para el caso de que ocurran estas acciones.

El artículo 199 del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal presenta una tabla con valores de cargas vivas recomendadas sobre diferentes tipos de cubiertas o pisos (Tabla 3.1). En esa tabla se mencionan los parámetros W_m , W_a y W , de los cuales se comenta lo siguiente:

- La carga viva máxima W_m se deberá emplear para diseño estructural por fuerzas gravitacionales.
- La carga instantánea W_a se deberá usar para diseño sísmico y por viento y cuando se revisen distribuciones de carga más desfavorables que la uniformemente repartida sobre toda el área;
- La carga media W se deberá emplear en el cálculo de asentamientos diferidos y para el cálculo de flechas diferidas.

Tabla 3.1. Cargas vivas unitarias, (kg/m^2)

<i>Destino de piso o cubierta</i>	<i>W</i>	<i>W_a</i>	<i>W_m</i>
<i>a) Comercios, fábricas y bodegas</i>	<i>0.8W_m</i>	<i>0.9W_m</i>	<i>W_m</i>
<i>b) Cubiertas y azoteas con pendiente no mayor de 5%</i>	<i>15</i>	<i>70</i>	<i>100</i>
<i>c) Cubiertas y azoteas con pendiente mayor de 5%</i>	<i>5</i>	<i>20</i>	<i>40</i>

* La carga unitaria, W_m , no será ser inferior a $350 \text{ kg}/\text{m}^2$

3.1. Diseño por viento

El diseño por viento es muy importante debido a que representa una carga accidental, misma que si no se toma en cuenta puede ocasionar graves daños en la estructura. La Comisión Federal de Electricidad elaboró un manual de diseño por viento en el año de 1993. De este manual se tomó el procedimiento que se presenta a continuación:

3.1.1. Alcance

En la determinación de las velocidades de diseño sólo se consideraron los efectos de los vientos que ocurren normalmente durante el año en todo el país y los causados por huracanes en las costas del Pacífico, del Golfo de México y del Caribe. No se tomaron en cuenta la influencia de los vientos generados por tornados debido a que existe escasa información al respecto y a que son eventos de baja ocurrencia, que solo se presentan en pequeñas regiones del norte del país.

3.1.2. Requisitos generales para el análisis y diseño estructural

A continuación se presentan algunos de los requisitos generales propuestos por la Comisión Federal de Electricidad que son aplicables al diseño de estructuras sometidas a la acción del viento y deberán considerarse como los mínimos indispensables:

- Direcciones de análisis. Las construcciones se analizarán suponiendo que el viento puede actuar por lo menos en dos direcciones horizontales perpendiculares e independientes entre sí. Se elegirán aquellas que representen las condiciones más desfavorables para la estabilidad de la estructura en estudio.
- Presiones interiores. Se presentan en estructuras permeables, esto es, aquellas con ventanas o ventilas que permitan la entrada del viento

al interior de la construcción. El efecto de estas presiones se combinará con el de las presiones exteriores, de tal manera que para el diseño se deben tomar en cuenta los efectos más desfavorables.

- Seguridad durante la construcción. En esta etapa deberán tomarse las medidas necesarias para garantizar la seguridad de las estructuras bajo la acción de un viento de diseño cuya velocidad corresponda a un periodo de retorno de 10 años.

3.1.3. Clasificación de las estructuras según su importancia

Existe una clasificación de las estructuras según su importancia, es decir, dependiendo de la función para la que vaya a ser construida dicha estructura, ésta deberá tener un grado de seguridad para que una velocidad regional de viento máxima establecida por la CFE no sea excedida en un lapso de tiempo. Dentro de la clasificación se tiene al grupo A, grupo B y grupo C. El periodo de retorno para que una velocidad de viento exceda la velocidad regional de viento establecida por CFE es de 200, 50 y 10 años respectivamente para cada grupo.

- Grupo A. Estructuras para las que se recomienda un grado de seguridad elevado. Pertenecen a este grupo aquellas que en cuyo caso de fallar causarían la pérdida de un número importante de vidas, o perjuicios económicos. Ejemplos de este grupo son las construcciones cuya falla impida la operación de plantas termoeléctricas, hidroeléctricas y nucleares. Dentro de esta clasificación también se cuentan los hospitales e inmuebles médicos con áreas de urgencias, estaciones de bomberos, puentes, entre otros.
- Grupo B. Estructuras para las que se recomienda un grado de seguridad moderado. Se encuentran dentro de este grupo aquéllas

que en caso de fallar, representan un bajo riesgo de pérdida de vidas humanas y que ocasionarían daños materiales de magnitud intermedia. Este es el caso de las plantas industriales, bodegas ordinarias, gasolineras, comercios, restaurantes, casas para habitación y edificios.

- Grupo C. Estructuras para las que se recomienda un bajo grado de seguridad. Son aquellas cuya falla no implica graves consecuencias, ni puede causar daños a construcciones de los grupos A y B. Como ejemplo de este grupo, se encuentra a las bodegas provisionales y también a las cimbras.

3.1.4. Procedimientos para determinar las acciones por viento

Existen tres procedimientos para determinar las acciones del viento, los cuales se definen a continuación:

- Análisis estático. Este método se emplea cuando se trata de estructuras suficientemente rígidas, que no sean sensibles a los efectos dinámicos del viento.
- Análisis dinámico. En este se afirma que una construcción es sensible a los efectos dinámicos del viento.
- Pruebas experimentales para evaluar la acción del viento. Estas pruebas deben realizarse cuando se desee conocer la respuesta dinámica de estructuras cuya geometría sea marcadamente diferente de las formas comunes para las cuales existe información disponible en los reglamentos o en la literatura.

3.1.5. Determinación de la velocidad de diseño, V_D

A partir de la velocidad de diseño, V_D , se calculan los efectos del viento. Esta se obtiene con la siguiente ecuación:

$$V_D = F_T F_\alpha V_R$$

En donde:

F_T = factor de topografía (adimensional).

F_α = factor de exposición (adimensional).

V_R = velocidad regional (km/hr).

La velocidad regional se obtiene de la tabla 3.14, que aparece al final de este capítulo. Dicha tabla contiene las velocidades de las ciudades más importantes de México. La tabla original presentada en el manual de la Comisión Federal de Electricidad contiene las velocidades regionales correspondientes a los periodos de retorno de 10, 50, 100, 200 y 2000 años de las 67 ciudades más importantes de México, pero debido a que esta tesis esta enfocada solo a Naves Industriales, se tomaron las velocidades relacionadas al periodo de retorno de 50 años, que es el correspondiente a estructuras del grupo B.

Como se verá mas adelante en este mismo capítulo, el factor de rugosidad y altura, F_α , depende de las condiciones topográficas, de la exposición local del sitio y del tamaño de la estructura. Por tal razón, es necesario determinar la categoría del terreno en la que se encuentre la estructura (Tabla 3.2) y además determinar la clase de la estructura en relación a su tamaño (Tabla 3.3).

Tabla 3.2. Categoría del terreno según su rugosidad (CFE, 1993)

Cat.	Descripción	Ejemplos	Limitaciones
1	Terreno abierto, prácticamente plano y sin obstrucciones	Franjas costeras planas, zonas de pantanos, campos aéreos, pastizales y tierras de cultivo sin setos o bardas alrededor. Superficies nevadas planas.	La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 2000 m o 10 veces la altura de la construcción por diseñar, la que sea mayor.
2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones	Campos de cultivo o granjas con pocas obstrucciones tales como setos o bardas alrededor, árboles y construcciones dispersas.	Las obstrucciones tienen alturas de 1.5 a 10 m, en la longitud mínima de 1500 m.
3	Terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas	Áreas urbanas, suburbanas y de bosques, o cualquier terreno con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas. El tamaño de las construcciones corresponde al de las casas y viviendas.	Las obstrucciones presentan alturas de 3 a 5 m. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 500 m a 10 veces la altura de la construcción, la que sea mayor.
4	Terreno con numerosas obstrucciones largas, altas y estrechamente espaciadas	Centros de grandes ciudades y complejos industriales bien desarrollados.	Por lo menos el 50% de los edificios tienen una altura mayor a 20 m. Las obstrucciones miden de 10 a 30 m de altura. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser la mayor entre 400 m y 10 veces la altura de la construcción.

En la siguiente página se muestra la tabla 3.3 en donde se distingue la clase de la estructura según su tamaño.

Tabla 3.3. Clase de estructura según su tamaño (CFE, 1993)

Clase	Descripción
A	<i>Todo elemento de recubrimiento de fachadas, de ventanerías y de techumbres y sus respectivos sujetadores. Todo elemento estructural aislado, expuesto directamente a la acción del viento. Asimismo, todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical, sea menor que 20 metros.</i>
B	<i>Todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical, varíe entre 20 y 50 metros.</i>
C	<i>Todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical, sea mayor que 50 metros.</i>

- Factor de topografía. Factor que depende de la topografía del sitio. Se obtiene de la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Factor de topografía local, F_T (CFE, 1993)

Sitios	Topografía	F_T
Protegidos	Base de promontorios y faldas de serranías del lado del sotavento.	0.8
	Valles cerrados.	0.9
Normales	Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores que 5%.	1.0
Expuestos	Terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10%, valles abiertos y litorales planos.	1.1

- Factor de exposición. Factor que toma en cuenta el efecto combinado de las características de exposición locales, del tamaño de la construcción y de la variación de la velocidad con la altura. Se calcula con la siguiente expresión:

$$F_{\alpha} = F_C F_{rz}$$

En donde:

F_C = factor que determina la influencia del tamaño de la construcción (Adimensional). Se determina con la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Factor de tamaño F_c (CFE, 1993)

Clase de estructura	F_c
A	1.0
B	0.95
C	0.90

F_{rz} = factor que establece la variación de la velocidad del viento con la altura "Z" en función con la rugosidad del terreno de los alrededores (Adimensional). Se obtiene de acuerdo con las expresiones siguientes :

$$F_{rz} = 1.56 \left[\frac{10}{\delta} \right]^\alpha \quad \text{si } Z \leq 10$$

$$F_{rz} = 1.56 \left[\frac{Z}{\delta} \right]^\alpha \quad \text{si } 10 < Z < \delta$$

$$F_{rz} = 1.56 \quad \text{si } Z \geq \delta$$

En las fórmulas anteriores se involucran los parámetros δ y α ; dichos parámetros se pueden obtener de la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Valores de δ y α (CFE, 1993)

Categoría de terreno	α			δ (m)
	Clase de estructura			
	A	B	C	
1	0.099	0.101	0.105	245
2	0.128	0.131	0.138	315
3	0.156	0.160	0.171	390
4	0.170	0.177	0.193	455

3.1.6. Determinación de la presión dinámica de base, q_z

El viento al toparse con una estructura le provoca presiones sobre toda la superficie que varían según la intensidad de la velocidad y la dirección del viento. Esta presión es conocida como presión dinámica de base; sus unidades están dadas en kg/m^2 y se calcula con:

$$q_z = 0.0048 G V_D^2$$

En donde “G” representa el factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar (adimensional). “G” se obtiene con la expresión:

$$G = \frac{0.392 \times \Omega}{273 + \tau}$$

Donde:

Ω = es la presión barométrica (mm de Hg).

τ = temperatura ambiental ($^{\circ}C$).

La presión barométrica, Ω , se puede obtener de la tabla 3.7, para lo cual es indispensable tener la altura sobre el nivel del mar correspondiente a la ciudad en la que este la estructura. La *ASN* se encuentra en la tabla 3.14, al igual que la temperatura ambiental, τ , para las ciudades más importantes de México.

Tabla 3.7. Relación entre la altitud y la presión barométrica (CFE, 1993)

Altitud (msnm)	Presión barométrica (mm de Hg)
0	760
500	720
1000	675
1500	635
2000	600
2500	565
3000	530
3500	495

3.1.7. Análisis estático

Para naves industriales se aplica el método estático debido a que cumple con las dos condiciones siguientes:

- La relación $H/d \leq 5$, en donde "H" es la altura de la construcción y "D" es la dimensión mínima de la base.
- El periodo fundamental de la estructura es menor o igual que un segundo.

3.1.8. Presiones y fuerzas debido a la acción del viento

El objetivo del diseño por viento es determinar las fuerzas y presiones que se producen sobre todo alrededor de la estructura. A la presión se le conoce como presión de diseño, P_D , y al multiplicarla por un área tributaria se obtiene una fuerza puntual, que comúnmente en naves industriales se encuentra en los apoyos de polines y largueros, debido a que reciben toda la presión de las láminas de recubrimiento, misma que la transmiten a la estructura principal en forma puntual. La presión de diseño esta dada por:

$$P_D = P_e - P_i$$

Tanto P_D como P_e y P_i , están dadas en kg/m^2 .

En donde:

$P_e =$ presión exterior.

$P_i =$ presión interior.

Presión exterior

La presión exterior sobre una de las superficies de una construcción cerrada se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$P_e = C_{pe} K_A K_L q_z$$

q_z = presión dinámica de base a una altura Z sobre el nivel del terreno (inciso 3.1.6).

C_{pe} = coeficiente de presión exterior (adimensional). En las tablas 3.8, 3.9 y 3.10, se presentan valores de este coeficiente para muros y techos de construcciones con planta rectangular cerrada.

K_A = factor de reducción de presión por tamaño de área, es adimensional. Este factor, depende del área tributaria de diseño y se obtiene de la tabla 3.11.

K_L = factor de presión local, es adimensional. Para el diseño de elementos principales este factor se toma con el valor de la unidad.

Tabla 3.8. Coeficiente de presión exterior, C_{pe} , para muros en barlovento y sotavento de construcciones con planta rectangular cerrada (CFE, 1993)

Superficie	Dirección del Viento θ	$\frac{d}{b}$	Inclinación del techo γ	C_{pe}
Barlovento	Normal o paralela a las generatrices	Cualquiera	Cualquiera	0.8
Sotavento	Normal a las generatrices ($\theta = 0^\circ$)	≤ 1	$< 10^\circ$	-0.5
		$= 2$		-0.3
		≥ 4		-0.2
		Cualquiera	$10^\circ \leq \gamma \leq 15^\circ$	-0.3
			$= 20^\circ$	-0.4
			$\geq 25^\circ$	-0.5
	Paralelo a las generatrices ($\theta = 90^\circ$)	≤ 1	Cualquiera	-0.5
		$= 2$		-0.3
		≥ 4		-0.2

Tabla 3.9. Coeficiente de presión exterior, C_{pe} , para zonas de muros laterales de construcciones con planta rectangular cerrada (CFE, 1993)

Distancia horizontal a lo largo de un muro lateral medida a partir de la arista común con el muro de barlovento	Coeficiente de presión exterior C_{pe}
de 0 a 1H	-0.65
de 1H a 2H	-0.5
de 2H a 3H	-0.3
>3H	-0.2

Tabla 3.10. Coeficiente de presión exterior, C_{pe} , para zonas de techos de construcciones con planta rectangular cerrada (CFE, 1993)

Dirección del viento θ	Ángulo γ	Relación $\frac{H}{d}$	Distancia horizontal sobre el techo medida a partir de la arista superior del muro de barlovento	C_{pe}	
				Barlovento	Sotavento
Normal a las generatrices $\theta = 0^\circ$	10°	≤ 0.25	Toda el área del techo	0.7	-0.3
	15°			-0.5, 0.0	-0.5
	20°			-0.3, 0.2	-0.6
	25°			-0.2, 0.3	-0.6
	30°			-0.2, 0.3	-0.6
	35°			0.0, 0.4	-0.6
	45°			0.5	-0.6
	≥ 60°			0.01 γ	-0.6
	10°	0.50	Toda el área del techo	-0.9	-0.5
	15°			-0.7	-0.5
	20°			-0.4, 0.0	-0.6
	25°			-0.3, 0.2	-0.6
	30°			-0.2, 0.2	-0.6
	35°			-0.2, 0.3	-0.6
	45°			0.0, 0.4	-0.6
	≥ 60°			0.01 γ	-0.6
	10°	≥ 1.0	Toda el área del techo	-1.3	-0.7
	15°			-1.0	-0.6
	20°			-0.7	-0.6
	25°			-0.5, 0.0	-0.6
	30°			-0.3, 0.2	-0.6
	35°			-0.2, 0.2	-0.6
	45°			0.0, 0.3	-0.6
	≥ 60°			0.01 γ	-0.6
Normal a las generatrices $\theta = 0^\circ$ y $\gamma < 10^\circ$ o paralela a las generatrices $\theta = 90^\circ$ y γ todos		≤ 0.5	de 0 a 1H de 1H a 2H de 2H a 3H > 3H	-0.9 -0.5 -0.3 -0.2	
		≥ 1.0	de 0 a 1H > H/2	-1.3 -0.7	

Para las tablas 3.8, 3.9 y 3.10 se presenta la figura 3.1 y 3.2 como complemento para explicar mejor los parámetros requeridos en dichas tablas.

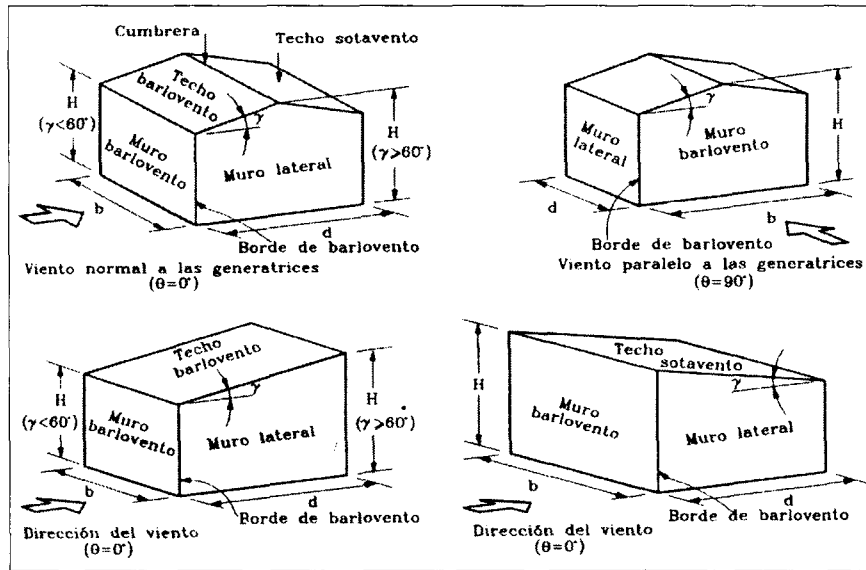


Figura 3.1. Definición de parámetros de construcción con planta cerrada (CFE, 1993)

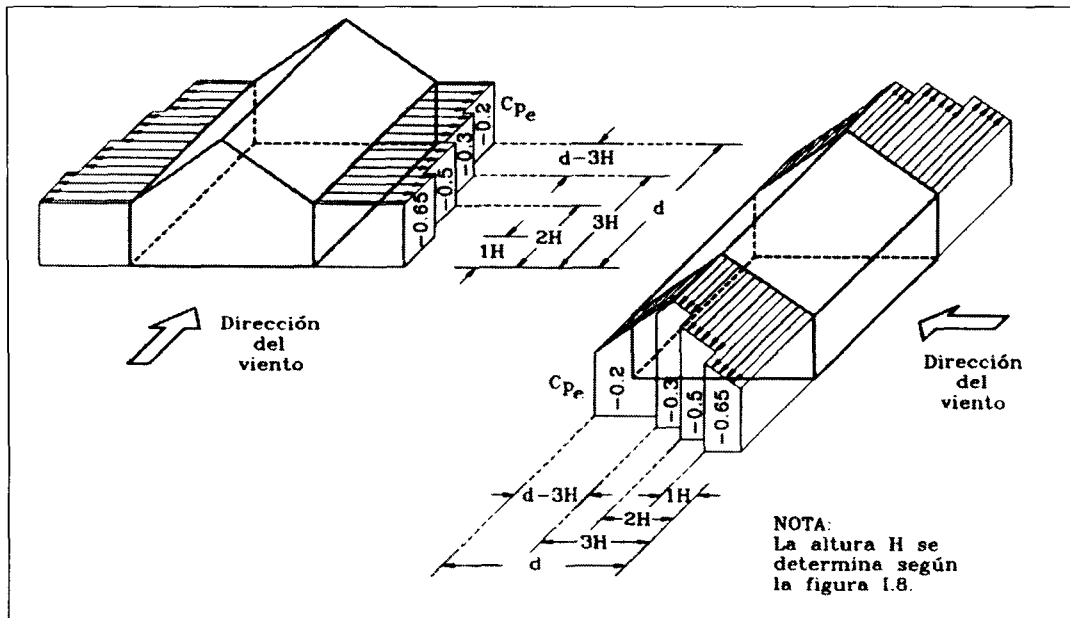


Figura 3.2. Definición de zonas en muros laterales para aplicar los coeficientes de presión exterior (CFE, 1993)

Tabla 3.11. Factor de reducción, K_A , para techos y muros laterales (CFE, 1993)

Área tributaria en m^2 A	Factor de reducción K_A
≤ 10	1.0
25	0.9
≥ 100	0.8

Presión interior

La presión interior dentro de una de las superficies de una construcción se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$P_i = C_{pi} q_z$$

q_z = presión dinámica de base a una altura Z sobre el nivel del terreno (inciso 3.1.6).

C_{pi} = coeficiente de presión interior (adimensional). En las tablas 3.12(a) y 3.12(b), se presentan valores de este coeficiente para construcciones con planta rectangular cerrada con muros permeables y para construcciones con planta rectangular cerrada con superficies abiertas, respectivamente.

Hay situaciones en las que toda la estructura se encuentra sellada, es decir, no cuenta con aberturas permanentes, por lo que la presión interna es igual a cero. En los demás casos, se tiene que estudiar la situación más crítica que pueda presentarse al analizar las tablas 3.1(a) y 3.12(b) en conjunto con los resultados de las presiones externas, debido a que en conjunto producen la presión de diseño.

Tabla 3.12(a). Coeficiente de presión interior, C_{pi} , para construcciones con planta rectangular cerrada y muros permeables (CFE, 1993)

Estado de permeabilidad de la construcción	C_{pi}
1. <i>Un muro permeable, los otros impermeables:</i>	
a) <i>Viento normal al muro permeable</i>	0.6
b) <i>Viento normal a un muro impermeable</i>	-0.3
2. <i>Dos o tres muros igualmente permeables, el (los) otro(s) impermeable(s):</i>	
c) <i>Viento normal a un muro permeable</i>	0.2
d) <i>Viento normal a un muro impermeable</i>	-0.3
3. <i>Todos los muros igualmente permeables.</i>	<i>-0.3 ó 0.0, según lo que produzca la combinación de carga más desfavorable.</i>
4. <i>Construcciones selladas eficientemente y que tengan ventanas que no pueden abrirse.</i>	<i>-0.2 ó 0.0, según lo que produzca la combinación de carga más desfavorable.</i>

Tabla 3.12(b). Coeficiente de presión interior, C_{pi} , para construcciones con planta rectangular cerrada y superficies con aberturas (CFE, 1993)

Aberturas en la construcción		C_{pi}
1. Aberturas dominantes:		
a) <i>En el muro de barlovento:</i>		
<i>La relación entre el área</i>	<i>0.5 o menor</i>	<i>-0.3 ó 0.0</i>
<i>Abierta de este muro y el</i>	<i>1.0</i>	<i>± 0.1</i>
<i>área abierta total de los</i>	<i>1.5</i>	<i>0.3</i>
<i>techos y los otros muros</i>	<i>2.0</i>	<i>0.5</i>
<i>(incluyendo permeabilidad),</i>	<i>3.0</i>	<i>0.6</i>
<i>sometidos a succión exterior, es igual a:</i>	<i>6.0 o mayor</i>	<i>0.8</i>
b) <i>En el muro de sotavento:</i>		
		<i>-0.5</i>
c) <i>En el muro lateral:</i>		
		<i>Valor de C_{pi} para muros laterales (tabla 3.9)</i>
d) <i>En el techo:</i>		
		<i>Valor de C_{pi} para techos (tabla 3.10)</i>
2. Igual área de aberturas en dos o más muros		<i>-0.3 ó 0.0, según lo que produzca la combinación de carga más desfavorable.</i>

3.2. Diseño por sismo

Un sismo produce una carga accidental lateral muy importante, que debe ser tomada en cuenta a la hora de hacer un diseño estructural. Esta carga se puede representar en cargas laterales puntuales sobre las masas de la estructura. Los objetivos del diseño sísmico son cumplir con los siguientes estados límite:

- Estado límite de servicio para el cual no se excedan deformaciones que ocasionen pánico a los ocupantes, interferencia con el funcionamiento de equipo e instalaciones, ni daños en elementos no estructurales.
- Estado límite de integridad estructural, para el cual se puede presentar daño no estructural y daño estructural menor.
- Estado límite de supervivencia, para el cual puede haber daño estructural significativo, y hasta en ocasiones más allá de lo económicamente reparable, pero se mantiene la estabilidad general de la estructura y se evita el colapso.

La Comisión Federal de Electricidad elaboró un manual de diseño por sismo en el año de 1993 . De este manual se sustrajo la siguiente información:

3.2.1. Clasificación de las estructuras según su importancia

Al igual que en el diseño por viento, en el diseño por sismo también se hace una clasificación de las estructuras; dichas clasificaciones son idénticas, es decir, tanto en el diseño por sismo como por viento se utiliza el mismo criterio (Apartado 3.1.3).

3.2.2. Factor de comportamiento sísmico, "Q"

En la actualidad, la forma más adecuada de caracterizar a las estructuras en función de su ductilidad, consiste en el empleo del factor de comportamiento sísmico, "Q", el cual en realidad no sólo está asociado a la ductilidad estructural, sino también a la estructuración misma, al deterioro o efecto que puede llegar a contrarrestar gran parte de la capacidad extra en resistencia que suministra la ductilidad y a reservas de capacidad ante carga sísmica. Este factor puede tomar valores desde 0.8 hasta 4, dependiendo del tipo de estructuración que utilice la estructura a diseñar.

3.2.3. Factor reductivo por ductilidad

Para fines de diseño es necesario tener en cuenta el comportamiento inelástico de la estructura, aunque sea de manera aproximada. Para ello las coordenadas espectrales (Apartado 3.2.5) se podrán reducir dividiéndolas entre el factor reductivo Q' a fin de obtener las fuerzas sísmicas reducidas por ductilidad. Para cualquier tipo de estructura, el factor reductivo se calcula de la forma siguiente:

$$Q' = \begin{cases} 1 + (Q - 1) \frac{T}{T_a} & \text{si } T < T_a \\ Q & \text{si } T \geq T_a \end{cases}$$

En donde:

T = periodo fundamental de vibración de la estructura.

T_a = primer periodo característico del espectro de diseño.

3.2.4. Regionalización sísmica de la República Mexicana

Para fines de diseño sísmico, la República Mexicana se ha dividido en cuatro zonas (A, B, C y D), siendo la zona "A" una región de poca intensidad sísmica, mientras que la zona "D" la región de mayor intensidad sísmica. La figura 3.3 muestra cada una de estas zonas. En la tabla 3.14 que se encuentra al final de este capítulo, se presenta la zona sísmica que le corresponde a cada una de las 67 ciudades más importantes de México.

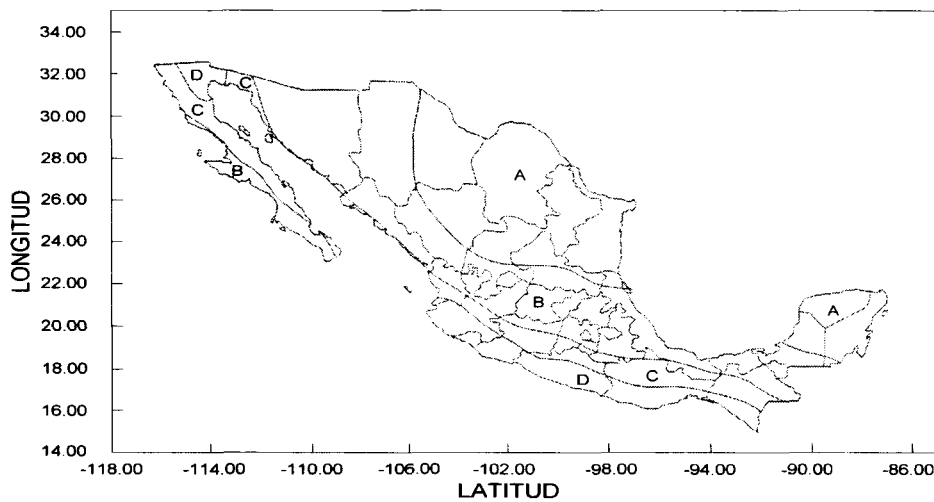


Figura 3.3. Regionalización sísmica de la República Mexicana (CFE, 1993)

3.2.5. Espectro para diseño sísmico

El espectro de diseño representa una ayuda de diseño proporcionada por la Comisión Federal de Electricidad. En la realización de los espectros de diseño se realizó una investigación exhaustiva de todos los sismos que se han registrado en México. Los criterios y recomendaciones especificados en ellos, están basados en los resultados de investigaciones realizadas sobre los fenómenos físicos involucrados en la respuesta estructural ante los temblores, tales como los efectos de fuente, trayecto, sitio, interacción suelo-estructura y

comportamiento estructural, entre otros. En la figura 3.4 se representa en forma general a un espectro de diseño con sus parámetros.

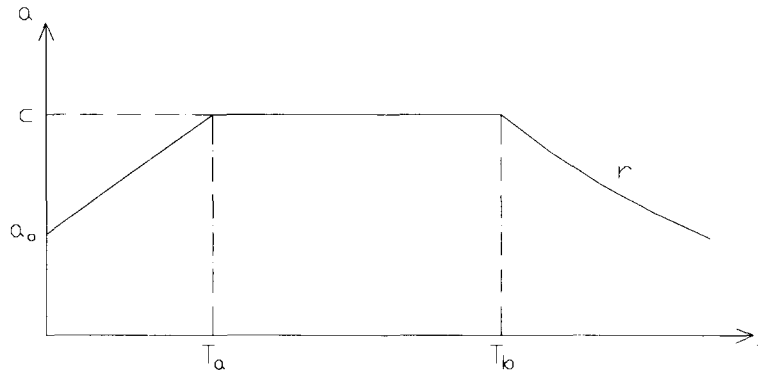


Figura 3.4. Parámetros del espectro de diseño (CFE, 1993)

Las ordenadas del espectro de aceleraciones de diseño sísmico, “a”, expresadas como fracción de la aceleración de la gravedad, están dadas por las siguientes expresiones:

$$a = \begin{cases} a_0 + (c - a_0) \frac{T}{T_a} & \text{si } T < T_a \\ c & \text{si } T_a \leq T \leq T_b \\ c \left(\frac{T_b}{T} \right)^r & \text{si } T > T_b \end{cases}$$

En donde:

a_0 = coeficiente de aceleración del terreno.

c = coeficiente sísmico.

T = periodo natural de interés.

T_a = primer periodo característico que delimita la meseta.

T_b = segundo periodo característico que delimita la meseta.

r = exponente que define la parte curva del espectro de diseño.

A continuación se presenta la tabla 3.13 con los valores de los parámetros del espectro de diseño para las diferentes zonas sísmicas y distintos tipos de terreno de cimentación para estructuras del grupo B, debido a que este es el grupo al que pertenecen las naves industriales.

Tabla 3.13. Espectros de diseño para estructuras del grupo B (CFE, 1993)

Zona sísmica	Tipo de suelo	a_o	c	T_a (seg)	T_b (seg)	r
A	Firme	0.02	0.08	0.20	0.60	1/2
	Intermedio	0.04	0.16	0.30	1.50	2/3
	Blando	0.05	0.20	0.60	2.90	1
B	Firme	0.04	0.14	0.20	0.60	1/2
	Intermedio	0.08	0.30	0.30	1.50	2/3
	Blando	0.10	0.36	0.60	2.90	1
C	Firme	0.36	0.36	0.00	0.60	1/2
	Intermedio	0.64	0.64	0.00	1.40	2/3
	Blando	0.64	0.64	0.00	1.90	1
D	Firme	0.50	0.50	0.00	0.60	1/2
	Intermedio	0.86	0.86	0.00	1.20	2/3
	Blando	0.86	0.86	0.00	1.70	1

3.2.6. Elección del tipo de análisis sísmico

Para el análisis sísmico de naves industriales se puede recurrir al método estático o al método dinámico. El método estático toma en cuenta un modo de vibrar de la estructura y es válido para construcciones no mayores a 60 metros de altura; mientras que el método dinámico toma en cuenta varios modos de vibrar de la estructura y es aplicable a cualquier tipo de estructura. Por reglamento para estructuras mayores a 60 metros de altura, el análisis dinámico es el único que se puede aplicar.

3.2.7. Análisis estático

El método estático consta esencialmente de los siguientes pasos:

1. Calcular las fuerzas laterales aplicadas a los centros de masa que produzcan efectos equivalentes a la acción sísmica.
2. Distribuir las fuerzas laterales y los momentos torsionales asociados a dichas fuerzas entre los sistemas resistentes a carga lateral que conforman la estructura.
3. Analizar cada sistema resistente ante la carga lateral que le corresponda.

Valuación de las fuerzas sísmicas sin estimar el periodo fundamental de la estructura

Cada una de las fuerzas de inercia se toma igual al peso de la masa que corresponde multiplicado por un coeficiente proporcional a la altura de la masa en cuestión sobre el desplante:

$$P_i = \frac{c}{Q} \frac{W_i h_i}{\sum_{i=1}^n W_i h_i} W_T$$

En donde:

c = coeficiente sísmico.

Q = factor de comportamiento sísmico.

W_i = es el peso de la masa "i".

h_i = altura correspondiente a la masa "i" sobre el desplante.

W_T = peso total de la estructura.

Como comprobación, la sumatoria de todas las fuerzas de inercia, $\sum_{i=1}^n P_i$, debe ser igual al cortante basal dado por:

$$V_b = \frac{c}{Q} W_T$$

Valuación de las fuerzas sísmicas estimando el periodo fundamental de la estructura

En ciertas ocasiones se podrá utilizar fuerzas cortantes menores a las calculadas en el inciso anterior, siempre y cuando se tome en cuenta el valor aproximado del periodo fundamental de vibración de la estructura.

El periodo fundamental de vibración de la estructura se puede obtener aproximadamente con la siguiente ecuación:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n W_i d_i^2}{g \sum_{i=1}^n P_i d_i}}$$

En donde:

P_i = fuerza lateral que actúa sobre la masa "i".

d_i = desplazamiento de la masa "i" en la dirección de P_i .

g = aceleración de la gravedad.

Después de haber obtenido el periodo fundamental de vibración de la estructura, se procede a entrar al espectro de diseño correspondiente para verificar si el reglamento nos permite reducir las fuerzas laterales, así mismo también reducir el cortante basal.

El reglamento especifica lo siguiente:

- Si $T \leq T_b$, no se permite la reducción de las fuerzas laterales.
- Si $T > T_b$, la fuerza lateral en la masa "i", es proporcional a $(k_1 h_i + k_2 h_i^2) W_i$, por lo que se genera una reducción en las fuerzas de entrepiso y por consiguiente en el cortante basal.

Ahora, las fuerzas laterales se calculan con:

$$P_i = \frac{V_o f_i}{\sum_{i=1}^n f_i}$$

En donde:

$$f_i = k_1 W_i h_i + k_2 W_i h_i^2$$

$$V_b = \frac{a}{Q} W_T$$

$$a = qc$$

$$q = \left(\frac{T_b}{T} \right)^r$$

$$k_1 = q[1 - r(1 - q)] \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{\sum_{i=1}^n w_i h_i}$$

$$k_2 = 1.5rq(1 - q) \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{\sum_{i=1}^n w_i h_i}$$

3.2.8. Análisis modal espectral

En el análisis modal espectral se debe incluir el efecto de todos los modos naturales de vibración con periodo mayor o igual a 0.4 segundos.

Las masas de una estructura de varios grados de libertad sometida a excitación sísmica en su base, sufren movimientos que están gobernados por la ecuación matricial de equilibrio dinámico siguiente:

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = -M \ddot{u}_g$$

En donde:

M = matriz de masas de la estructura.

C = matriz de amortiguamiento de la estructura.

K = matriz de rigidez de la estructura.

u = vector de desplazamientos relativos de las masas.

\dot{u} = vector de velocidades de las masas.

\ddot{u} = vector de aceleraciones de las masas.

\ddot{u}_g = aceleración del terreno.

Para resolver la ecuación anterior es necesario resolver el problema de valores característicos definido por la ecuación matricial homogénea:

$$|K - \omega_i^2 M| \varphi_i = 0$$

En donde:

ω_i = frecuencia natural de vibrar para el modo "i".

φ_i = modo natural de vibrar "i".

Para obtener valores característicos diferentes de cero, es necesario que el determinante del sistema se anule, por lo que se iguala a cero y se le hace un cambio de variable como se muestra a continuación:

$$|K - \omega_i^2 M| = 0$$

$$\lambda = \omega_i^2$$

$$|K - \lambda M| = 0$$

El desarrollo del determinante $|K - \lambda M| = 0$, conduce a obtener un polinomio de grado "n" en λ , en donde "n" es el número de modos de vibrar de la estructura. Al resolver el polinomio se encuentra la frecuencia fundamental de vibración para cada modo, la cual a su vez sirve para calcular el periodo natural de vibrar con la siguiente fórmula:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

El periodo natural de vibrar, T , es el tiempo en segundos que tarda una estructura en recorrer un ciclo completo de oscilación.

Para la solución del problema de valores característicos existen varios métodos. Uno de los más conocidos es el método de Jacobi.

Como se mencionó anteriormente, φ representa la matriz modal, misma que no se encuentra normalizada. Para normalizar dicha matriz se calcula primeramente la matriz de masa generalizada. Después, cada una de las columnas de la matriz modal, se divide por la raíz cuadrada del elemento correspondiente a la diagonal de la matriz de masa generalizada.

Cada uno de los modos de vibrar tiene una participación en la respuesta sísmica, la cual esta definida por un coeficiente de participación dado por:

$$P_i = \varphi^T M J$$

En donde:

φ = matriz modal normalizada.

J = vector unitario de "n" grados como modos de vibrar tenga la estructura.

Desplazamientos de masas por el método de análisis modal espectral

Al producirse una excitación sísmica en una estructura, se provocan desplazamientos en cada una de sus masas de dicha estructura. Los desplazamientos máximos de cada masa para cada modo, se pueden calcular con:

$$U_{ni \max} = \frac{A_i P_i \varphi_i}{\omega_i^2} \left(\frac{Q}{Q'} \right)$$

En donde:

U_n = desplazamiento de la masa " n".

A_i = aceleración de las masas correspondiente al modo " i".

P_i = coeficiente de participación de cada modo.

φ_i = modo de vibrar " i".

ω_i^2 = frecuencia natural de vibrar correspondiente al modo " i".

Q = factor de ductilidad.

Q' = factor de ductilidad reducido.

La aceleración de las masas, " A", esta en función de la ordenada del espectro de aceleraciones de diseño sísmico, "a", y de la gravedad, "g":

$$A = a g$$

En el inciso 3.2.5, se define a la ordenada del espectro de aceleraciones de diseño sísmico, mientras que al factor de ductilidad "Q" y al factor de ductilidad reductivo, Q' , se definen en el inciso 3.2.2 y 3.2.3, respectivamente.

Valuación de las fuerzas sísmicas por el método de análisis modal espectral

Las fuerzas sísmicas máximas que se producen al vibrar en la estructura en su i -ésimo modo, se obtienen con:

$$F_i = K \delta_i$$

En donde:

$$\delta_i = \text{desplazamiento relativo.}$$

El factor de ductilidad representa la capacidad que una estructura tiene para disipar energía, por lo que puede ser representada en una reducción de las fuerzas sísmicas, como se muestra a continuación:

$$F_i = \frac{K \delta_i}{Q_i}$$

En donde:

$$Q_i = \text{factor reductivo de ductilidad para el modo "i".}$$

En vista de que las respuestas modales no ocurren simultáneamente, la superposición directa de ellas representa una cota superior a la respuesta total de la estructura. Por ello, la respuesta modal R_i , donde R_i puede ser fuerza cortante, desplazamiento lateral, etc, se combinarán para calcular las respuestas totales R de acuerdo con la ecuación dada por Rosenblueth en 1951 (Bazán, 1998):

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^n R_i^2}$$

La ecuación anterior es adecuada para sistemas cuyos periodos sean bastante diferentes (periodos que difieran al menos 10 por ciento entre sí).

Tabla 3.14. Características de las ciudades más importantes de México

Ciudad	Velocidad regional (km/hr)	ASNM (m)	Temp. media anual (°C)	Zona sísmica
Acapulco, Guerrero	162	28	27.5	D
Aguascalientes, Aguascalientes	141	1908	18.2	B
Campeche, Campeche	132	5	26.1	A
Cd. Guzmán, Jalisco	120	1507	21.5	D
Cd. Juárez, Chihuahua	144	1144	17.1	B
Cd. Obregón, Sonora	169	100	26.1	B
Cd. Victoria, Tamaulipas	170	380	24.1	A
Coatzacoalcos, Veracruz	130	14	26	B
Colima, Colima	128	494	24.8	D
Colotlán, Jalisco	148	1589	21.4	B
Comitán, Chiapas	99	1530	18.2	C
Cozumel, Quintana Roo	158	10	25.5	A
Cuernavaca, Morelos	108	1560	20.9	B
Culiacán, Sinaloa	118	84	24.9	B
Chapingo, Estado de México	110	2250	15	B
Chetumal, Quintana Roo	150	3	26	A
Chihuahua, Chihuahua	136	1423	18.7	A
Chilpancingo, Guerrero	120	1369	20	D
Ensenada, Baja California	117	1889	17.5	C
Guadalajara, Jalisco	148	13	16.7	B
Guanajuato, Guanajuato	164	1589	19.1	B
Guaymas, Sonora	140	2050	17.9	B
Durango, Durango	160	44	24.9	B
Hermosillo, Sonora	151	237	25.2	B
Jalapa, Veracruz	137	1427	17.9	B
La Paz, Baja California	171	10	24	B
Lagos de Moreno, Jalisco	130	1942	18.1	B
León, Guanajuato	140	1885	19.2	B
Manzanillo, Colima	158	8	26.6	D
Mazatlán, Sinaloa	213	8	24.1	B
Mérida, Yucatán	156	9	25.9	A
Mexicali, Baja California	149	1	22.2	D
México, Distrito Federal	115	2240	23.4	B
Monclova, Coahuila	145	591	21.6	A
Monterrey, Nuevo León	143	538	22.1	A
Morelia, Michoacán	92	1941	17.6	C
Nuevo Casas Grandes, Chihuahua	134	1550	17.6	B
Oaxaca, Oaxaca	114	1550	20.6	D
Orizaba, Veracruz	153	1284	19	B
Pachuca, Hidalgo	128	2426	14.2	B
Parral de Hidalgo, Chihuahua	141	1661	17.7	A
Piedras Negras, Coahuila	155	220	21.6	A
Progreso, Yucatán	163	8	25.4	A

Nota: la velocidad regional de cada una de las ciudades corresponde a un periodo de retorno de 50 años.

Continuación de la tabla 3.14

Ciudad	Velocidad regional (km/hr)	ASNM (m)	Tem. Media anual (°C)	Zona Sísmica
<i>Puebla, Puebla</i>	106	2150	17.3	B
<i>Puerto Cortés, Baja California</i>	155	5	21.4	B
<i>Puerto Vallarta, Jalisco</i>	146	2	26.2	D
<i>Querétaro, Querétaro</i>	118	1842	18.7	B
<i>Río Verde, San Luis Potosí</i>	111	987	20.9	B
<i>Salina Cruz, Oaxaca</i>	126	6	26	D
<i>Saltillo, Coahuila</i>	124	1609	17.7	A
<i>S. C. de las Casas, Chiapas</i>	92	2276	14.8	C
<i>S. Luis Potosí, San Luis Potosí</i>	141	1877	17.9	B
<i>S. la Marina, Tamaulipas</i>	167	25	24.1	A
<i>Tampico, Tamaulipas</i>	160	12	24.3	A
<i>Tamuín, San Luis Potosí</i>	138	140	24.7	B
<i>Tapachula, Chiapas</i>	111	182	26	D
<i>Tepic, Nayarit</i>	102	915	26.2	C
<i>Tlaxcala, Tlaxcala</i>	102	2252	16.2	B
<i>Toluca, Estado México</i>	93	2680	12.7	C
<i>Torreón, Coahuila</i>	168	1013	20.5	A
<i>Tulancingo, Hidalgo</i>	106	2222	14.9	B
<i>Tuxpan, Veracruz</i>	151	14	24.2	B
<i>Tuxtla Gutiérrez, Chiapas</i>	106	528	24.7	C
<i>Valladolid, Yucatán</i>	163	8	26	A
<i>Veracruz, Veracruz</i>	175	16	25.2	B
<i>Villahermosa, Tabasco</i>	127	10	26.8	B
<i>Zacatecas, Zacatecas</i>	122	2612	13.5	A

Nota: la velocidad regional de cada una de las ciudades corresponde a un periodo de retorno de 50 años

CAPÍTULO 4. CRITERIOS DE DISEÑO DE TRABE CARRIL

Generalmente, en edificios industriales se requiere de maquinaria que permita mover rápidamente objetos muy pesados. Una herramienta utilizada frecuentemente para esta función es la grúa viajera, misma que es soportada por traveses carril en sus extremos (Figura 4.1). Las capacidades comerciales de las grúas se encuentran entre 2 y 120 kips, siendo las de 10, 15, 20 y 30 kips las más utilizadas. Los fabricantes más grandes de estos elementos se encuentran en Estados Unidos, Brasil y China.

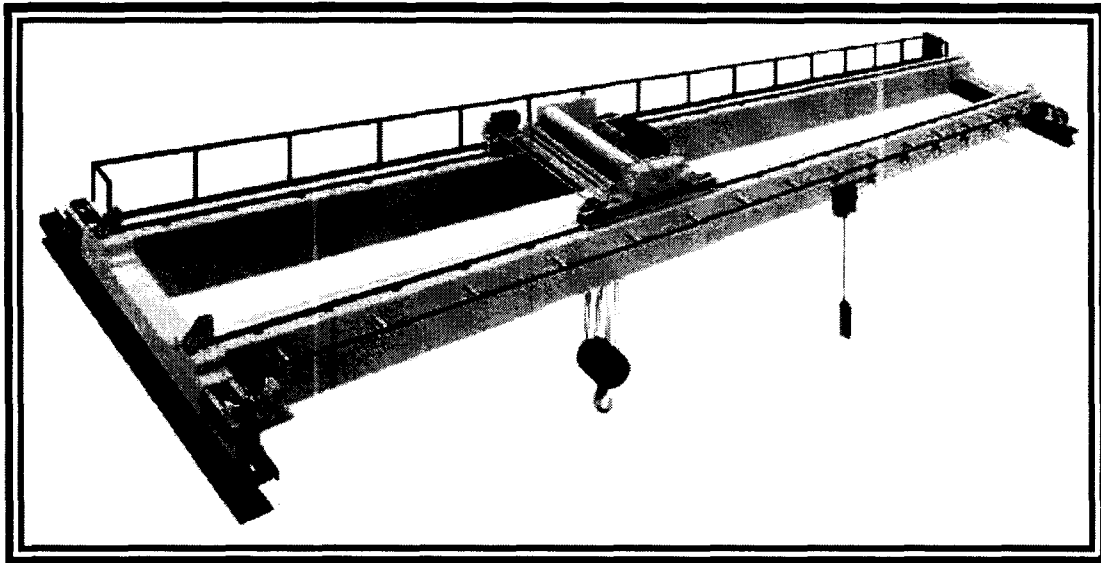


Figura 4.1. Grúa viajera soportada en sus extremos por un perfil W roloado con un canal soldado al patín superior

La trabe carril es un elemento estructural muy importante debido a que debe soportar el peso de la grúa viajera junto con las cargas que ésta levanta, además de las cargas de impacto y frenado que se producen por las maniobras de trabajo en la transportación de equipo, maquinaria u otros elementos pesados. Los perfiles más comunes de este elemento estructural son:

- Perfil a base de 3 placas soldadas con sección I .
- Perfil a base de 4 placas soldadas con sección cajón.
- Perfil W rolado con un canal soldado al patín superior.
- Perfil W rolado.

La sección compuesta de perfil W rolado con un canal soldado, tiene como finalidad una mayor resistencia en su patín superior a los efectos provocados por cargas laterales producidas por el peso propio del trolley y la carga que transporta al realizar un frenado lateral. La carga dinámica causada por el impacto vertical, movimiento del trolley entre otros factores representa un estado de carga importante a considerar en el análisis y diseño de este tipo de elementos.

El efecto de torsión causado por los estados de cargas horizontales en ciertas ocasiones llega a producir esfuerzos de consideración en los perfiles de sección abierta, por lo que es de suma importancia que se tome en cuenta en el diseño de una trabe carril.

4.1. Analogía entre torsión y flexión en el plano

En la trabe carril se produce torsión debido a que las cargas laterales se encuentran aplicadas en el patín o placa superior del perfil, mismos que están fuera del centro de corte de la sección transversal. Se sabe que para que un elemento no se encuentre sometido a torsión, la resultante de las cargas debe pasar por el centro de corte.

Para obtener los esfuerzos que se producen por la torsión, se cuenta con la solución de la ecuación diferencial, pero debido a que es muy laboriosa y complicada, regularmente es preferible utilizar la analogía entre torsión y flexión

ordinaria, misma que es muy sencilla, solo que proporciona resultados muy conservadores. Para acercar los resultados entre la solución de la ecuación diferencial y la analogía en perfiles abiertos, podemos recurrir al cálculo del factor de corrección β . Este factor de reducción se aplica a perfiles de sección abierta, y esta en función de λ y de la longitud (Phillip H. Lin, 1977).

$$\lambda = \sqrt{\frac{GJ}{EC_w}}$$

Donde:

- G = Módulo de corte
- J = Constante de torsión
- E = Módulo de elasticidad
- C_w = Constante de alabeo

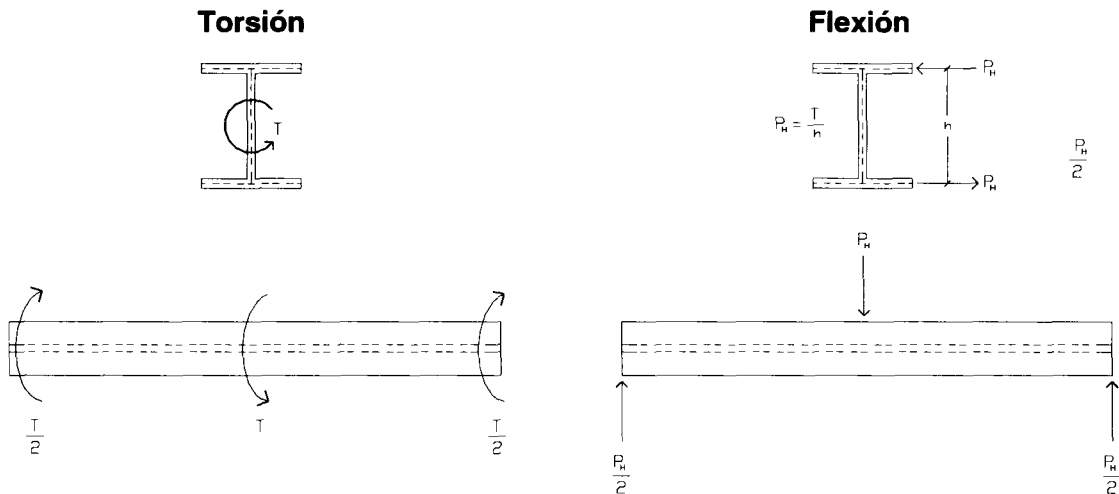
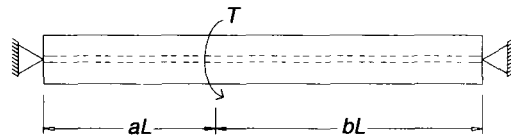


Figura 4.2. Representación gráfica de la analogía entre torsión y flexión en el plano

A continuación se presenta una tabla con los valores del factor β para una viga simplemente apoyada sujeta a un momento torsor concentrado, que es el caso utilizado para el diseño de trabe carril. El puente de la grúa viajera se apoya con 2 llantas sobre la trabe carril, por lo tanto es necesario realizar la superposición de esfuerzos, ya que se producen 2 momentos torsores.



$$M_t h = \beta(T a b L)$$

$$\text{at } z = aL$$

Tabla 4.1. Valores del factor de reducción β para una viga simplemente apoyada sujeta a un momento torsor concentrado (Phillip H. Lin, 1977).

λL	Valores de β				
	$a = 0.5$	$a = 0.4$	$a = 0.3$	$a = 0.2$	$a = 0.1$
0.5	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99
1.0	0.92	0.93	0.94	0.95	0.97
2.0	0.76	0.77	0.80	0.84	0.91
3.0	0.60	0.62	0.65	0.72	0.83
4.0	0.48	0.50	0.54	0.62	0.76
5.0	0.39	0.41	0.45	0.54	0.70
6.0	0.33	0.34	0.39	0.47	0.65
8.0	0.25	0.26	0.30	0.37	0.55
10.0	0.20	0.21	0.24	0.31	0.48

4.2. Procedimiento para el diseño de una trabe carril

1. Como primer punto, se requiere de los datos iniciales:

C_g = capacidad de la grúa.

L_g = claro del puente de la grúa.

L = claro de la trabe carril.

F_y = esfuerzo de fluencia del acero a utilizar para la trabe.

A, B, C, D, E ó F = clasificación de la grúa

d_v = deflexión máxima vertical.

d_h = deflexión máxima horizontal.

2. Con base en los datos anteriores, se localiza una grúa adecuada con el proveedor para obtener sus características:

C_r = carga por rueda.

W_g = peso total de la grúa.

W_t = peso del trolley.

d = distancia entre ruedas.

W_r = peso del riel a usar.

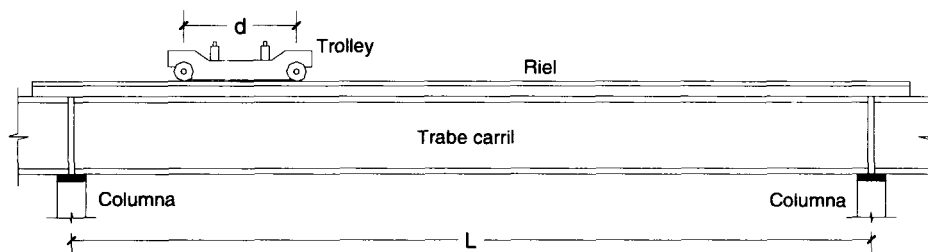


Figura 4.3. Modelo de una trabe carril y sus elementos

Las deflexiones máximas recomendadas por el reglamento “Low Rise Building Systems Manual” (MBMA, 1996) para trabe carril son las siguientes:

Tabla 2.2. Condiciones de serviciabilidad (MBMA, 1996)

Tipo de equipo	Sistema Estructural	Clasificación de Grúa	Deformación	Máxima recomendada	Carga
Grúa Viajera	Trabe Carril	A, B, C, D, E ó F	Deflexión horizontal	$\frac{L}{400}$	Carga lateral por grúa
		A, B, C	Deflexión vertical	$\frac{L}{600}$	Carga vertical por grúa
		D	Deflexión vertical	$\frac{L}{800}$	Carga vertical por grúa
		E ó F	Deflexión vertical	$\frac{L}{1000}$	Carga vertical por grúa

3. Estimación de las cargas actuantes:

- Peso del puente: éste se obtiene al restar el peso del trolley al peso total de la grúa.

$$W_p = W_g - W_t$$

- Carga muerta por rueda: la carga muerta esta representada por el peso del puente, y debido a que la grúa tiene 4 llantas, a cada llanta le corresponde:

$$W_{mr} = \frac{W_p}{4}$$

- Carga viva por rueda: se determina al restar la carga muerta por rueda a la carga máxima por rueda dada por el proveedor.

$$W_{vr} = C_r - W_{mr}$$

- Por lo tanto la carga muerta puntual y viva puntual que debe soportar la trabe carril, son:

$$P_D = W_{mr}$$

$$P_L = W_{vr}$$

- Carga vertical puntual de servicio por rueda:

$$P_S = P_D + P_L$$

- Carga vertical puntual última por rueda:

$$P_U = 1.2 P_D + 1.6 P_L$$

- Carga horizontal de servicio por rueda: por especificación se toma el 20% de la suma del peso del trolley y la capacidad de la grúa.

$$P_{sh} = \frac{20\%(W_t + C_g)}{4}$$

- Carga horizontal última por rueda:

$$P_{uh} = 1.6 P_{sh}$$

- Carga longitudinal última por rueda: por lo general se considera el 10% de la carga vertical puntual última por rueda:

$$P_{Long} = 10\%P_U$$

- Carga distribuida sobre la viga: el peso del riel se encuentra distribuido a lo largo de la trabe, por lo tanto, al peso propio de la traba carril se le suma dicho peso:

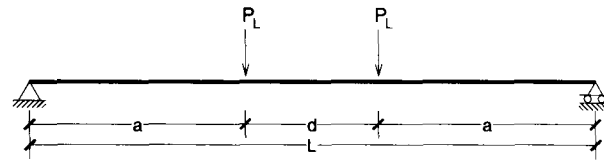
$$w_{up} = 1.2 (w_{pp} + w_r)$$

Donde: w_{pp} , representa una estimación del peso propio de la trabe.

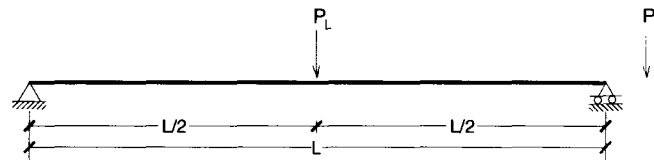
Al w_{pp} se le da un aumento entre el 10 y 20% para considerar la flexión biaxial y la torsión.

4. Momento de inercia mínimos requeridos:

Cargas verticales:



a) $d < \frac{L}{2}$



b) $d > \frac{L}{2}$

Figura 4.4. Posición de las cargas vivas de servicio sin impacto para determinar la deflexión máxima vertical en la traba carril.

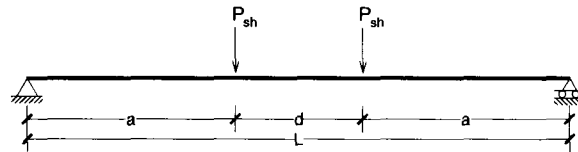
En cualquier libro de Resistencia de Materiales podemos encontrar la siguiente fórmula que sirve para determinar la deflexión máxima para el caso mostrado en la figura 4.4:

$$v_{\max \text{ vert}} = \frac{P_L a}{24 E I_x} (3L^2 - 4a^2)$$

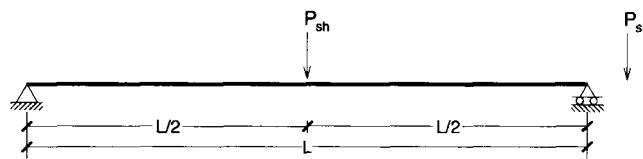
Despejando la Inercia "x" requerida, resulta:

$$I_x = \frac{P_L a (3L^2 - 4a^2)}{24 E \text{Límite}_{\text{def } x}}$$

Cargas horizontales:



a) $d < \frac{L}{2}$



b) $d > \frac{L}{2}$

Figura 4.5. Posición de las cargas para la deflexión máxima horizontal en la trabe carril

Se sigue el mismo procedimiento realizado en el caso anterior y se obtiene lo siguiente:

$$v_{\max \text{ horiz}} = \frac{P_{sh} a}{24EI} (3L^2 - 4a^2)$$

Despejando la Inercia "y" requerida, resulta:

$$I_y = \frac{P_{sh} a (3L^2 - 4a^2)}{24 E \text{ Límite}_{\text{def } y}}$$

5. Cálculo del momento M_{ux} incluyendo un factor de impacto del 25% de la carga viva:

$$P_{u+imp} = 1.2 P_D + 1.25(1.6 P_L)$$

En el Manual del AISC 2001, página 5-177, se proporciona la fórmula para determinar el momento máximo cuando se tienen 2 cargas móviles.

Caso 1: si $d < 0.586 L$, entonces el momento máximo debido a las cargas puntuales es: $M_{ux} = \frac{P_{u+imp}}{2L} \left(L - \frac{d}{2} \right)^2$

La posición de una de la cargas debe estar a una distancia "b" del claro,

$$\text{Donde: } b = \frac{1}{2} \left(L - \frac{d}{2} \right)$$

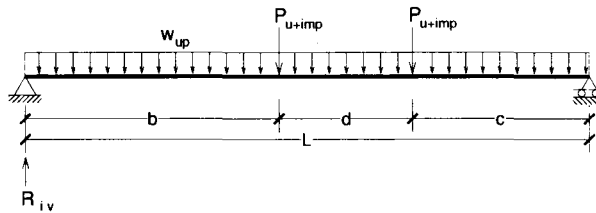


Figura 4.6. Posición de la grúa para ocasionar el momento máximo M_{ux} en la trabe carril, cuando $d < 0.586 L$

Caso 2: si $d \geq 0.586 L$, entonces el momento máximo debido a las cargas

puntuales es:
$$M_{ux} = \frac{P_{u+imp} L}{4}$$

La posición de una de la cargas debe estar al centro del claro.

Nota: a los momentos anteriores, M_{ux} , se les tiene que aumentar el momento producido por la carga uniforme.

6. Cálculo de momento M_{uy} causado por la fuerza P_{uh} :

El momento M_{uy} se determina de la misma forma que se obtuvo M_{ux} , solo que para este caso se toma la carga P_{uh} en vez de P_{u+imp} .

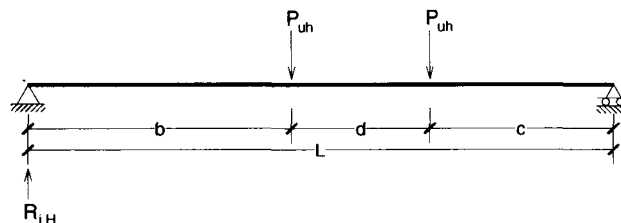


Figura 4.7. Posición de la grúa para ocasionar el momento máximo M_{uy} en la trabe carril

7. Obtención de la carga axial en el punto en donde se presenta el esfuerzo normal máximo:

En los pasos 5 y 6 se mencionó que existen 2 posiciones de grúas de especial interés en donde se genera el esfuerzo normal máximo, mismas que dependen de la separación entre ruedas de la grúa. Por lo tanto:

- Cuando $d < 0.586 L$, la carga axial será: $P_{axial} = \frac{P_{long}(2b + d)}{L}$
- Cuando $d > 0.586 L$, la carga axial será: $P_{axial} = \frac{P_{long}}{2}$

8. Selección preliminar del perfil con base en la flexión:

La siguiente fórmula nos ayuda para determinar un módulo de sección requerido por flexión, y con el se realiza la selección de un perfil que tenga un módulo de sección mayor:

$$S_{x\ req} = \frac{M_{ux}}{\phi_b F_y} + \frac{M_{uy}}{\phi_b F_y} \left(\frac{S_x}{S_y} \right)$$

En donde M_{ux} y M_{uy} son los momentos máximos obtenidos en los pasos 5 y 6 respectivamente.

En perfiles W, cotidianamente se propone una relación $\left(\frac{S_x}{S_y} \right) = 3.5$.

9. Se determina la capacidad a momento del perfil, tomando en cuenta los estados límite de pandeo local y pandeo lateral:

En el Manual del AISC 2001, página 16.1-183, se proporcionan los valores límite de la relación de esbeltez λ_p y λ_r :

Para un perfil W:

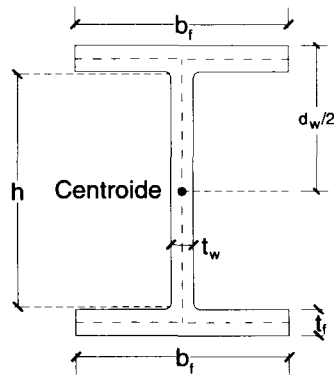


Figura 4.8. Sección transversal de un perfil W

• Patín: $\lambda = \frac{b_f}{2t_f}$

$$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \lambda_r = 0.83 \sqrt{\frac{E}{F_L}}$$

• Alma: $\lambda = \frac{h}{t_w}$

$$\lambda_p = 3.75 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \lambda_r = 5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Para un perfil con sección cajón:

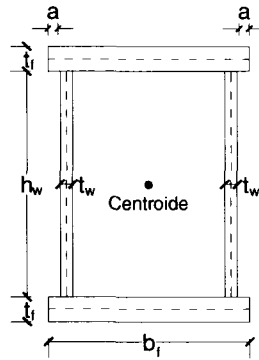


Figura 4.9. Sección transversal de un perfil con sección cajón

- Patín: $\lambda = \frac{b}{t_f}$

$$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \lambda_r = 1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

- Alma: $\lambda = \frac{h_w}{t_w}$

$$\lambda_p = 3.75 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \lambda_r = 5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Cuando $\lambda \leq \lambda_p \Rightarrow M_n = M_p$

Cuando $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r \Rightarrow M_n = \left[M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] \leq M_p$

Donde:

$$M_r = (F_y - F_r) S_x$$

En las especificaciones del Manual del AISC 2001, Capítulo F, se presentan los estados límite de pandeo lateral para varias secciones de perfiles.

Para un perfil W:

$$L_p = 1.76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_{yt}}}$$

$$L_r = \frac{r_y X_1}{F_L} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 F_L^2}}$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{EGJA}{2}}$$

$$X_2 = 4 \frac{C_w}{I_y} \left(\frac{S_x}{GJ} \right)^2$$

- Cuando $L_b \leq L_p \quad \Rightarrow \quad M_n = M_p$
- Cuando $L_p < L_b \leq L_r \quad \Rightarrow \quad M_n = C_b \left[M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p$
- Cuando $L_b > L_r \quad \Rightarrow \quad M_n = M_{cr} \leq M_p$

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

M_{\max} = valor absoluto del momento máximo en la longitud no arriostrada

M_A = valor absoluto del momento en el primer cuarto de la longitud no arriostrada

M_B = valor absoluto del momento en el segundo cuarto de la longitud no arriostrada

M_C = valor absoluto del momento en el tercer cuarto de la longitud no arriostrada

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2 I_y C_w}$$

$$= \frac{C_b S_x X_1 \sqrt{2}}{L_b / r_y} \sqrt{1 + \frac{X_1^2 X_2}{2(L_b / r_y)^2}}$$

Del libro **Basic Steel Design** (Johnston, Lin and Galambos, 1986) se obtuvo el siguiente algoritmo para determinar la capacidad de momento de un perfil monosimétrico:

Capacidad de momento en el eje mayor del perfil monosimétrico soldado.

(a) sección transversal: área del patín de compresión > al área del patín a tensión.

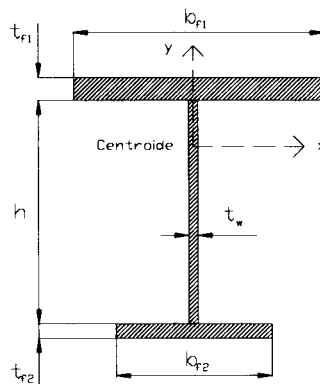


Figura 4.10. Sección transversal de un perfil monosimétrico

(b) Propiedades del material:

$F_y, E, G.$

(c) Propiedades de la sección transversal:

Distancia centroidal del tope del patín superior al centroide de la sección:

$$y_e = \frac{1}{A} \left[A_{f1} \frac{t_{f1}}{2} + A_w \left(t_{f1} + \frac{h}{2} \right) + A_{f2} \left(t_{f1} + h + \frac{t_{f2}}{2} \right) \right]$$

Momento de inercia en el eje "x":

$$I_x = A_{f1} \left[\left(y_e - \frac{t_{f1}}{2} \right)^2 + \frac{t_{f1}^2}{12} \right] + A_w \left[\left(t_{f1} + \frac{h}{2} - y_e \right)^2 + \frac{h^2}{12} \right] + A_{f2} \left[\left(t_{f1} + h + \frac{t_{f2}}{2} - y_e \right)^2 + \frac{t_{f2}^2}{12} \right]$$

Módulo elástico de sección:

$$S_{x1} = \frac{I_x}{y_e} \qquad S_{x2} = \frac{I_x}{t_{f1} + h + t_{f2} - y_e}$$

$$M_{rx1} = (F_y - 16.5) S_{x1} \qquad M_{rx2} = F_y S_{x2}$$

$$M_{rx} = \text{si}(M_{rx1} \geq M_{rx2}, M_{rx2}, M_{rx1})$$

Momento de inercia en el eje "y":

$$I_{yf1} = A_{f1} \frac{b_{f1}^2}{12} \qquad I_{yf2} = A_{f2} \frac{b_{f2}^2}{12}$$

$$I_y = I_{yf1} + I_{yf2} \qquad r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$$

Constante de torsión:

$$J = \frac{1}{3} (A_{f1} t_{f1}^2 + A_w t_w^2 + A_{f2} t_{f2}^2)$$

(d) Momento plástico:

- El eje neutro plástico en el patín 1, ocurre cuando:

$$A_{f1} > A_w + A_{f2}$$

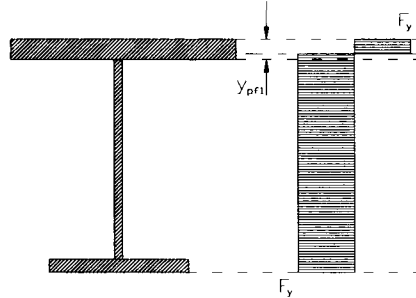


Figura 4.11. Sección transversal con el eje neutro en el patín superior

Equilibrio:

$$F_y b_{f1} y_{pn1} = F_y [b_{f1} (t_{f1} - y_{pn1}) + h t_w + b_{f2} t_{f2}]$$

$$y_{pn1} = \frac{A}{2b_{f1}}$$

Haciendo sumatoria de momentos respecto al eje neutro plástico, el momento plástico es:

$$M_{pn1} = F_y \left[b_{f1} \frac{y_{pn1}^2}{2} + b_{f1} \frac{(t_{f1} - y_{pn1})^2}{2} + A_w \left(t_{f1} + \frac{h}{2} - y_{pn1} \right) + A_{f2} \left(t_{f1} + h + \frac{t_{f2}}{2} - y_{pn1} \right) \right]$$

- El eje neutro plástico en el alma, ocurre si $A_{f1} < A_w + A_{f2}$

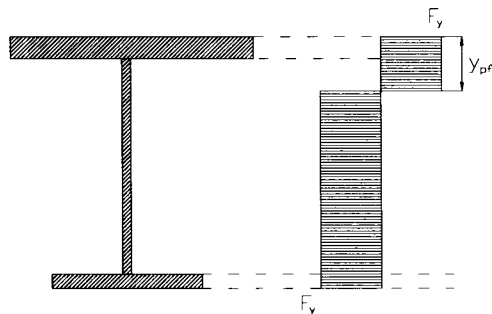


Figura 4.12. Sección transversal con el eje neutro en el alma

Equilibrio de fuerzas:

$$F_y [A_{f1} + (y_{pw} - t_{f1})t_w] = F_y \{ [h - (y_{pw} - t_{f1})t_w] + A_{f2} \}$$

de la cual se obtiene:

$$y_{pw} = \frac{A_w + A_{f2} - A_{f1}}{2t_w} + t_{f1}$$

Momento plástico:

$$M_{pw} = F_y \left[A_{f1} \left(y_{pw} - \frac{t_{f1}}{2} \right) + \frac{(y_{pw} - t_{f1})^2 t_w}{2} + \frac{(h - y_{pw} + t_{f1})^2 t_w}{2} + A_{f2} \left(h - y_{pw} + t_{f1} - \frac{t_{f2}}{2} \right) \right]$$

$$M_{px} = \text{si}(A_{f1} \geq A_w + A_{f2}, M_{pf1}, M_{pw})$$

(e) Capacidad de momento: estado límite de pandeo local en el patín, compresión (c) y tensión (t):

$$b_{fc} = b_{f1}$$

$$S_{xc} = S_{x1}$$

$$t_{fc} = t_{f1}$$

$$S_{xt} = S_{x2}$$

$$\lambda = \frac{b_{fc}}{2t_{fc}}$$

$$\lambda_p = 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

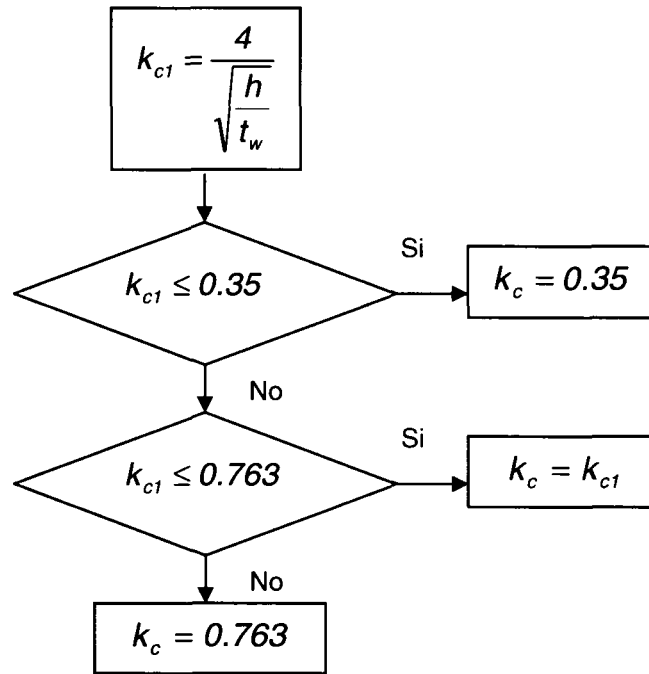


Diagrama de flujo A. Cálculo de k_c

$$k_{c1} = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}}$$

$$k_{c1} = \text{si}[k_{c1} \leq 0.35, 0.35, \text{si}(k_{c1} \geq 0.763, 0.763, k_{c1})]$$

$$\lambda_r = 0.95 \sqrt{\frac{E}{(F_L/k_c)}}$$

$$F_{cr} = 26,200 \frac{k_c}{\lambda^2}$$

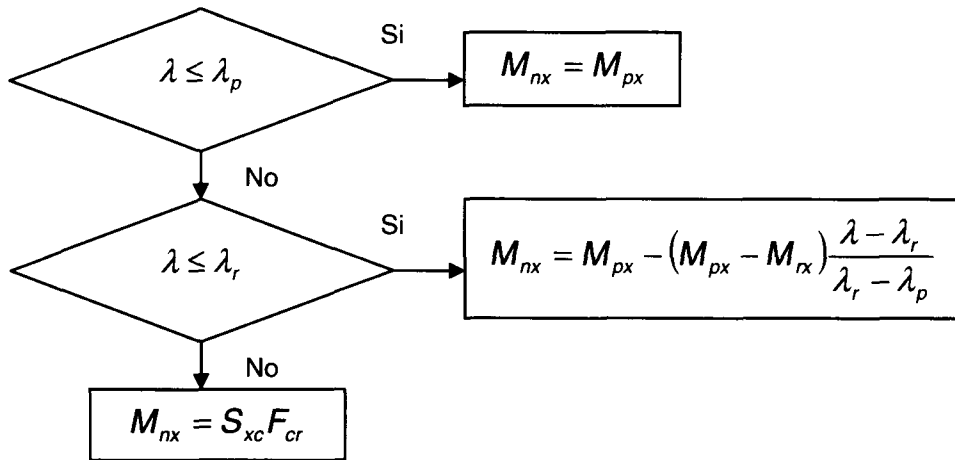


Diagrama de flujo B

$$M_{FLB} = \text{si} \left\{ \lambda \leq \lambda_p, M_{px}, \text{si} \left[\lambda \leq \lambda_r, M_{px} - (M_{px} - M_{rx}) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}, S_{xc} F_{cr} \right] \right\}$$

(f) capacidad de momento, estado límite de pandeo local en el alma:

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \qquad \lambda_p = 3.75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$h_c = 2(y_e - t_{fc}) \qquad \lambda_c = \text{si} \left[\frac{h}{h_c} \leq 0.75, 0.75, \text{si} \left(\frac{h}{h_c} \geq 1.5, 1.5 \frac{h}{h_c} \right) \right]$$

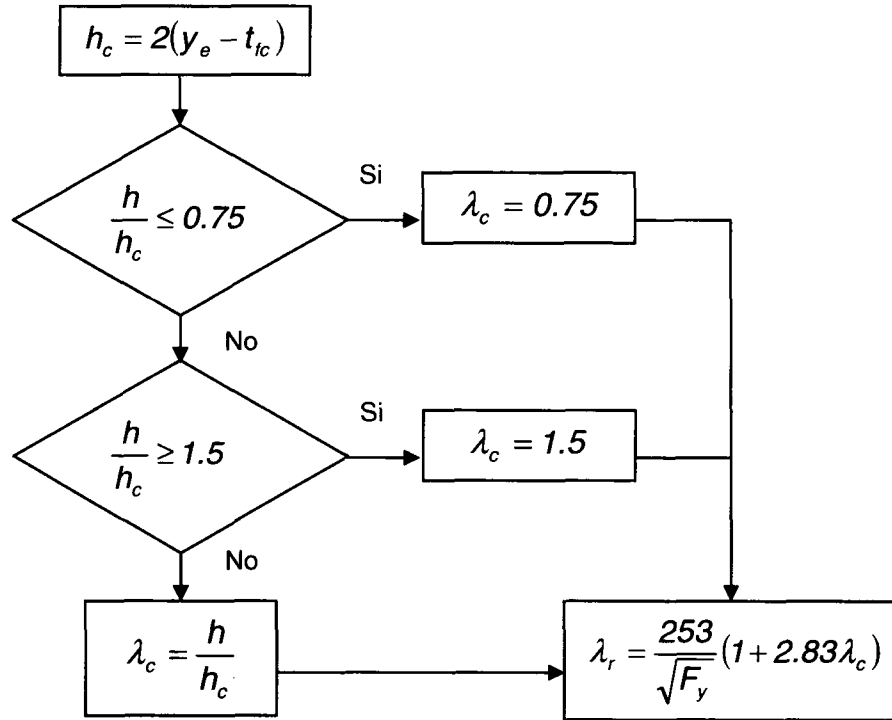


Diagrama de flujo C

$$\lambda_r = \frac{253\sqrt{ksi}}{\sqrt{F_y}}(1 + 2.83\lambda_c)$$

$$M_{wLB} = si \left\{ \lambda \leq \lambda_p, M_{px}, \left[M_{px} - (M_{px} - M_{rx}) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right] \right\}$$

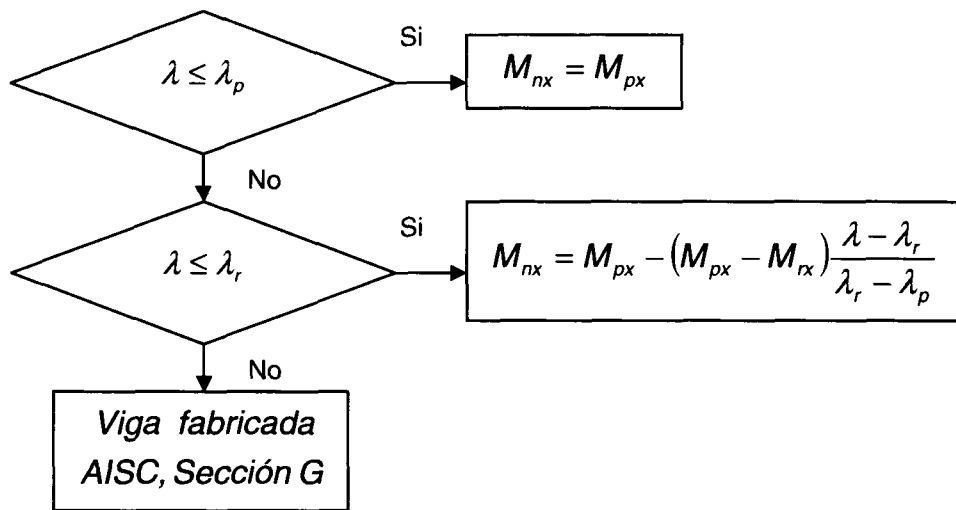


Diagrama de flujo D

(g) Capacidad de momento: estado límite de pandeo lateral-torsional:

$$L_p = 1.76 r_y \sqrt{\frac{E}{F_{yf}}}$$

$$T_1 = \pi E \sqrt{I_y J} \frac{G}{E}$$

$$T_2 = 2.25 h \left(\frac{2 I_{yc}}{I_y} - 1 \right) \sqrt{\frac{I_y}{J}}$$

$$T_3 = 25 h^2 \left[\left(1 - \frac{I_{yc}}{I_y} \right) \left(\frac{I_{yc}}{J} \right) \right]$$

$$L_r = \sqrt{\frac{(2M_x T_2 / T_1) + 1 + \sqrt{(2M_x T_2 / T_1) + 1^2 + 4(M_x^2 T_3 / T_1^2)}}{2M_x^2 / T_1^2}}$$

$$B_1 = \frac{T_2}{L_b} \quad B_2 = \frac{T_3}{L_b^2}$$

$$M_{cr1} = \frac{T_2}{L_b} \left(B_1 + \sqrt{1 + B_2 + B_1^2} \right) C_b$$

$$M_{cr1} = \text{si} \left(M_{cr1} \leq M_{px}, M_{cr1}, M_{px} \right)$$

$$M_{LTB1} = \text{si} \left(L_b \leq L_p, M_{px}, \text{si} \left\{ L_b \leq L_r, C_b \left[M_{px} - (M_{px} - M_{rx}) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right], M_{cr} \right\} \right)$$

$$M_{LTB1} = \text{si} \left(M_{LTB1} \geq M_{px}, M_{px}, M_{LTB1} \right)$$

10. Cálculo de acciones adicionales:

Las cargas laterales producen un momento torsor concentrado, localizado en la posición de las llantas. El momento torsor es equivalente a 2 cargas actuantes en cada uno de los patines de un perfil W, como se muestra en la siguiente formula:

$$P_{eq1} = P_{uh} \frac{d'+h}{d'}$$

$$P_{eq2} = P_{uh} \frac{h}{d'}$$

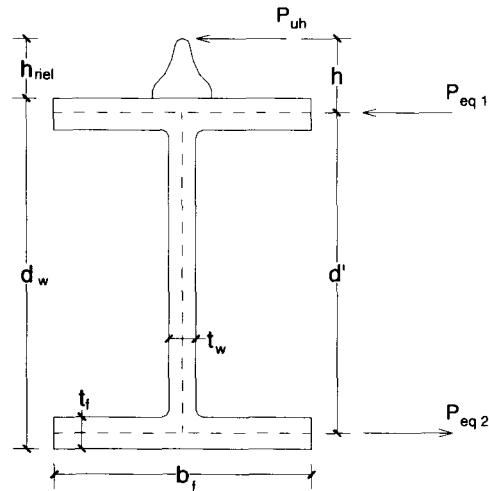


Figura 4.13. Perfil W utilizado como trabe carril con un riel en su parte superior

Se obtiene el factor de reducción, β , usando la tabla 4.1 y se aplica a cada uno de los momentos torsores producidos en la posición de las llantas.

$$M_{f1} = \beta_1 P_{eq1} \left(\frac{d+c}{L} \right) b$$

$$M_{f2} = \beta_2 P_{eq1} \left(\frac{c}{L} \right) b$$

11. Cálculo de esfuerzos normales, tomando en cuenta flexión, torsión y carga axial:

$$\left(f_{un} = \frac{M_{ux}}{S_x} + \frac{M_{uy}}{S_y} + \frac{2M_{f1}}{S_y} + \frac{2M_{f2}}{S_y} + \frac{P_{axial}}{A_g} \left[\frac{d+2c}{L} \right] + \frac{M_{long}}{S_x} \right) \leq (\phi_b F_y)$$

$$M_{long} = P_{axial} \left(\frac{d_w}{2} + h_{riel} \right)$$

12. Esfuerzo normales adicional en el patín superior a nivel de carga de servicio:

$$f_{bw \text{ ASD}} = \frac{P_s t_f}{8(I_R + I_F)} \left[2(I_R + I_F) \frac{h}{t_w} \right]^{\frac{1}{4}}$$

Donde:

P_s = carga de servicio (kips)

I_R = momento de inercia de la sección del riel en (in^4)

I_f = momento de inercia del patín superior en (in^4)

t_f = espesor del patín superior (in)

h = distancia libre entre patines (in)

t_w = espesor del alma (in)

Para obtener la carga factorizada, utilizamos:

$$f_{bw \text{ LRFD}} = \frac{P_U}{P_S} f_{bw \text{ ASD}}$$

así el esfuerzo normal máximo a compresión es:

$$(f_{unc} = f_{un} + f_{bw \text{ LRFD}}) \leq (\phi_b F_y)$$

13. Cálculo de esfuerzos cortantes:

- Esfuerzo cortante por carga vertical.

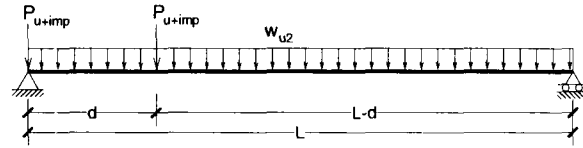


Figura 4.14. Posición de la carga vertical para obtener el cortante máximo en la trabe carril

$$w_{u2} = w_{pp} + W_r$$

$$V_{max} = \frac{w_{u2}L}{2} + P_{u+imp} + \frac{P_{u+imp}(L-d)}{L}$$

La distribución de esfuerzos cortantes por carga vertical de un perfil W con un canal en el patín superior, es como el mostrado en la figura 4.15.

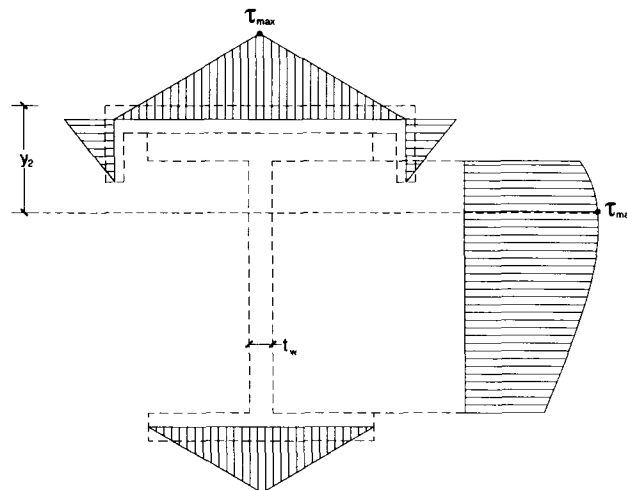


Figura 4.15. Distribución del esfuerzo cortante en una sección compuesta por un perfil W y un canal debido a carga vertical

a. Patín

$$Q = t_{fc} b_{fc} \left(y_2 - \frac{b_{fc}}{2} \right) + \left(\frac{d_c}{2} - t_{fc} \right) t_{wc} \left(y_2 - \frac{t_{wc}}{2} \right) + \frac{b_f}{2} t_f \left(y_2 - t_{wc} - \frac{t_f}{2} \right)$$

$$\tau_{\max} = \frac{V_{\max} Q}{I_x (t_f + t_{wc})}$$

b. Alma

$$Q = t_f b_f (\bar{y}_1) + t_w \frac{\left(y_1 - \frac{t_f}{2} \right)^2}{2}$$

$$\tau_{\max} = \frac{V_{\max} Q}{I_x t_w}$$

En un perfil W, la distribución de esfuerzos cortantes por carga vertical es como se muestra a continuación:

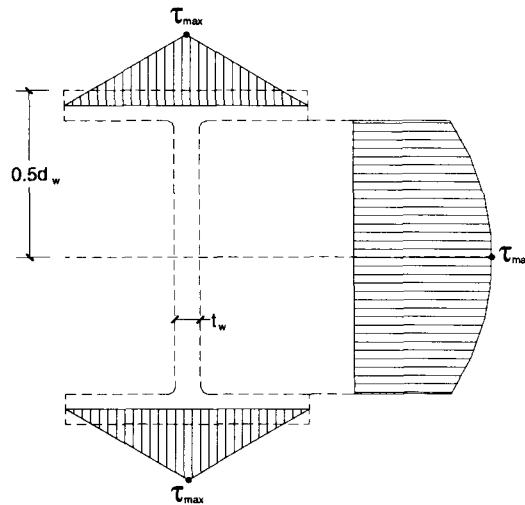


Figura 4.16. Distribución de esfuerzo cortante en una sección con perfil W debido carga vertical

a. Patín
$$\tau_{\max} = \frac{V_{\max} b_f t_f \left(\frac{d_w - t_w}{2} \right)}{2 I_x t_f}$$

b. Alma
$$\tau_{\max} = \frac{V_{\max} \left[b_f t_f \left(\frac{d_w - t_f}{2} \right) + 0.5 t_w \left(\frac{d_w}{2} - t_f \right)^2 \right]}{I_x t_w}$$

- Esfuerzo cortante por carga horizontal

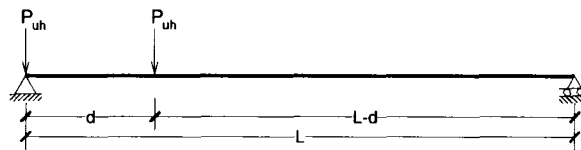


Figura 4.17. Posición de la carga horizontal para producir el cortante máximo en la trabe carril

$$V_{\max} = P_{uh} + \frac{P_{uh}(L-d)}{L}$$

Al ser aplicada una carga horizontal en un perfil W con un canal sobre el patín superior, se produce una distribución de esfuerzos cortantes como el mostrado en la siguiente figura:

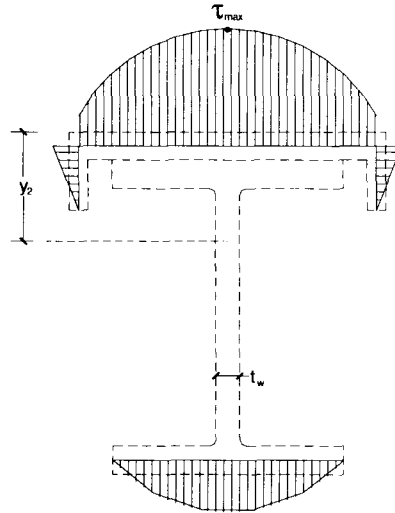


Figura 4.18. Distribución de esfuerzo cortante en una sección compuesta por un canal y perfil W debido a carga horizontal

$$Q = (b_{fc} t_{fc}) \left(\frac{d_c}{2} - \frac{t_{fc}}{2} \right) + \frac{\left(\frac{d_c}{2} - t_{fc} \right)^2 t_{wc}}{2} + \left(\frac{b_f^2}{2} \right) t_f$$

$$\tau_{\max} = \frac{V_{\max} Q}{I_y (t_f + t_{wc})}$$

En un perfil W, la distribución de esfuerzos cortantes por carga horizontal es como la presentada en la figura 4.19.

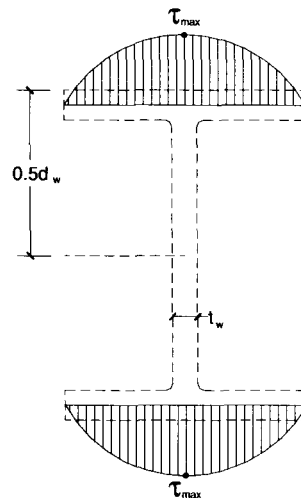


Figura 4.19. Distribución del esfuerzo cortante en una sección con perfil W debido a carga horizontal

$$\tau_{\max} = \frac{V_{\max} \left(\frac{b_f}{2} \right) (t_f) \left(\frac{b_f}{4} \right)}{2I_y t_f}$$

- Esfuerzo cortante por torsión de Saint Venant

La fórmulas de la torsión de Saint Venant es la siguiente:

$$\tau_{sv} = \frac{T_u t_f}{J}$$

Por lo tanto, para el patín de un perfil será:

$$\tau_{sv} = \frac{T_u t_f}{J}$$

Mientras que para el alma es:

$$\tau_{sv} = \frac{T_u t_w}{J}$$

14. Revisión de los esfuerzos cortantes totales en el patín y en el alma.

Se realiza la sumatoria de los esfuerzos tanto en el patín como en el alma, y se compara con el esfuerzo último dado por uno de los siguiente casos:

$$\text{Cuando } \frac{h}{t_w} \leq 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \Rightarrow \phi F_{uv} = 0.9 \times 0.6 \times F_y$$

$$\text{Cuando } 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 3.07 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \Rightarrow \phi F_{uv} = 0.9 \times 0.6 \times F_y \frac{2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}}{\frac{h}{t_w}}$$

$$\text{Cuando } 3.07 \sqrt{\frac{E}{F_y}} < \frac{h}{t_w} \leq 260 \Rightarrow \phi F_{uv} = 0.9 \times 0.6 \times 4.52 \frac{E}{\left(\frac{h}{t_w}\right)^2}$$

$$f_v \leq \phi F_{uv}$$

4.3. Evaluación de la constante de torsión "J".

La contribución de la torsión de Saint Venant a la resistencia a torsión de un elemento, está dada por la ecuación:

$$T = GJ \frac{\phi}{L} ; \quad \frac{\phi}{L} = \frac{\text{ángulo de torsión}}{\text{unidad de longitud}}$$

En donde "J" es la constante de torsión de Saint Venant.

Para secciones en cajón,

$$J = \frac{4Am^2}{\oint \frac{ds}{t}}$$

Para secciones abiertas de pared delgada,

$$J = \frac{1}{3} \sum_1^n b_i t_i^3$$

En donde:

b_i = es el ancho de cada placa de una sección transversal.

t_i = representa el espesor de cada placa de una sección transversal.

n = es el número de placas contenidas en la sección transversal.

- Constante de torsión para una sección C.

Ésta es muy importante debido a que es necesaria para el desarrollo de la constante torsión de una trabe formada por un canal y un perfil W.

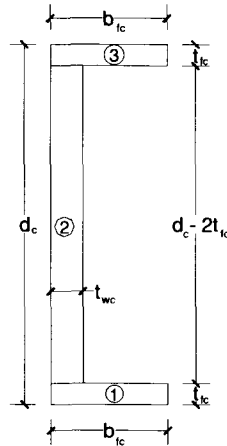


Figura 4.20. Geometría de cada elemento que forma una sección en C

Elemento 1: $J_1 = \frac{1}{3} b_{fc} t_{fc}^3$

Elemento 2: $J_2 = \frac{1}{3} (d_c - 2t_{fc}) t_{wc}^3$

Elemento 3: $J_3 = \frac{1}{3} b_{fc} t_{fc}^3$

Elemento completo: $J_c = J_1 + J_2 + J_3$

$$J_c = \frac{1}{3} b_{fc} t_{fc}^3 + \frac{1}{3} (d_c - 2t_{fc}) t_{wc}^3 + \frac{1}{3} b_{fc} t_{fc}^3$$

$$J_c = \frac{1}{3} b_{fc} t_{fc}^3 + \frac{1}{3} d_c t_{wc}^3 - \frac{2}{3} t_{fc} t_{wc}^3$$

- Evaluación de la constante de torsión para un perfil W.

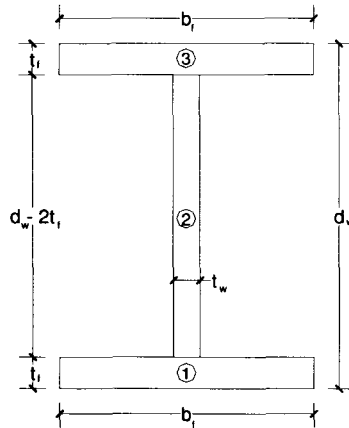


Figura 4.21. Geometría de cada elemento que forma un perfil W.

Elemento 1: $J_1 = \frac{1}{3} b_f t_f^3$

Elemento 2: $J_2 = \frac{1}{3} (d_w - 2t_f) t_w^3$

Elemento 3: $J_3 = \frac{1}{3} b_f t_f^3$

Elemento completo: $J_w = J_1 + J_2 + J_3$

$$J_w = \frac{1}{3} b_f t_f^3 + \frac{1}{3} (d_w - 2t_w) t_w^3 + \frac{1}{3} b_f t_f^3$$

$$J_w = \frac{2}{3} b_f t_f^3 + \frac{1}{3} d_w t_w^3 - \frac{2}{3} t_f t_w^3$$

- Constante de torsión para una sección compuesta por un perfil W y un canal.

La sección compuesta es idealizada como se muestra en la figura 4.21 y subdividida en 6 elementos placa para poder obtener la aportación de cada placa a la constante de torsión de la sección completa.

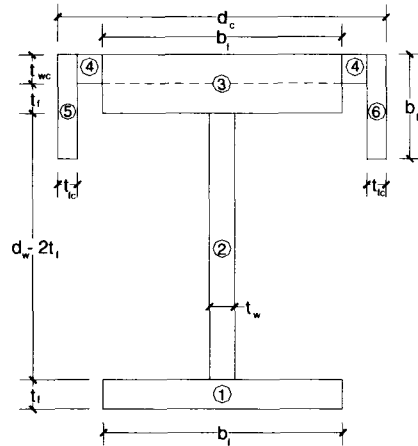


Figura 4.21. Sección idealizada de un perfil W con un canal

Elemento 1:	$J_1 = \frac{1}{3} b_f t_f^3$
Elemento 2:	$J_2 = \frac{1}{3} (d_w - 2t_w) t_w^3$
Elemento 3:	$J_3 = \frac{1}{3} b_f (t_f + t_{wc})^3$
Elemento 4:	$J_4 = \frac{1}{3} (d_c - 2t_{fc} - b_f) t_{wc}^3$
Elemento 5:	$J_5 = \frac{1}{3} b_{fc} t_{fc}^3$
Elemento 6:	$J_6 = \frac{1}{3} b_{fc} t_{fc}^3$

Elemento completo:

$$J_T = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5 + J_6$$

$$J_T = \frac{1}{3} b_f t_f^3 + \frac{1}{3} (d_w - 2t_w) t_w^3 + \frac{1}{3} b_f (t_f + t_{wc})^3 + \frac{1}{3} (d_c - 2t_{fc} - b_f) t_{wc}^3 + 2 \left(\frac{1}{3} b_{fc} t_{fc}^3 \right)$$

$$J_T = \frac{1}{3} b_f t_f^3 + \frac{1}{3} d_w t_w^3 - \frac{2}{3} t_w t_w^3 + \frac{1}{3} b_f (t_f + t_{wc})^3 + \frac{1}{3} d_c t_{wc}^3 - \frac{2}{3} t_{fc} t_{wc}^3 - \frac{1}{3} b_f t_{wc}^3 + \frac{2}{3} b_{fc} t_{fc}^3$$

Evaluando el siguiente término:

$$\frac{1}{3} b_f (t_f + t_{wc})^3 = \frac{1}{3} b_f [t_f^3 + 3t_f^2 t_{wc} + 3t_f t_{wc}^2 + t_{wc}^3] = \frac{1}{3} b_f t_f^3 + b_f t_f^2 t_{wc} + b_f t_f t_{wc}^2 + \frac{1}{3} b_f t_{wc}^3$$

Sustituyendo el término anterior en la ecuación de J_T :

$$J_T = \frac{1}{3} b_f t_f^3 + \frac{1}{3} d_w t_w^3 - \frac{2}{3} t_w t_w^3 + \frac{1}{3} b_f t_f^3 + b_f t_f^2 t_{wc} + b_f t_f t_{wc}^2 + \frac{1}{3} b_f t_{wc}^3 + \frac{1}{3} d_c t_{wc}^3 - \frac{2}{3} t_{fc} t_{wc}^3 - \frac{1}{3} b_f t_{wc}^3 + \frac{2}{3} b_{fc} t_{fc}^3$$

Simplificando términos:

$$J_T = \frac{2}{3} b_f t_f^3 + \frac{1}{3} d_w t_w^3 - \frac{2}{3} t_w t_w^3 + b_f t_f^2 t_{wc} + b_f t_f t_{wc}^2 + \frac{1}{3} d_c t_{wc}^3 - \frac{2}{3} t_{fc} t_{wc}^3 + \frac{2}{3} b_{fc} t_{fc}^3$$

Agrupando términos:

$$J_T = \left[\frac{2}{3} b_f t_f^3 + \frac{1}{3} d_w t_w^3 - \frac{2}{3} t_w t_w^3 \right] + \left[\frac{2}{3} b_{fc} t_{fc}^3 + \frac{1}{3} d_c t_{wc}^3 - \frac{2}{3} t_{fc} t_{wc}^3 \right] + b_f t_f^2 t_{wc} + b_f t_f t_{wc}^2$$

El primer grupo pertenece a la constante de torsión del perfil W y el segundo a la sección canal. Sustituyendo el valor de la constante de torsión para cada perfil, finalmente se obtiene:

$$J_T = J_w + J_c + b_f t_f^2 t_{wc} + b_f t_f t_{wc}^2$$

$$J_T = J_w + J_c + b_f t_f t_{wc} [t_f + t_{wc}]$$

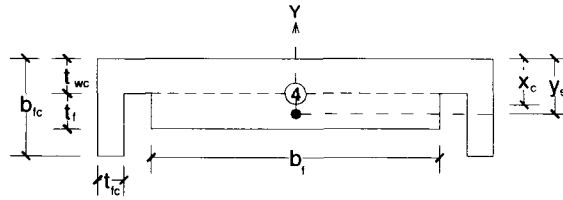


Figura 4.23. Detalle del canal y del patín superior del perfil W

Del manual del AISC 2001, se obtienen algunas propiedades del perfil W y del canal.

$$A_s = A_c + (b_f t_f) \quad y_s = \frac{A_c x_c + (b_f t_f) \left(t_{wc} + \frac{t_f}{2} \right)}{A_s}$$

$$I_{ys} = I_{xc} + \frac{1}{12} t_f b_f^3 \quad H = d_w + t_{wc}$$

$$\bar{y}_1 = y_1 - \frac{t_f}{2} \quad \bar{y}_2 = H - y_1 - y_s \quad \bar{h} = \bar{y}_1 + \bar{y}_2$$

Evaluación del momento de inercia en "y" de la parte que se encuentra a compresión y a tensión, en la sección transversal.

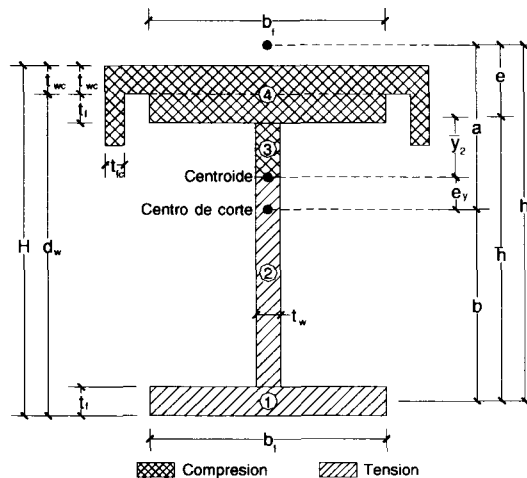


Figura 4.24. Compresión y tensión en la sección compuesta por un perfil W y un canal

$$I_{Yc} = \frac{1}{12}(d_w - y_1 - t_f)t_w^3 + I_{ys} \qquad I_{Yt} = \frac{1}{12}t_f b_f^3 + \frac{1}{12}(y_1 - t_f)t_w^3$$

Verificando que se cumpla con:

$$I_Y \approx I_{Yc} + I_{Yt}$$

Parámetros necesarios para determinar el centro de corte (Trahair, 1980):

$$\rho = \frac{I_{Yc}}{I_Y} \qquad e = \frac{b_{fc}^2 d_c^2 t_{fc}}{4\rho I_Y} \qquad h = \bar{h} + e$$

$$a = \frac{I_{Yt}}{I_Y} \qquad b = \rho h$$

Cálculo del centro de corte mediante:

$$e_y = a - \bar{y}_2 - e$$

Evaluación de la constante de alabeo por cualquiera de las dos formas siguientes:

$$C_w = a^2 I_{Yc} + b^2 I_{Yt} \quad \text{ó} \quad C_w = \rho(1 - \rho) I_Y h^2$$

- Constante de alabeo para una sección compuesta por 3 placas diferentes.

Como primer punto, se debe proporcionar el ancho y espesor de cada placa (Figura 4.25):

Placa 1: b_1, t_1

Placa 2: b_2, t_2

Placa 3: b_3, t_3

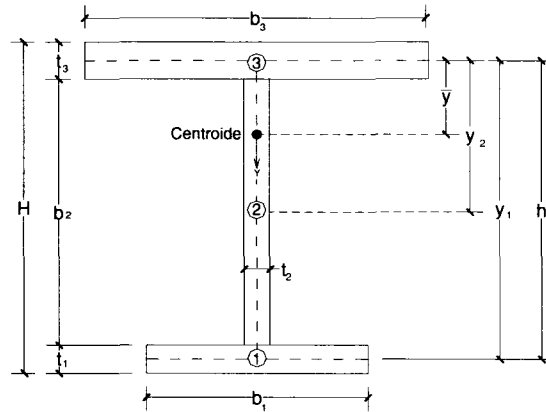


Figura 4.25. Geometría de la sección compuesta por 3 placas

Se calcula el área transversal y centro de gravedad vertical de cada placa:

$$a_1 = b_1 t_1 \quad y_1 = \frac{1}{2} t_1 + b_2 + \frac{1}{2} t_3$$

$$a_2 = b_2 t_2 \quad y_2 = \frac{1}{2} b_2 + \frac{1}{2} t_3$$

$$a_3 = b_3 t_3 \quad y_3 = 0$$

Se determina el área y la distancia vertical del centro de gravedad de la sección compuesta I:

$$A_T = a_1 + a_2 + a_3 \quad \bar{y} = \frac{a_1 y_1 + a_2 y_2 + a_3 y_3}{A_T}$$

$$h = y_1$$

Se determina el momento de inercia en "x" e "y" de la sección compuesta

I:

$$I_x = \left[\frac{b_1 t_1^3}{12} + a_1 (y_1 - \bar{y})^2 \right] + \left[\frac{t_2 b_2^3}{12} + a_2 (y_2 - \bar{y})^2 \right] + \left[\frac{b_3 t_3^3}{12} + a_3 \bar{y}^2 \right]$$

$$I_y = \frac{t_1 b_1^3}{12} + \frac{b_2 t_2^3}{12} + \frac{t_3 b_3^3}{12}$$

Evaluación del momento de inercia en "y" de la sección a compresión y tensión:

$$I_{yc} = \frac{1}{12} \left(\bar{y} - \frac{t_3}{2} \right) t_2^3 + \frac{t_3 b_3^3}{12}$$

$$I_{yt} = \frac{t_1 b_1^3}{12} + \frac{1}{12} \left(y_1 - \frac{t_1}{2} - \bar{y} \right) t_2^3$$

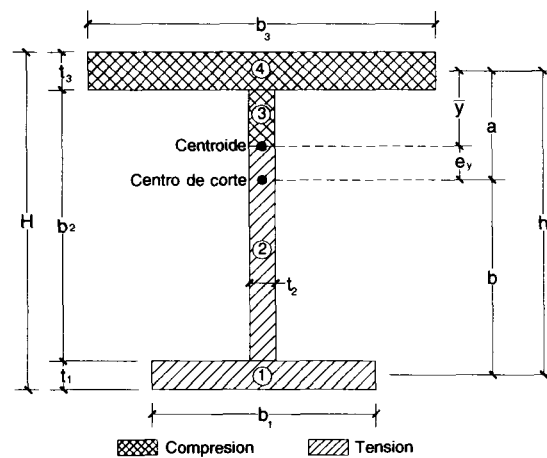


Figura 4.26. Compresión y tensión en la sección compuesta por 3 placas soldadas

Verificando que se cumpla con:

$$I_Y \approx I_{Yc} + I_{Yt}$$

Determinando la medida de monosimetría (Trahair, 1980):

$$\rho = \frac{I_{Yc}}{I_Y}$$

$$a = (1 - \rho)h$$

$$b = \rho h$$

Cálculo del centro de corte mediante:

$$e_y = a - \bar{y}$$

Evaluación de la constante de alabeo por cualquiera de las dos maneras siguientes:

$$C_w = a^2 I_{Yc} + b^2 I_{Yt} \quad \text{ó} \quad C_w = \rho(1 - \rho) I_Y h^2$$

CAPÍTULO 5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se solicita el diseño de una nave para uso industrial. El proyecto se ubicará al norte de Hermosillo, Sonora. La superficie a cubrir es de 2400 m^2 , siendo este un terreno plano con pocas obstrucciones y pendientes menores a 5% . El interior del edificio deberá estar libre de columnas puesto que se requerirá el movimiento de montacargas, una grúa viajera y vehículos de transporte. Los requerimientos de protección contra fuego son mínimos.

Las necesidades del cliente son las siguientes:

- Edificio de un piso para uso industrial para llevar a cabo procesos de manufactura y almacenaje de productos.
- La superficie disponible para el edificio es de $24 \text{ m} \times 100 \text{ m}$. La altura libre mínima a la parte inferior de la trabe carril es de 5.0 m , mientras que a la parte inferior de la armadura es de 7.0 m .
- La nave se deberá de considerar totalmente cerrada y tendrá una pendiente de cubierta del 5% .
- La capacidad de la grúa viajera es de 20 toneladas cortas. Dicha grúa irá montada en rieles que a su vez estarán descansando sobre el patín superior de un perfil monosimétrico (Perfil a base de 3 placas de sección constante con patines diferentes).

Materiales Posibles

- Lámina galvanizada formada en frío de acuerdo a las normas *ASTM - A570* o *ASTM - A607*.
- Acero estructural *ASTM - A36* ó *ASTM A572* grado 50 .

- Pintura resistente a la corrosión de acuerdo con las recomendaciones del "Steel Structures Painting Council" y el AISC.

Especificaciones de Diseño

- Para la determinación de la carga de viento y/o sismo se utilizará el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, 1993 .
- Acero Estructural. Las especificaciones de diseño correspondientes a los elementos de acero estructural serán las especificaciones AISC-LRFD, 3ª edición.
- Acero Formado en Frío. Para los elementos estructurales de acero formado en frío se utilizarán las especificaciones AISC-ASD, 9ª edición.

5.1. Introducción de datos al programa

Se procede a vaciar al programa los datos que conforman las características generales del proyecto. El ancho requerido por el cliente es de 24 metros. Se pide una altura mínima interior de 5 metros, por lo que a esa altura se colocará la trabe carril, y se dejará un espacio de 2 metros entre la trabe carril y la cuerda inferior de la armadura, quedando ésta última a una altura de 7 metros. Se propone una separación entre marcos de 10 metros, y debido a que la longitud que pide el cliente es de 100 metros, entonces se necesitan 11 marcos en total con acero de alta resistencia. Se usará una cimentación con apoyos empotrados.

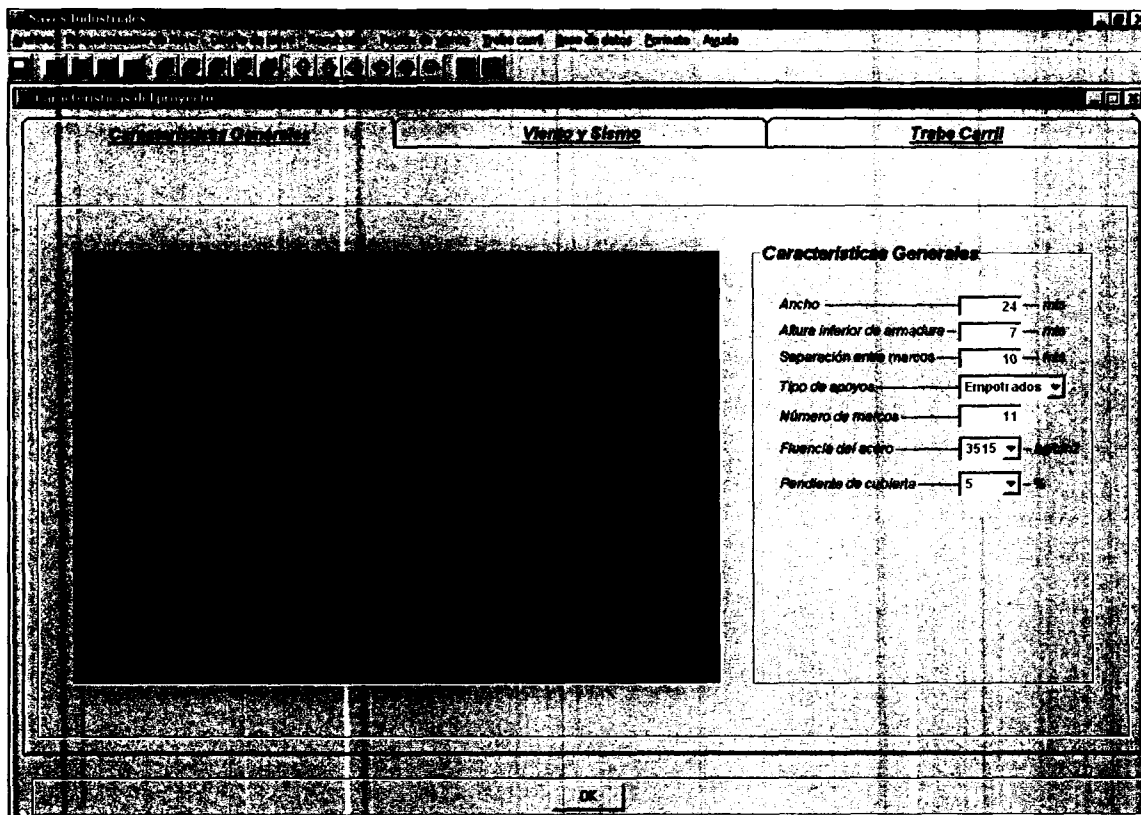


Figura 5.1. Introducción de Características Generales

Posteriormente introduciremos información tal como: localización, que se refiere a la ciudad y el estado en donde se va a realizar el proyecto, en este caso Hermosillo, Sonora. La categoría del terreno es 2, debido a que se cuenta con un terreno plano con pocas obstrucciones. En cuanto a la topografía local, se comenta que el terreno tiene pendientes menores al 5%. El tipo de suelo para la zona en donde se va a construir es firme (Figura 5.2).

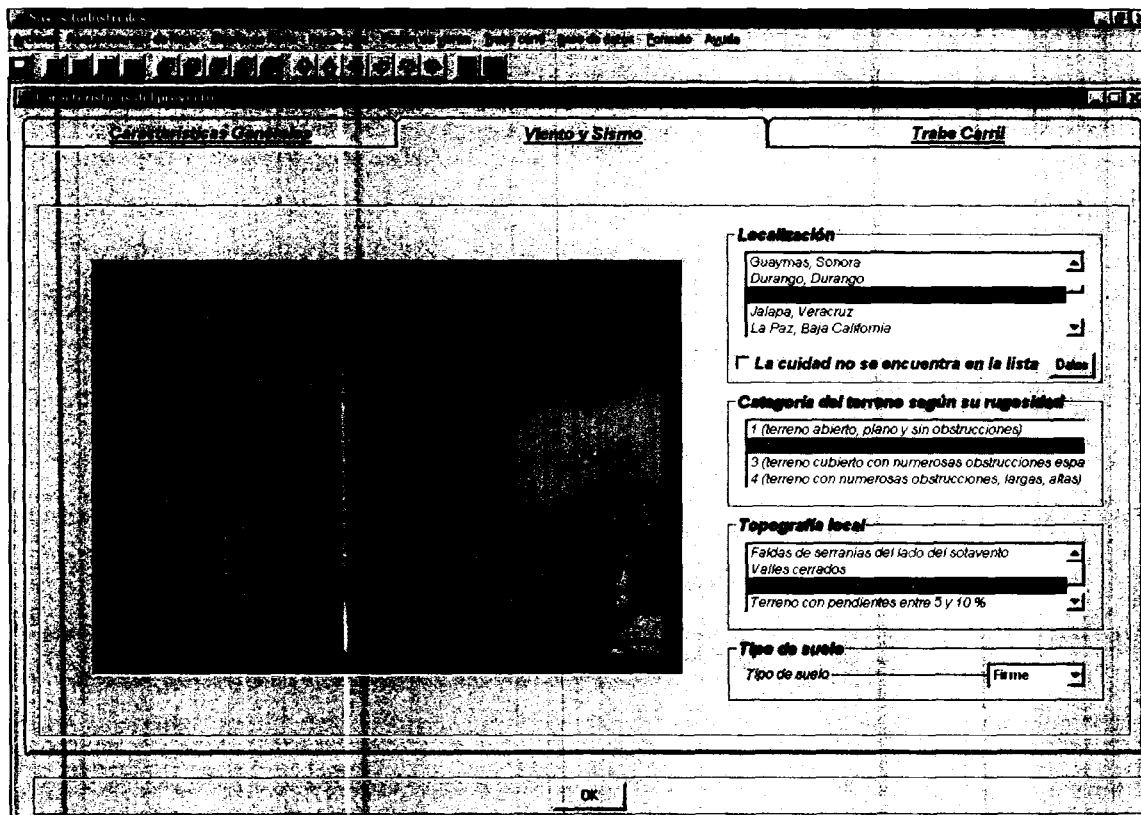


Figura 5.2. Características del terreno

Este proyecto requiere de trabe carril, por lo que se seleccionará la opción correspondiente y se proporcionaran los siguientes datos: sección transversal de la trabe (Figura 5.3a) y capacidad de la grúa, se activará la opción de seleccionar características de la grúa de la base de datos que contiene el programa para una capacidad de 20 toneladas cortas (Figura 5.3b). El programa retoma automáticamente la altura de la trabe carril a 2 metros por debajo de la cuerda inferior de la armadura.

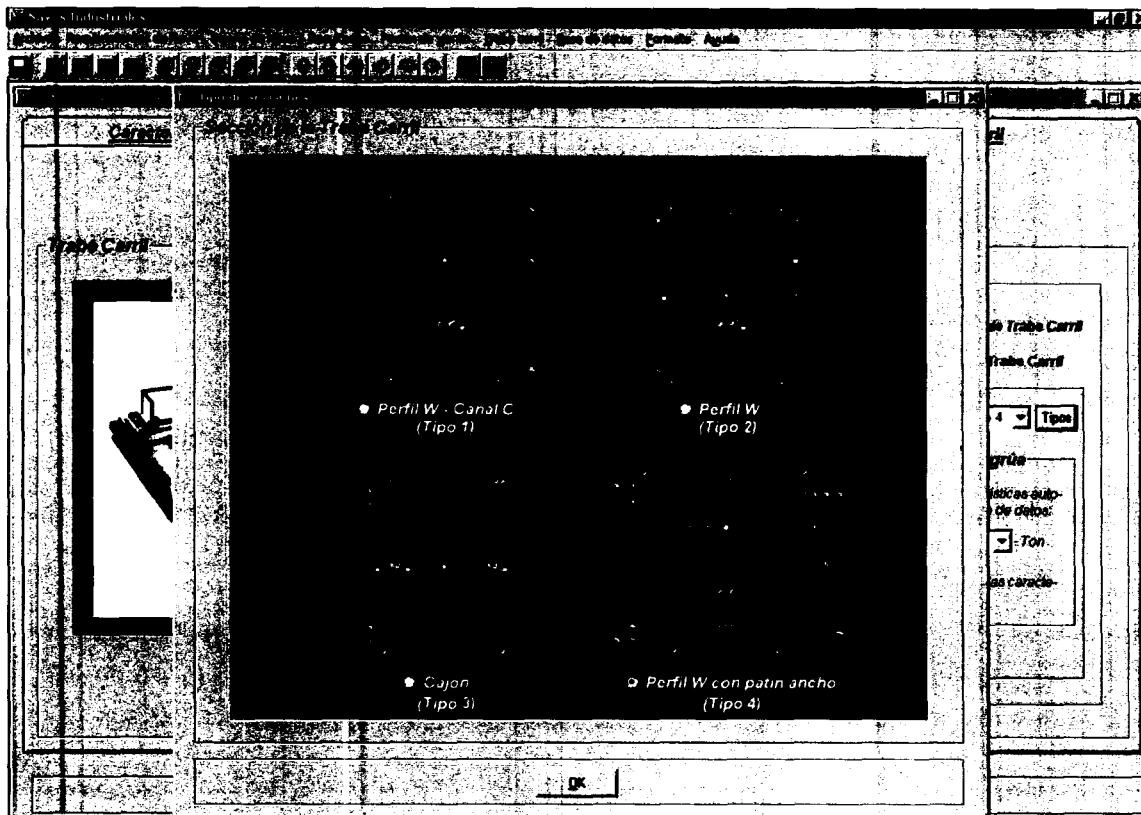


Figura 5.3a. Sección de Trabe Carril

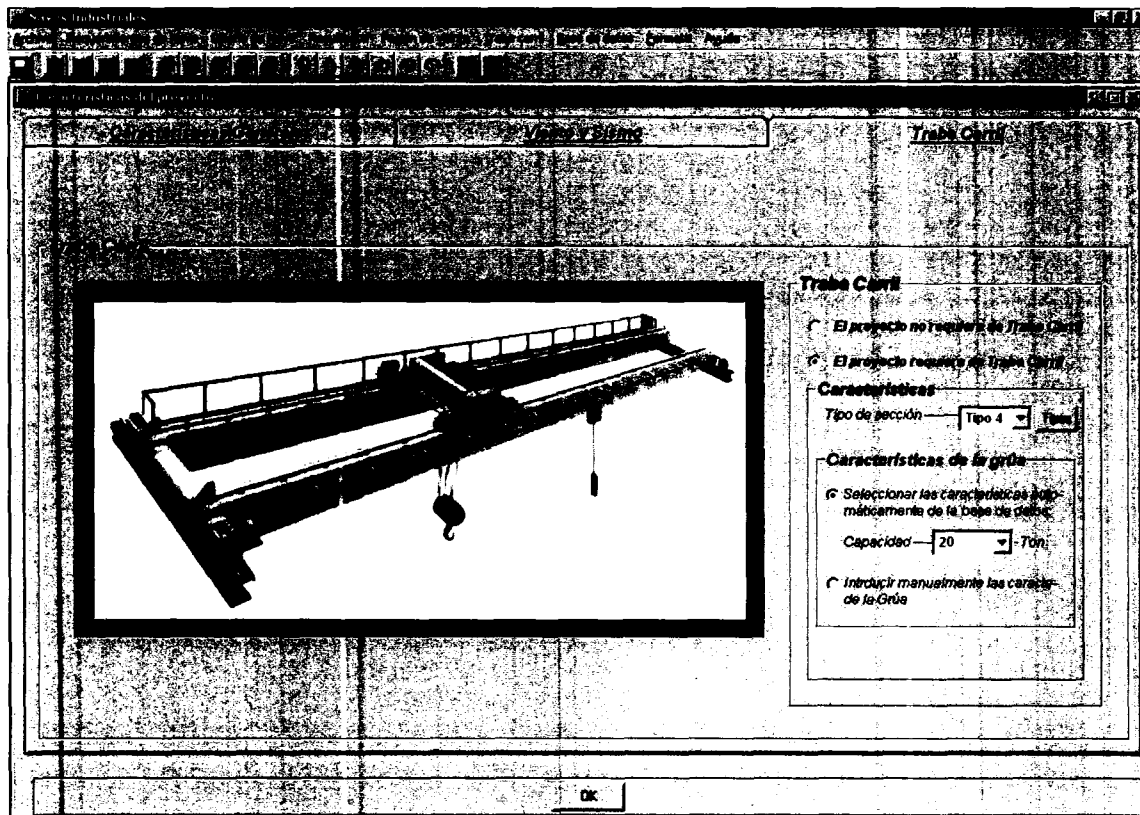


Figura 5.3b. Capacidad de la grúa

5.2. Realización del diseño

Con solo dar un click en el menú “diseño de nave” y esperar un momento, el programa realizará el análisis y diseño, y al terminar nos desplegará el isométrico de la estructura en 3D (Figura 5.4).

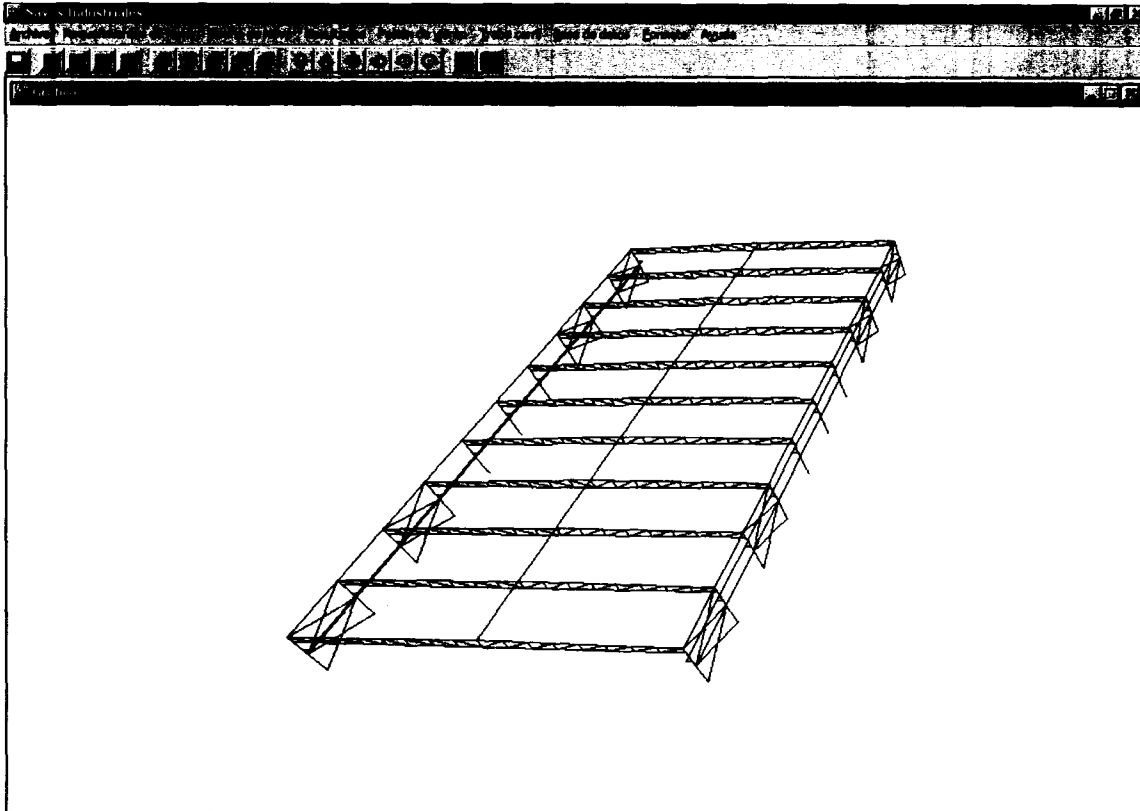


Figura 5.4. Isométrico de la Nave Industrial

Con la barra de herramientas podemos interactuar con el gráfico haciéndolo girar o mover en cualquier eje, alejar o acercar. Se cuenta además con diferentes vistas para el gráfico (vista en planta, vista lateral, vista en isométrico, vista frontal) para lo cual es necesario seleccionar uno de los pequeños cubos que aparecen en la barra de herramientas, dependiendo de las vistas que nos interese ver.

5.3. Resultados

En el menú “presión de viento” se encuentran los cálculos de la presión dinámica de base. Para la localidad de Hermosillo, Sonora se tiene una velocidad regional de 151 km/hr , una temperatura media anual de 25.2°C , una altura sobre el nivel del mar de 237 mts , una presión barométrica de 741.04 mm de Hg , una presión dinámica de base de 81.1 kg/m^2 , entre otros.

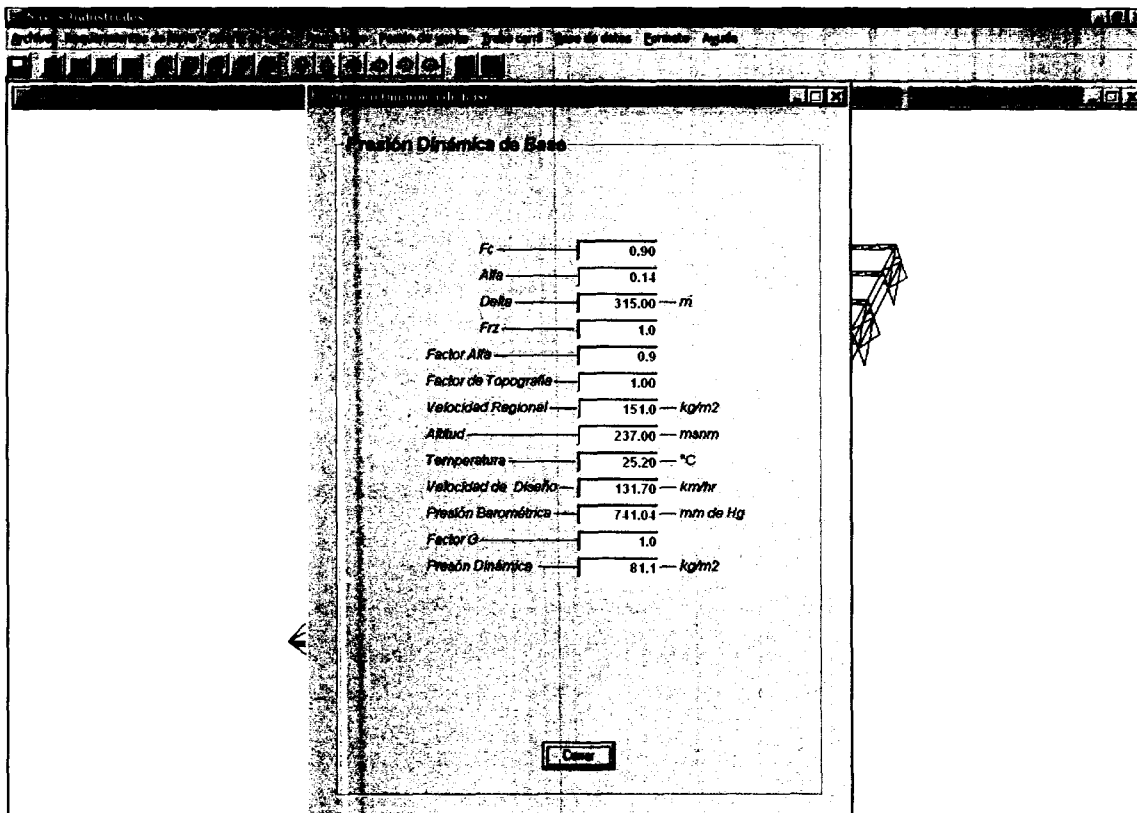


Figura 5.5. Presión dinámica de base

Para poder observar los desplazamientos de nodos para el marco más crítico nos dirigimos al menú de Resultados y lo abrimos. Este desplegará una serie de etiquetas; entre ellas la que corresponde a los desplazamientos, sobre esta etiqueta podemos movernos y examinar los puntos más críticos (Figura 5.6) para las diferentes cargas primarias y combinaciones de cargas últimas. Los elementos de la armadura no tienen restricción al giro, es decir, pueden rotar libremente, por esa razón, obtuvimos valores de cero en la rotación para los extremos de cada elemento armadura.

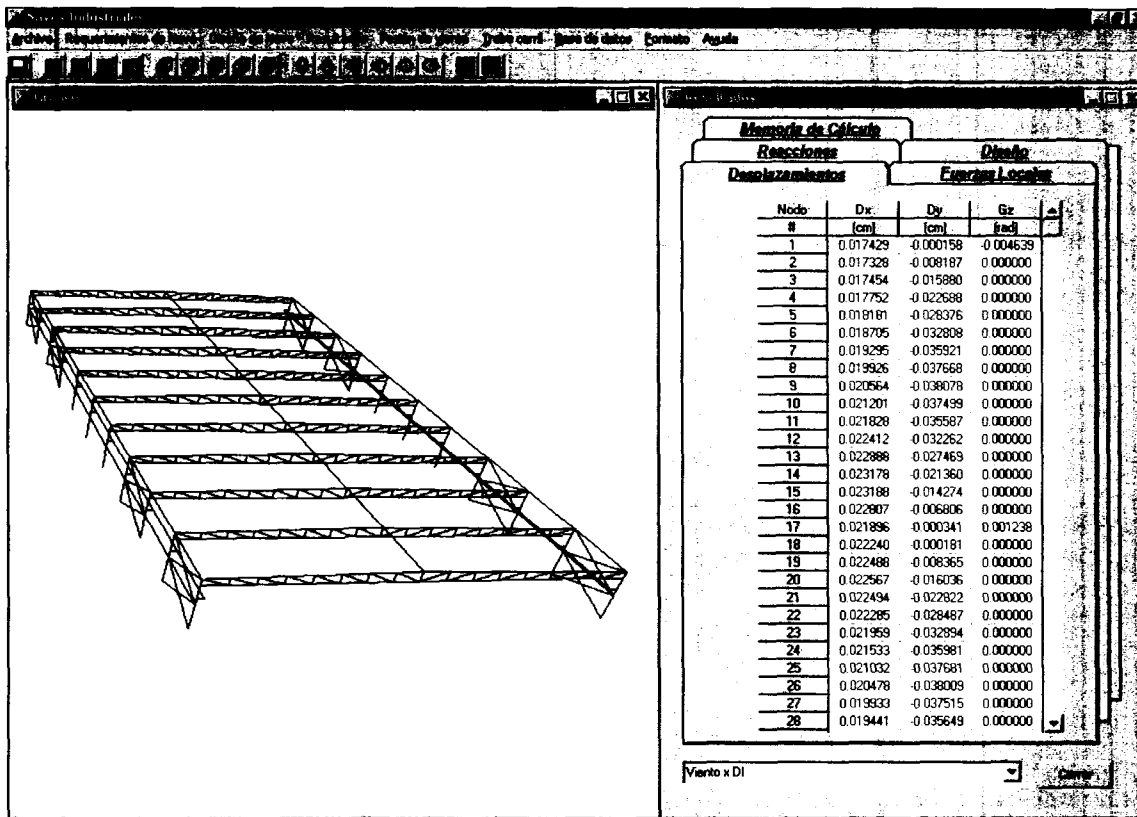


Figura 5.6. Desplazamientos

Similarmente, para observar las fuerzas locales, seleccionamos la etiqueta correspondiente. En la figura 5.7 podemos ver el formato que presenta el programa. La primera columna de la tabla muestra los números de los elementos para el marco más crítico; en la segunda columna se establecen los nodos para cada uno de los elementos. En la tercera columna se encuentran las fuerzas axiales. La cuarta y quinta columna corresponden a la fuerza cortante y el momento flector sobre los extremos de cada elemento; en el caso específico de armaduras, de antemano sabemos que los elementos trabajan solo a tensión o compresión, por lo que debemos esperar que en la columna de momento tenga el valor de cero, excepto para los elementos de columnas, mismos que si tienen la capacidad de trabajar para soportar todos los elementos mecánicos, incluyendo momento flexión, carga axial y cortante.

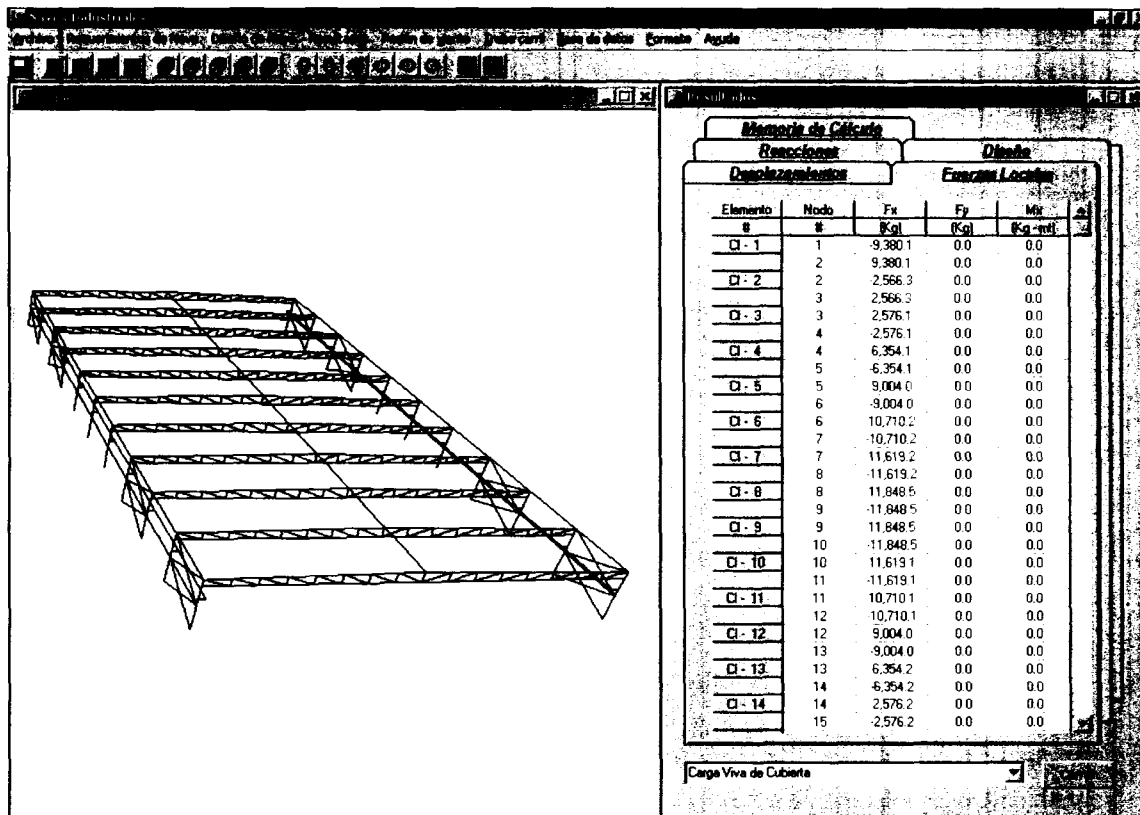


Figura 5.7. Fuerzas locales

Al darle un click a la etiqueta de Reacciones, se despliegan los elementos mecánicos de los apoyos para cada una de las cargas primarias y combinaciones de cargas últimas. Estos resultados corresponden al diseño con cargas últimas, por lo que directamente con éstos se pueden calcular las placas base (conexiones encargadas de transmitir las cargas a la cimentación).

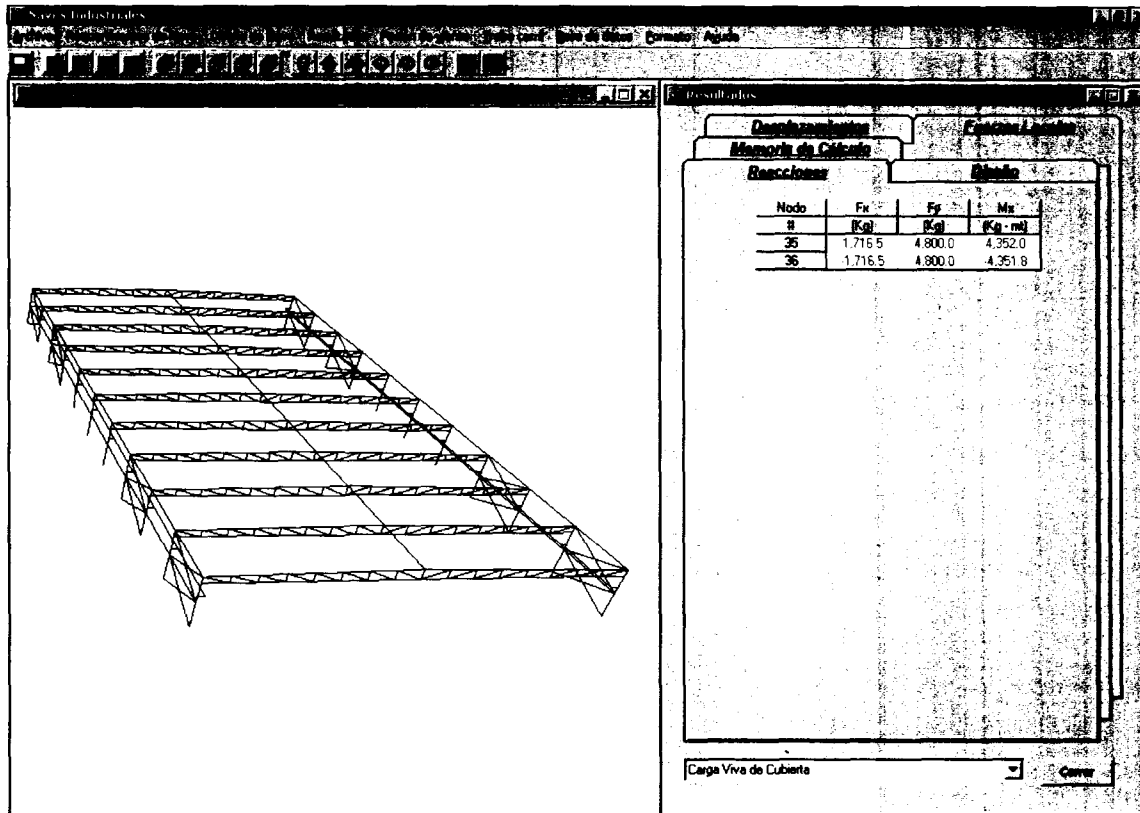


Figura 5.8. Reacciones

En la etiqueta de Diseño se encuentran las secciones diseñadas, es decir, los perfiles a usar para cada una de las partes de la Estructura. Para la cuerda superior de la armadura se obtuvieron 2 ángulos $3'' \times 3'' \times 1/4''$ y para la cuerda inferior 2 ángulos $2-1/2'' \times 2-1/2'' \times 1/4''$, mientras que en los diagonales se requieren 2 ángulos $3'' \times 3'' \times 3/16''$. En los montantes se requieren dos ángulos $2'' \times 2'' \times 3/16''$. Las columnas ocupan un perfil $W16 \times 40$. En la figura 5.9 se muestra la tabla con los tipos de secciones para cada elemento. Para ver los cálculos realizados, es necesario seleccionar la etiqueta de Memoria de Cálculo.

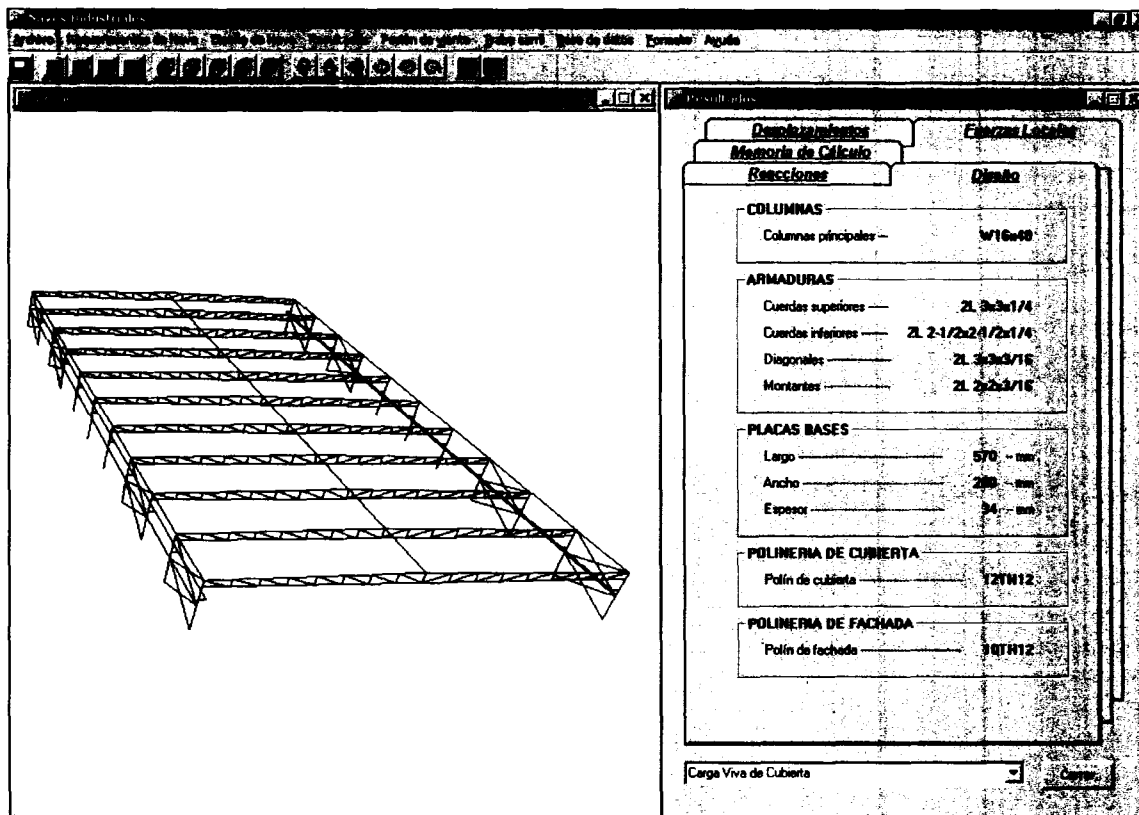


Figura 5.9. Diseño

En el menú de Trabe Carril, se encuentra un submenú de resultados que es el resumen de todos los cálculos realizados para el diseño de la trabe carril. En el se muestra si la trabe tiene pandeo lateral y/o pandeo local, además el esfuerzo normal y cortante al cual esta sometida la trabe. Para este ejemplo, la trabe no tiene problemas de pandeo local, ni tampoco de pandeo lateral. El esfuerzo normal que soporta la sección es de 45 ksi, mientras que el esfuerzo normal actuante resultó de 40.5 ksi, el esfuerzo cortante que soporta la sección es de 23.9 ksi, mientras que el esfuerzo cortante máximo actuante es de 13.4 ksi (Figura 5.10).

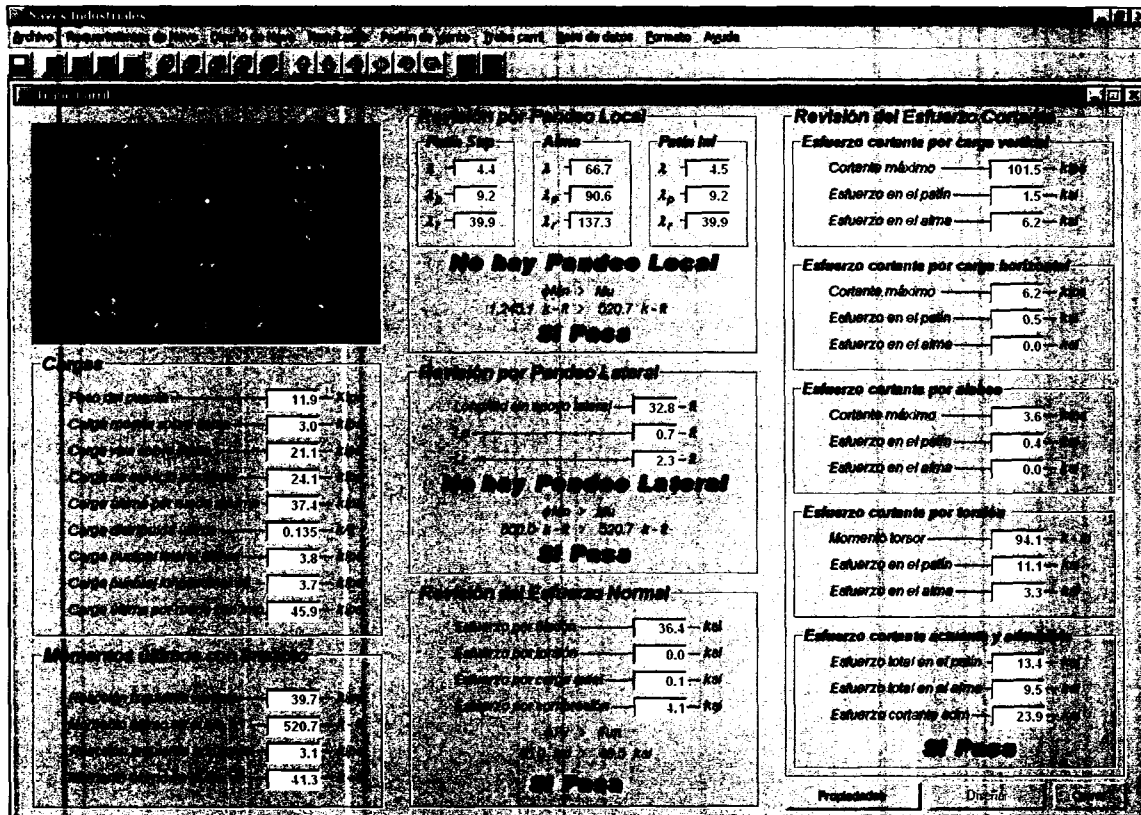


Figura 5.10. Resultados del diseño de Trabe Carril

Al seleccionar el comando Propiedades que se encuentra en la parte inferior derecha del formato de resultados de trabe carril, se abre en la pantalla un formato con las características de la trabe diseñada, así como también las características de la grúa, misma que fue seleccionada de la base de datos del programa, esto se puede observar en la figura 5.11 que se presenta a continuación.

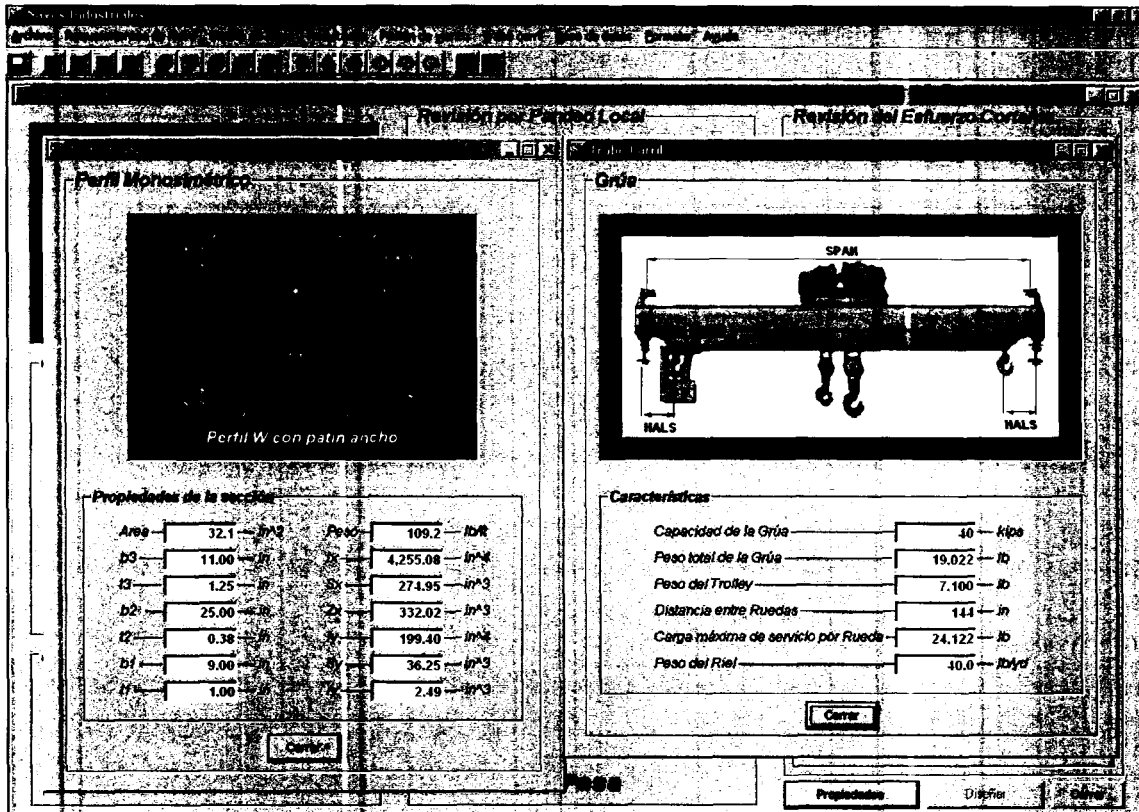


Figura 5.11. Propiedades de Trabe Carril y de Grúa

CAPÍTULO 6. MANUAL DEL USUARIO

El programa inicia con la presentación esquemática de una nave industrial. Para entrar al programa se necesita dar un click en cualquier región de la presentación y a partir de ahí, se puede hacer uso de él. A continuación se muestra dicha presentación:

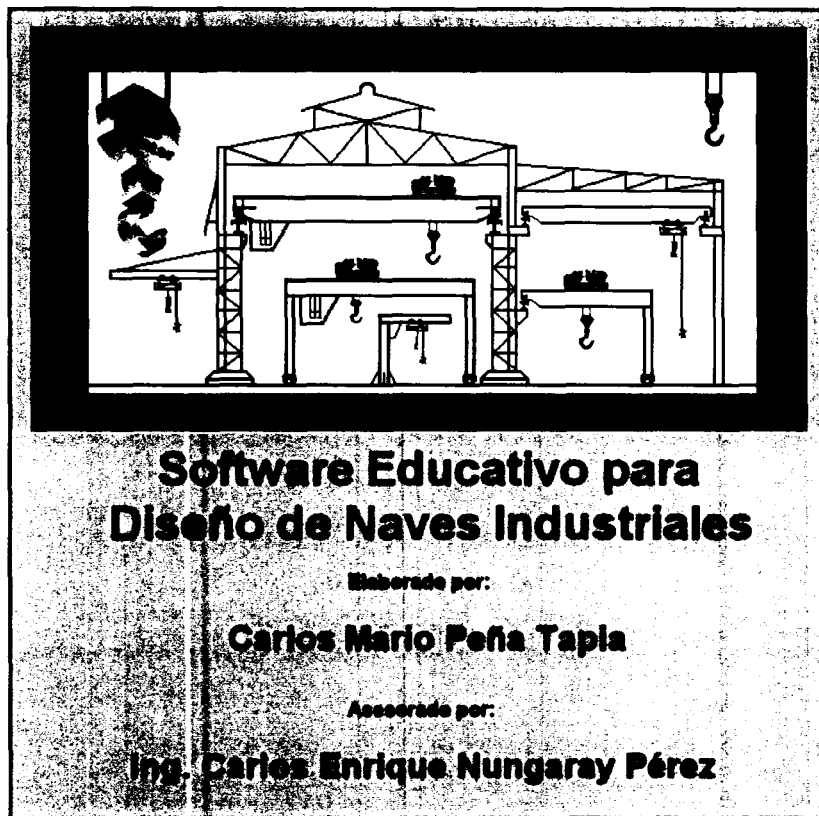


Figura 6.1. Presentación del programa

6.1. Pantalla principal

En la pantalla principal del programa, se muestran los diferentes menús con los que se puede interactuar. En ciertas ocasiones se requiere sólo hacer el diseño ó revisión de una trabe carril, por lo que directamente se entra al menú de trabe carril y se proporcionan los datos necesarios, sin necesidad de hacer un diseño en conjunto (Figura 6.2).



Figura 6.2. Pantalla principal del programa

Los menús que contiene el programa son los siguientes:

- Archivo
- Requerimientos de nave
- Diseño de nave
- Resultados
- Presión de viento
- Trabe carril
- Base de datos
- Formato
- Ayuda

6.2. Menú Archivo

Básicamente, en este menú se tiene la manera de acceder a algún archivo previamente elaborado, guardar un proyecto ó salir del programa. Además cuando se tiene un gráfico abierto, en la parte inferior del menú Archivo, aparece el nombre de Gráfico, tal y como se muestra en la figura 6.3.

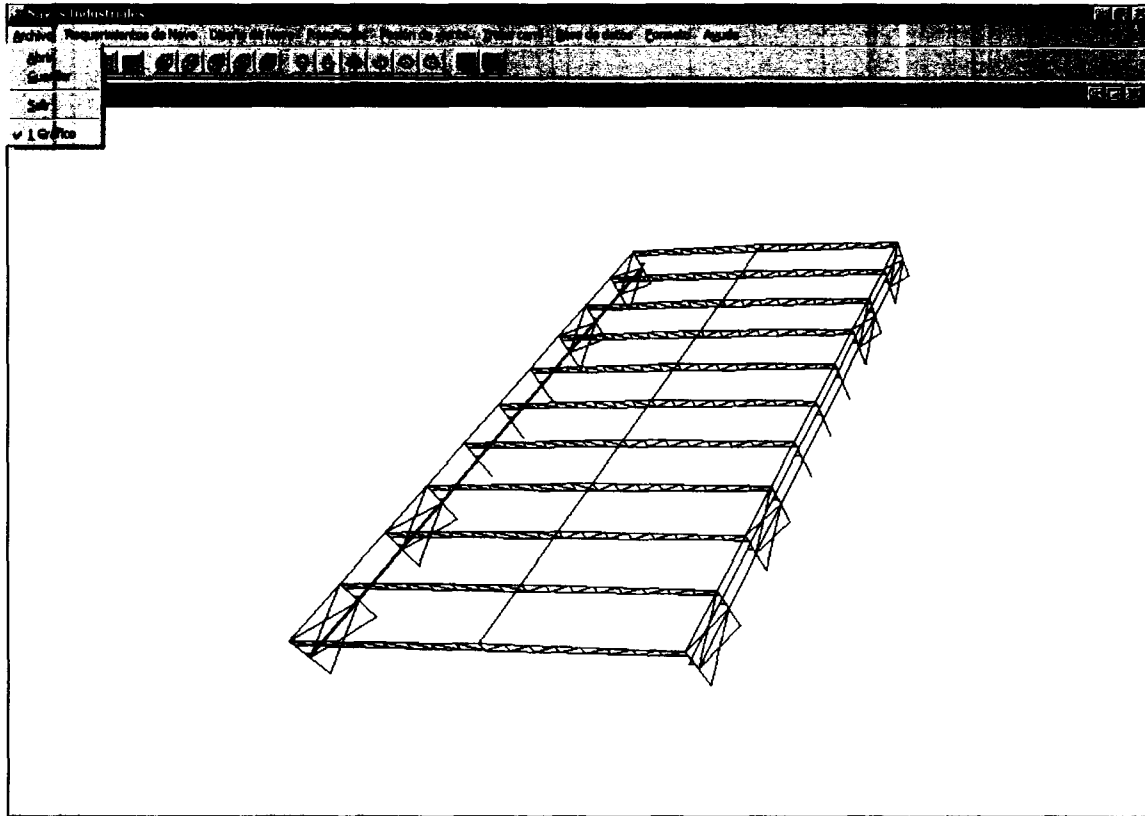


Figura 6.3. Menú Archivo

6.3. Menú Requerimientos de Nave

Este menú es el más importante, debido a que en él se suministran todos los requisitos para el diseño de una nave industrial completa. Al entrar en él se abre una pantalla que contiene tres submenús:

- Características Generales
- Viento y Sismo
- Trabe Carril

6.3.1. Características Generales

Es el primer submenú, que como su nombre lo indica, en él se proporcionan las características generales de la nave industrial, tales como ancho, altura libre mínima inferior, separación entre marcos, tipos de apoyos, número de marcos, fluencia del acero y pendiente de la cubierta (Figura 6.4).

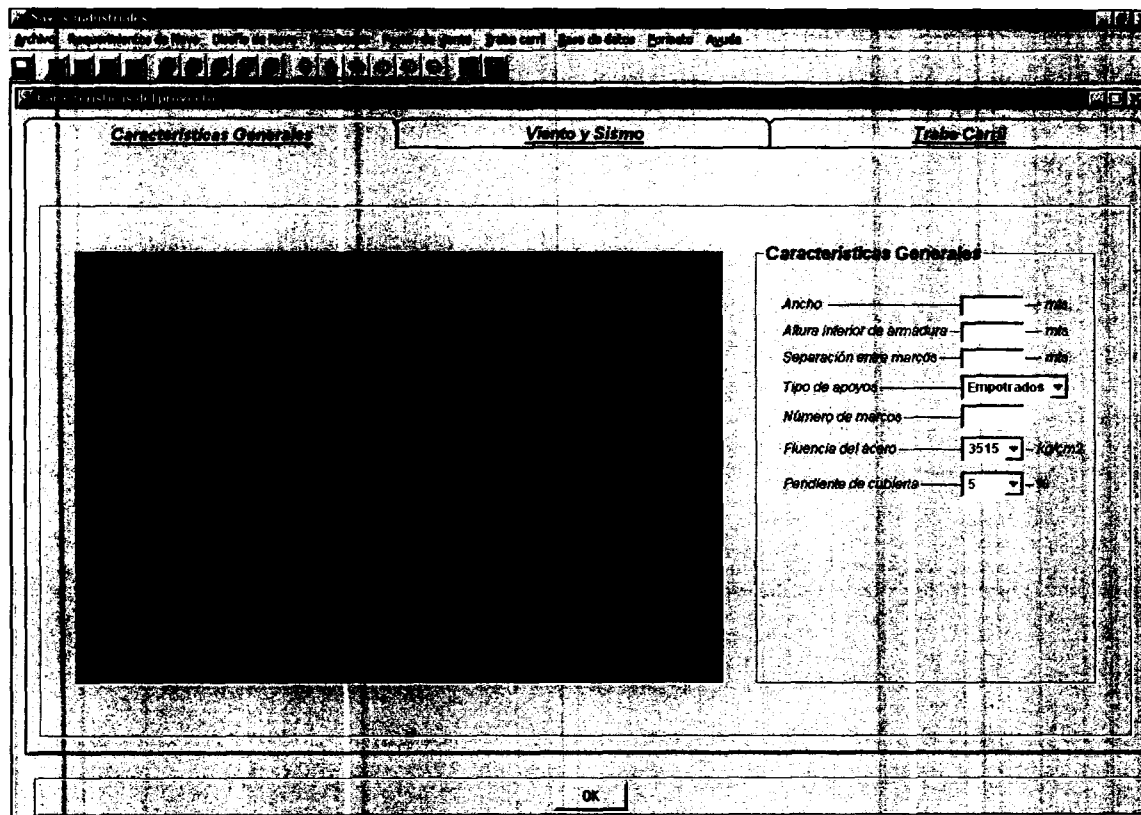


Figura 6.4. Submenú Características Generales

6.3.2. Viento y Sismo

Éste es el segundo submenú; del menú de Requerimientos de Nave, en él se establece la ciudad en donde se localiza el proyecto, la categoría del terreno según su rugosidad y la topografía local, que corresponden a características necesarias para realizar el diseño por viento. Para el diseño por sismo es indispensable además proporcionar el tipo de suelo (Figura 6.5).

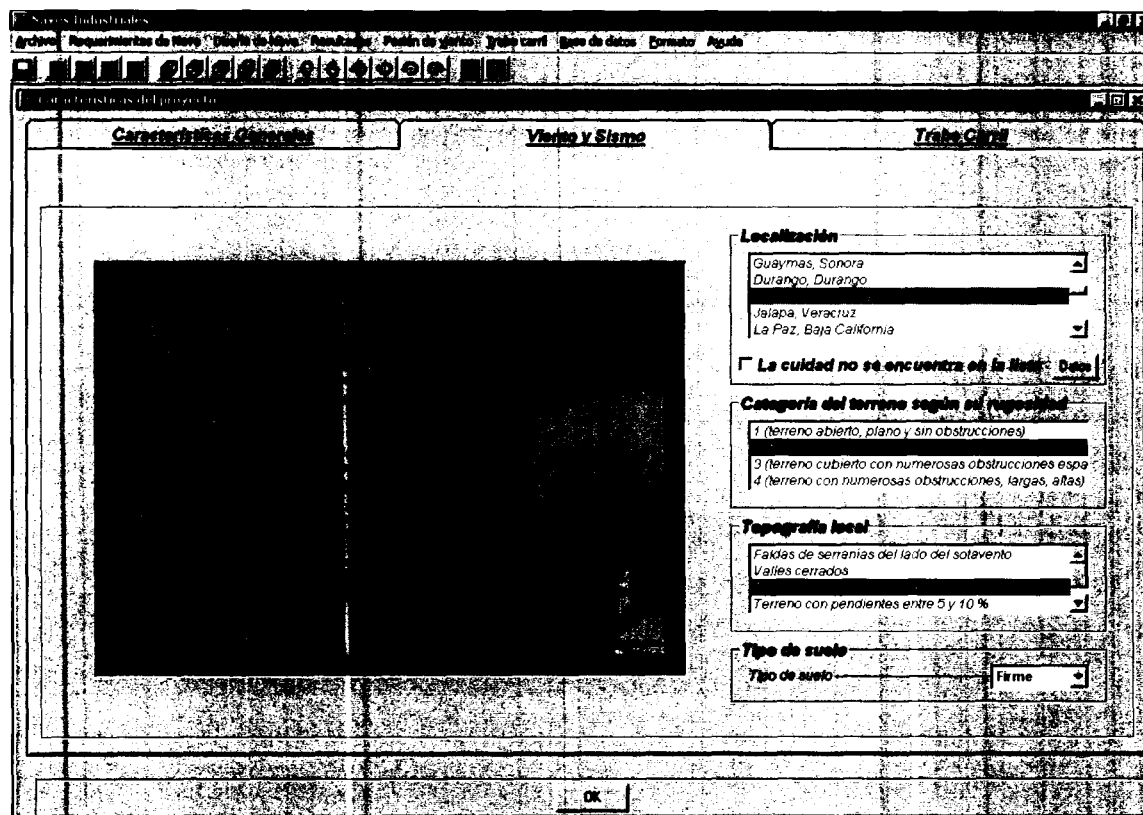


Figura 6.5. Submenú Viento y Sismo

Habr  ocasiones en que se solicita realizar un proyecto en una ciudad que no se encuentre en la lista de ciudades del programa, por lo que se necesita introducir datos manualmente en una pantalla que aparece al presionar el comando Datos localizado en el submenú Trabe Carril (Figura 6.6).

Los datos requeridos son:

- Velocidad regional
- Altura sobre el nivel del mar
- Temperatura media anual
- Zona s mica

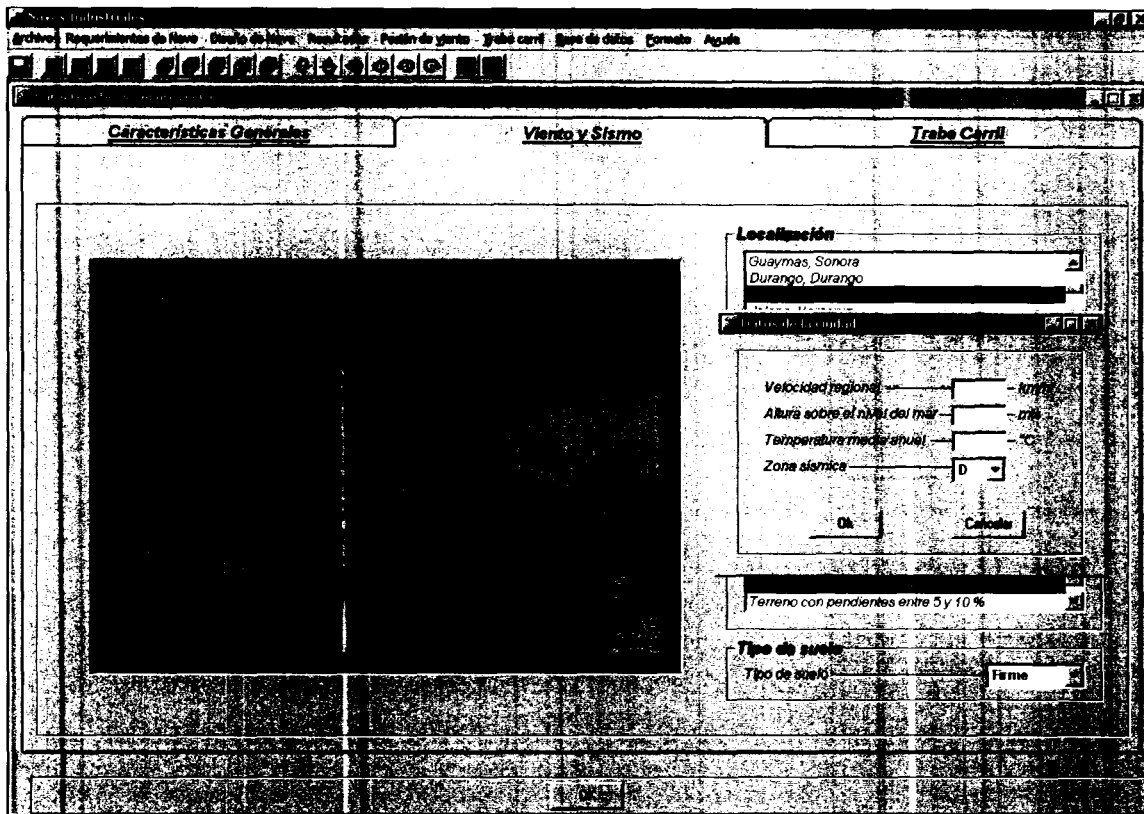


Figura 6.6. Datos requeridos para el diseño por viento y sismo

6.3.3. Trabe Carril

El tercer submenú, se refiere al diseño de trabe carril en caso de que nuestro proyecto lo requiera. En él se debe introducir el tipo de la sección transversal de la trabe carril y las características de la grúa (Figura 6.7).

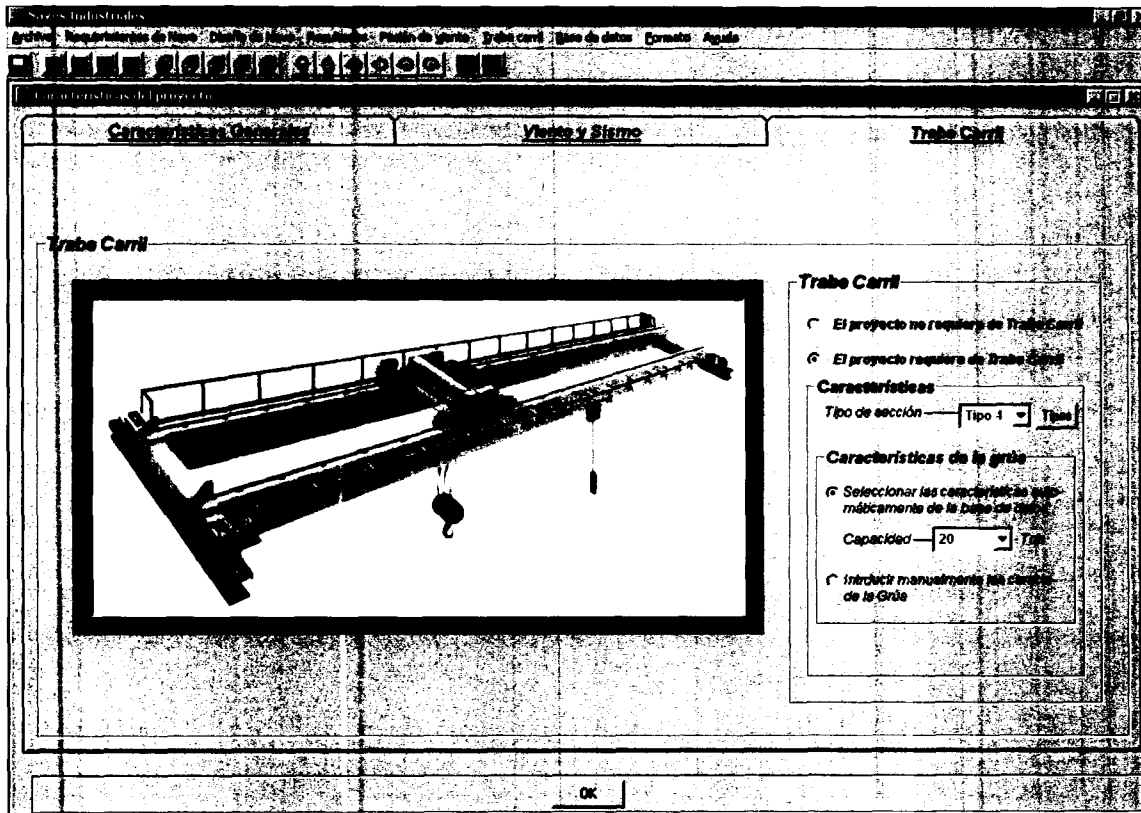


Figura 6.7. Datos requeridos para el diseño de trabe carril

El programa tiene la capacidad de revisar y diseñar cuatro tipos de secciones transversales de trabe carril (Figura 6.8). Para ver los tipos de secciones se debe dar un click en el comando Tipos. Las secciones son:

- Perfil W rolado con un ángulo soldado al patín superior.
- Perfil W rolado.
- Perfil a base de 4 placas soldadas con sección cajón.
- Perfil a base de 3 placas soldadas con sección I.

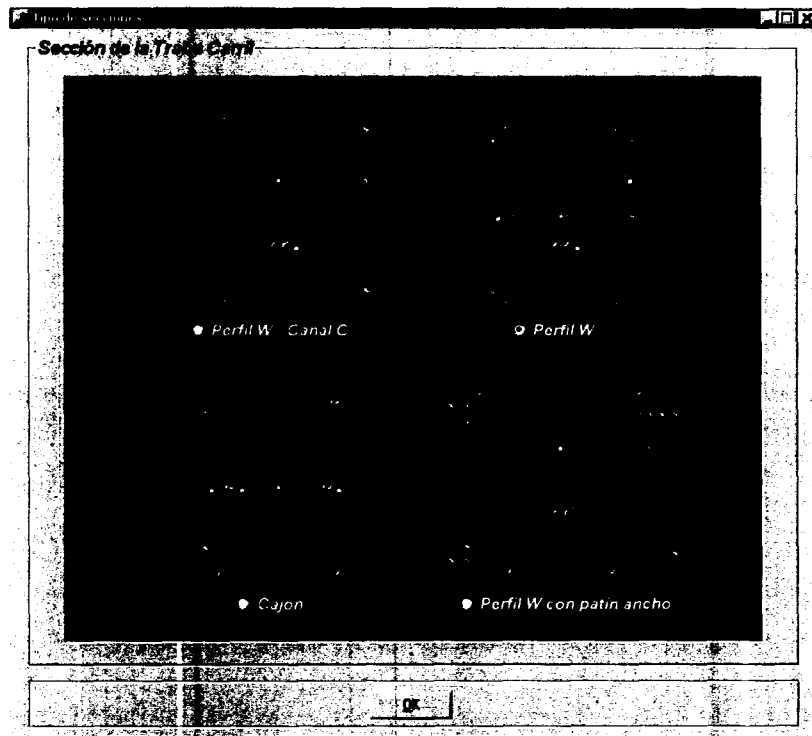


Figura 6.8. Tipos de sección transversal de trabe carril

Para proporcionar los datos de la grúa se puede realizar de dos maneras. La primera es que el programa automáticamente seleccione una grúa de su base de datos con sólo darle la capacidad de la grúa. El claro del puente es tomado por el programa de la misma magnitud que el ancho de la nave industrial. Y la segunda se genera, si en la base de datos no se tiene una grúa que cumpla con el claro, se mostrará un mensaje comentando esta situación, por lo que habrá la necesidad de introducir manualmente los datos. El formato a llenar es el mostrado a continuación:

The screenshot shows a software window titled "Características de la grúa". It is divided into two main sections: "Datos" and "Características".

Datos: This section contains a diagram of a crane bridge. The span is labeled "SPAN" with a horizontal dimension line. The height of the bridge is labeled "HALS" at both ends with vertical dimension lines. A crane trolley is shown on the bridge with two hooks hanging down.

Características: This section contains a form with the following fields:

- Capacidad de la Grúa: [] — Ton
- Peso total de la Grúa: [] — Ton
- Peso del Trolley: [] — Ton
- Distancia entre Ruedas: [] — m
- Carga máxima de servicio por Rueda: [] — Ton
- Riel (ASCE): [60]

At the bottom of the form is a button labeled "OK".

Figura 6.9. Datos de grúa para el diseño de trabe carril

6.4. Menú Diseño de Nave

Después de haber introducido todas las características de la nave industrial, se cuenta con el menú de Diseño, al cuál se le debe dar un click para que el programa realice el diseño correspondiente. Es necesario esperar un tiempo mientras se realizan los cálculos (Figura 6.10).

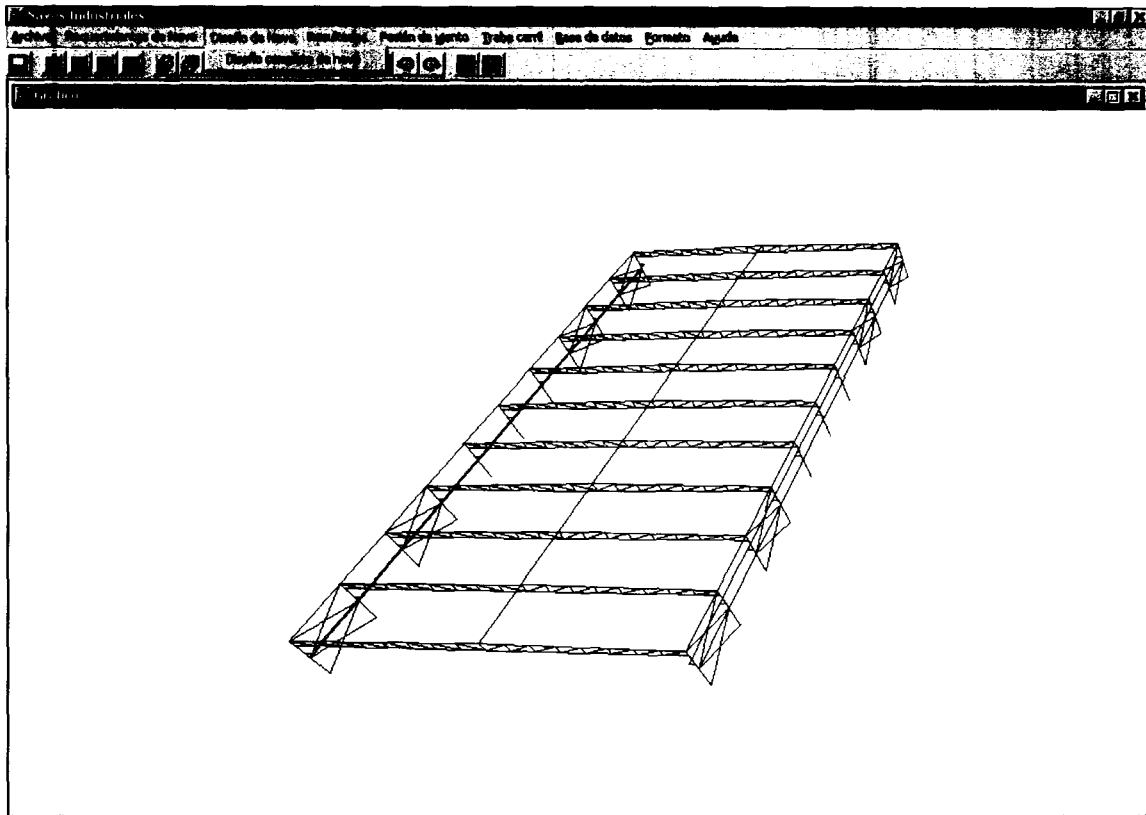


Figura 6.10. Menú de Diseño

6.5. Menú Resultados

En este menú es donde se contiene la mayoría de los resultados, aquí se presentan los desplazamientos, las fuerzas de los elementos, las reacciones y las secciones diseñadas, todo esto para el marco más crítico (el diseño se realiza en el plano). Al dar un click sobre el Menú Resultados aparece automáticamente el formato siguiente:

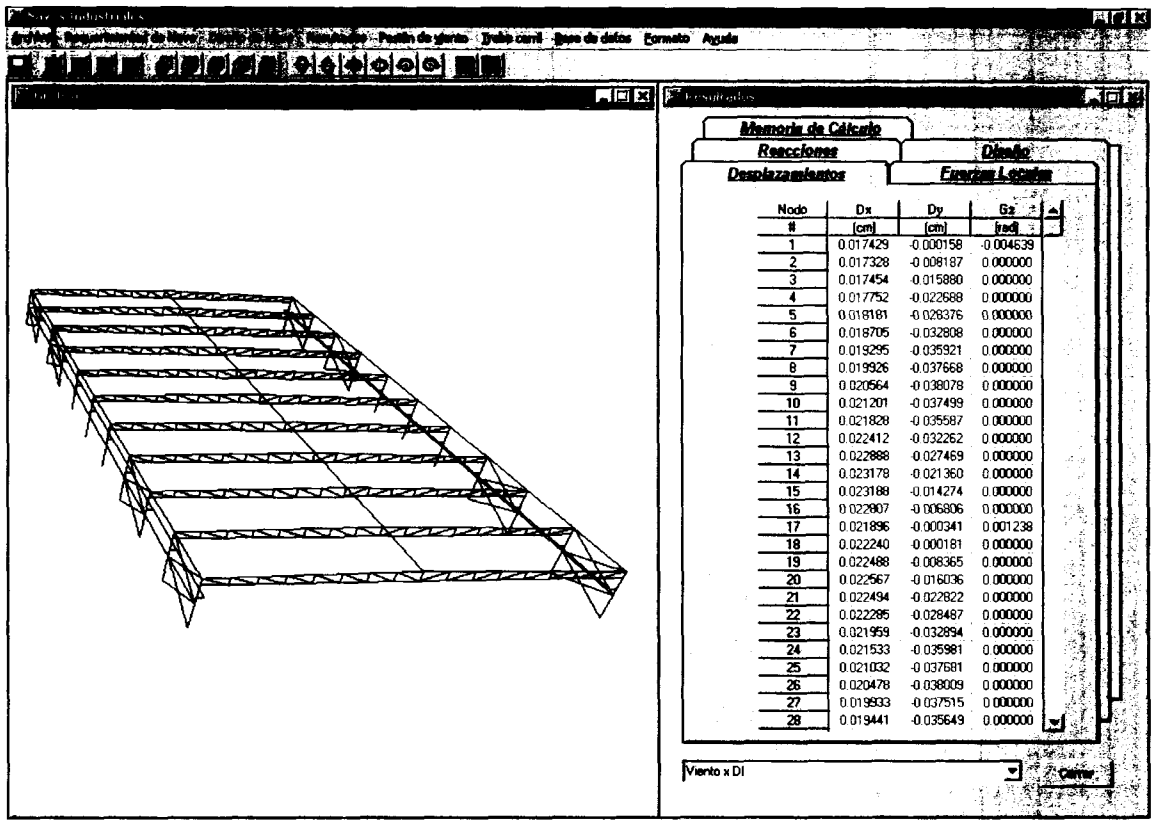


Figura 6.11. Menú de Resultados

En la parte superior derecha de la figura 6.11 se alcanza a observar cuatro etiquetas que corresponden a formas de resultados, mismas que deben ser activados con un click para ver su contenido.

6.6. Menú Presión de Viento

Este menú nos ayuda a visualizar los cálculos de la presión dinámica de base para el diseño por viento. Para observarlos se requiere entrar al Menú Presión de Viento \ Presión dinámica de base (Figura 6.12).

The image shows a software window titled "Presión Dinámica de Base". Inside the window, there is a list of parameters, each with a horizontal input field to its right. The parameters and their units are as follows:

- Fc
- Alfa
- Delta — m
- Fz
- Factor Alfa
- Factor de Topografía
- Velocidad Regional — kg/m²
- Altitud — manm
- Temperatura — °C
- Velocidad de Diseño — km/hr
- Presión Barométrica — mm de Hg
- Factor G
- Presión Dinámica — kg/m²

At the bottom center of the window, there is a button labeled "Calcular".

Figura 6.12. Parámetros para el cálculo de la presión dinámica de base

6.7. Menú Trabe carril

Este menú de Trabe carril nos ayuda a visualizar los resultados de una trabe carril en el diseño de una nave industrial completa, y por otro lado nos permite hacer el diseño o revisión de una trabe carril por separado (Figura 6.13).

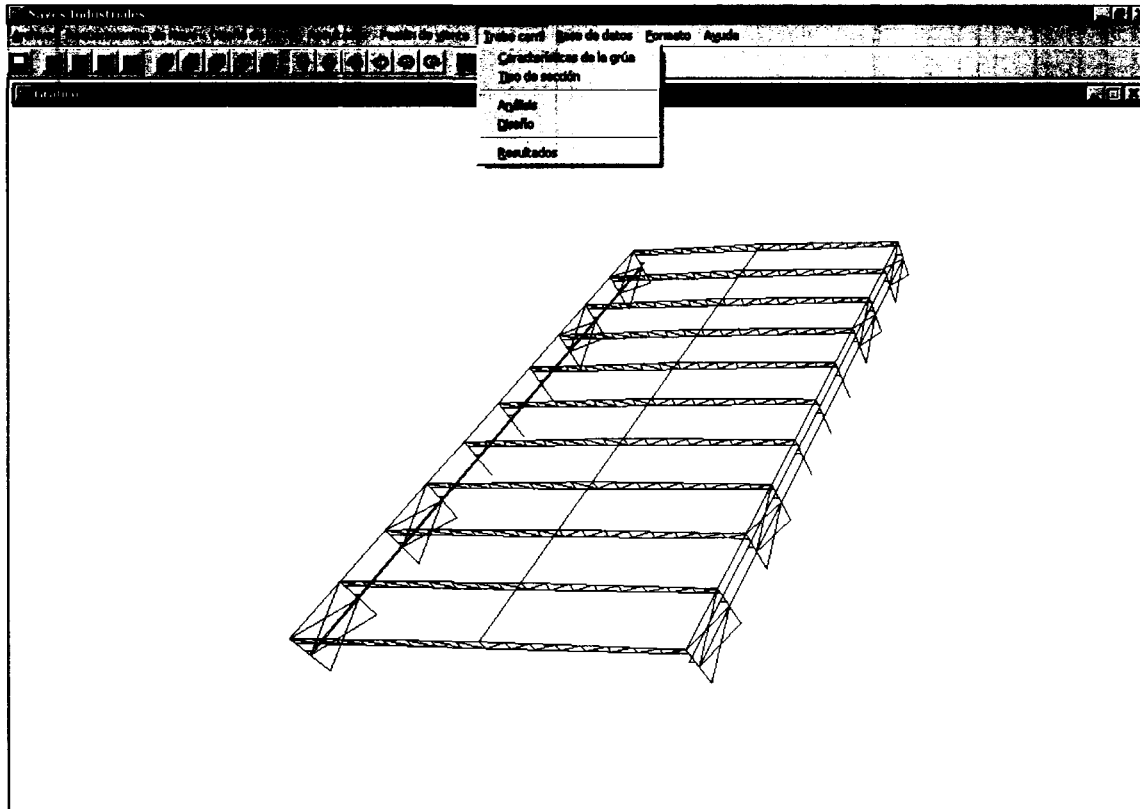


Figura 6.13. Menú de Diseño de Trabe Carril

6.7.1. Resultados de Trabe Carril

El formato en el que son presentados los resultados del diseño o análisis de una trabe carril, muestra datos de las cargas, momentos últimos con impacto, revisión por pandeo local, revisión por pandeo lateral, revisión del esfuerzo normal, revisión del esfuerzo cortante como se observa a continuación:

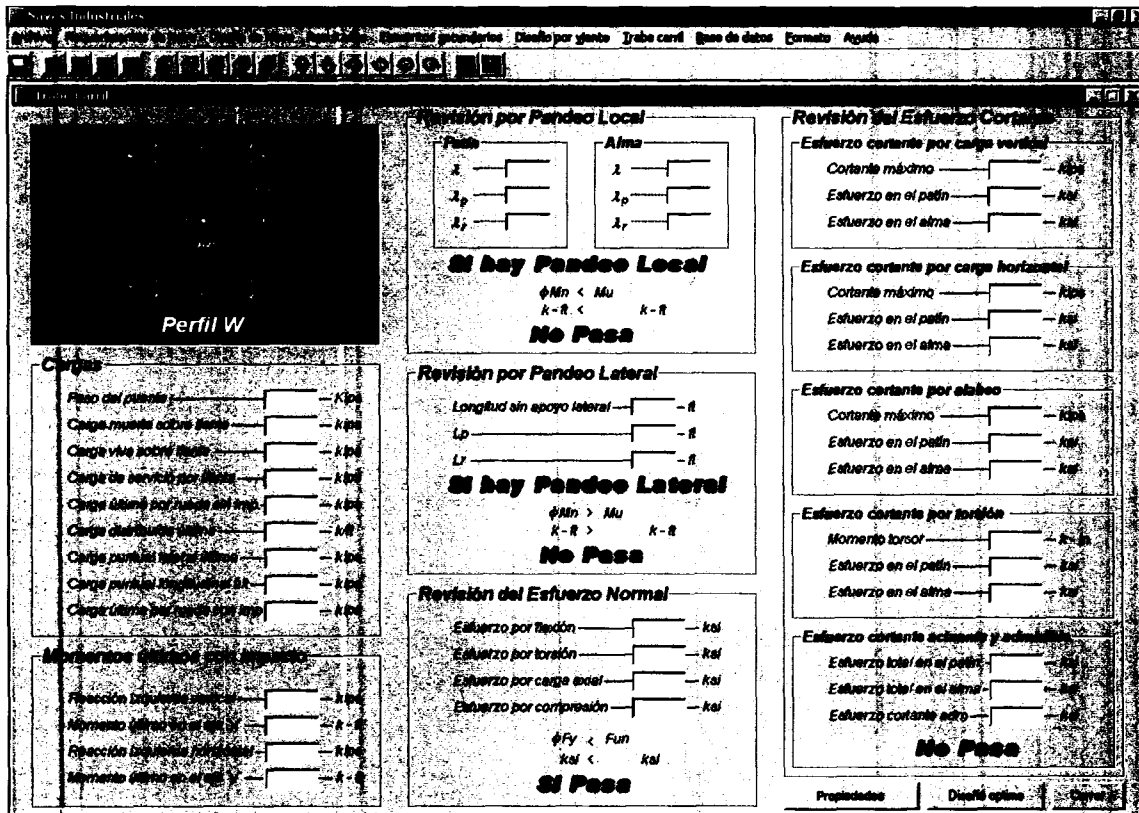


Figura 6.14. Formato de resultados de diseño o análisis de trabe carril

En la parte inferior derecha se muestra un comando de nombre "propiedades", al darle click, aparecen 2 formas, una con las propiedades del perfil y la otra con las características de la grúa (Figura 6.15).

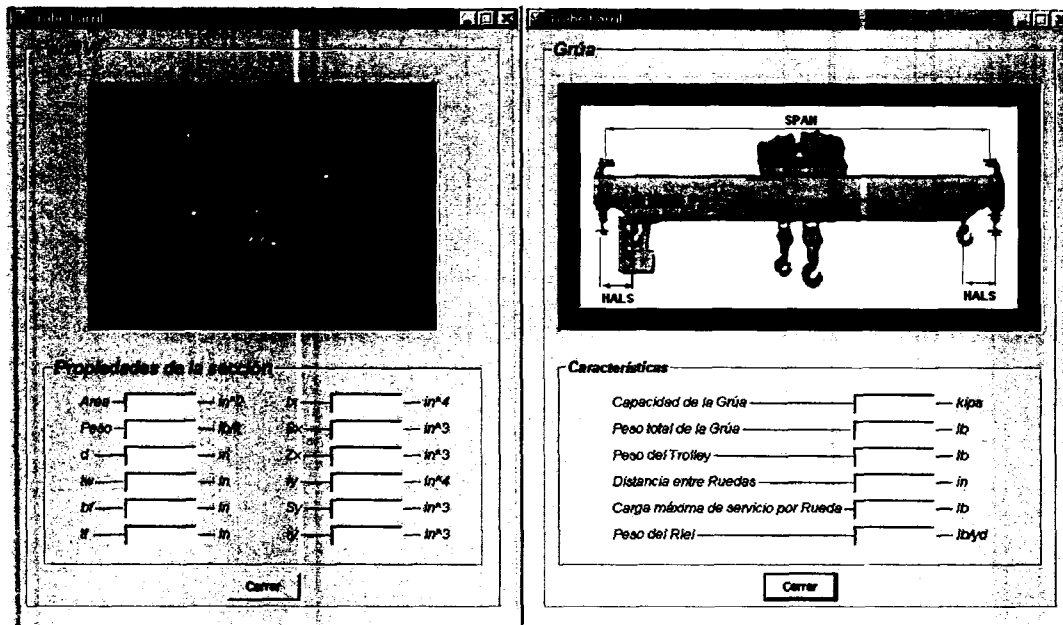


Figura 6.15. Propiedades de perfil y de grúa

6.8. Menú Bases de datos

Algunas de las bases de datos pueden ser accedidas por el usuario con el fin de obtener información en específico. En estas bases de datos se tiene información sobre:

- Perfil W
- Perfil W con canal
- Grúa
- Riel
- Factor de reducción β

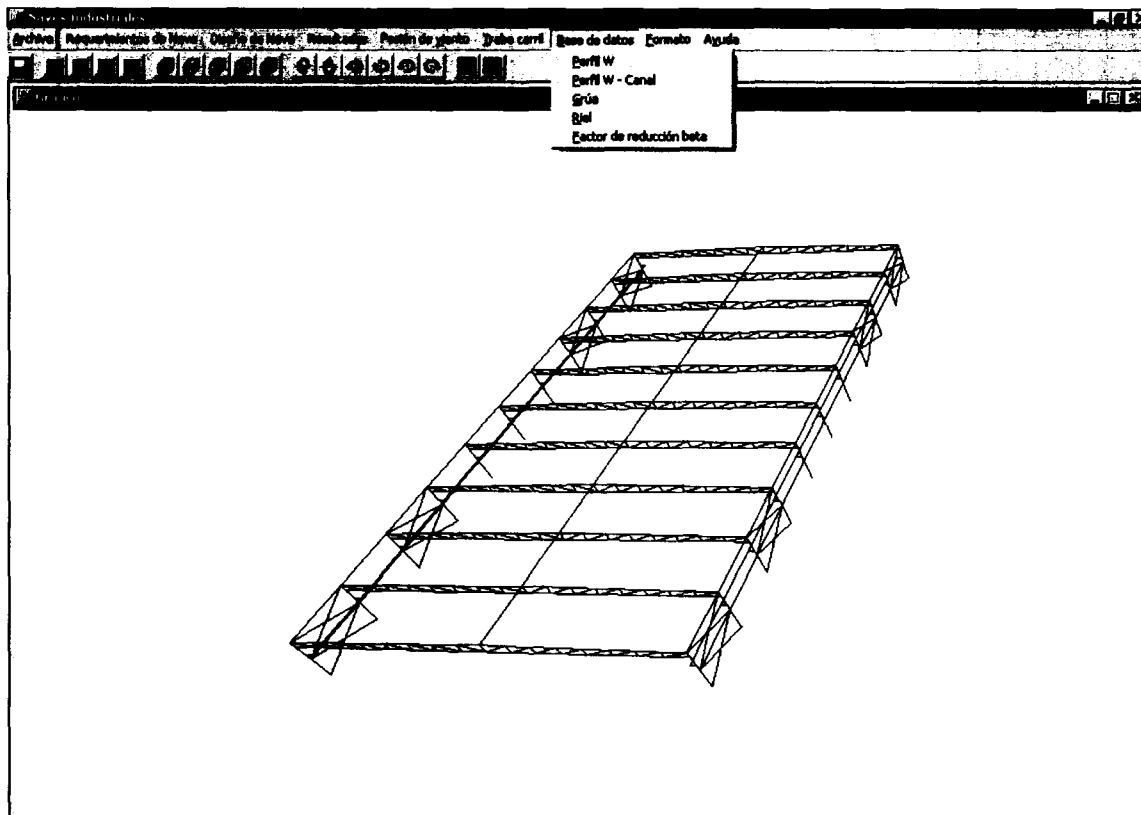


Figura 6.16. Bases de datos

6.8.1. Perfil W

En esta base de datos se tiene a 267 perfiles W del Manual del AISC – LRFD 2003 con sus características más importantes (Figura 6.17).

W10x60	60	17.80	10.20	10.10	0.42	0.68	18.70	341.00	74.60	86.70	116.00	23.00	2.570	2.480
W10x68	68	20.00	10.40	10.10	0.47	0.77	16.70	394.00	83.30	75.70	134.00	26.40	2.590	3.560
W10x77	77	22.60	10.60	10.20	0.53	0.87	14.80	453.00	97.60	85.90	154.00	30.10	2.600	5.110
W10x88	88	25.90	10.80	10.30	0.61	0.99	13.00	534.00	113.00	98.50	179.00	34.80	2.630	7.530
W10x100	100	29.40	11.10	10.30	0.68	1.12	11.60	623.00	130.00	112.00	207.00	40.00	2.650	10.900
W10x112	112	32.90	11.40	10.40	0.75	1.25	10.40	716.00	147.00	126.00	236.00	45.30	2.680	13.100
W12x14	14	4.16	11.90	3.97	0.20	0.22	54.30	88.60	17.40	14.90	2.36	1.19	0.753	0.070
W12x16	16	4.71	12.00	3.99	0.22	0.26	49.40	103.00	20.10	17.10	2.82	1.41	0.773	0.103
W12x19	19	5.57	12.20	4.01	0.23	0.35	46.20	130.00	24.70	21.30	3.76	1.88	0.822	0.180
W12x22	22	6.48	12.30	4.03	0.26	0.43	41.80	156.00	29.30	25.40	4.66	2.31	0.848	0.293
W12x26	26	7.65	12.20	6.49	0.23	0.38	47.20	204.00	37.20	33.40	17.30	5.34	1.510	0.300

Figura 6.17. Bases de datos para perfiles W

6.8.2. Perfil W - Canal

El Manual del AISC – LRFD 2003 solo cuenta con 28 combinaciones de perfiles W con Canal, por esta razón la base de datos tiene esa cantidad. (Figura 6.18).

Perfil W - Canal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
W12x26 - C10x15.3	41.3	12.1	290.0	36.3	8.2	4.2	84.6	16.9	1,246.2	0.9	1,692.0	1,306.8	165.3
W12x26 - C12x20.7	46.7	13.7	318.0	36.8	8.6	3.9	146.3	24.4	1,333.8	1.1	1,756.8	1,324.8	200.7
W14x30 - C10x15.3	45.3	13.3	420.0	46.1	9.1	4.9	86.9	17.4	1,762.9	1.0	2,178.0	1,659.6	165.1
W14x30 - C12x20.7	50.7	14.9	448.0	46.8	9.6	4.5	148.6	24.8	1,892.3	1.2	2,242.8	1,684.8	200.0
W16x36 - C12x20.7	56.7	16.7	670.0	62.8	10.7	5.5	153.5	25.6	3,048.6	1.5	3,009.6	2,260.8	197.1
W16x36 - C15x33.9	69.9	20.5	748.0	64.6	11.6	4.7	339.5	45.3	3,268.2	2.5	3,169.6	2,325.6	251.3
W18x30 - C12x20.7	70.7	20.8	1,120.0	97.4	11.5	6.8	169.1	28.2	5,900.5	2.6	4,608.0	3,506.4	196.7
W18x30 - C15x33.9	83.9	24.6	1,250.0	100.0	12.5	5.9	355.1	47.3	6,568.8	3.9	4,824.0	3,600.0	242.7
W21x62 - C12x20.7	82.7	24.4	1,800.0	138.0	13.0	8.3	186.5	31.1	11,043.8	3.5	6,552.0	4,968.0	188.1
W21x62 - C15x33.9	95.9	28.2	2,000.0	142.0	14.1	7.3	372.5	49.7	12,331.9	4.9	6,840.0	5,112.0	236.2
W21x68 - C12x20.7	86.7	26.1	1,960.0	152.0	12.9	8.5	193.7	32.3	12,280.9	4.4	7,200.0	5,472.0	185.3

Figura 6.18. Bases de datos para perfiles W - Canal

6.8.3. Grúas

El programa cuenta con una base de datos con 384 grúas, con capacidades que van de 2 hasta 120 kips. Para cada una de ellas se puede visualizar sus propiedades más importantes. (Figura 6.19).

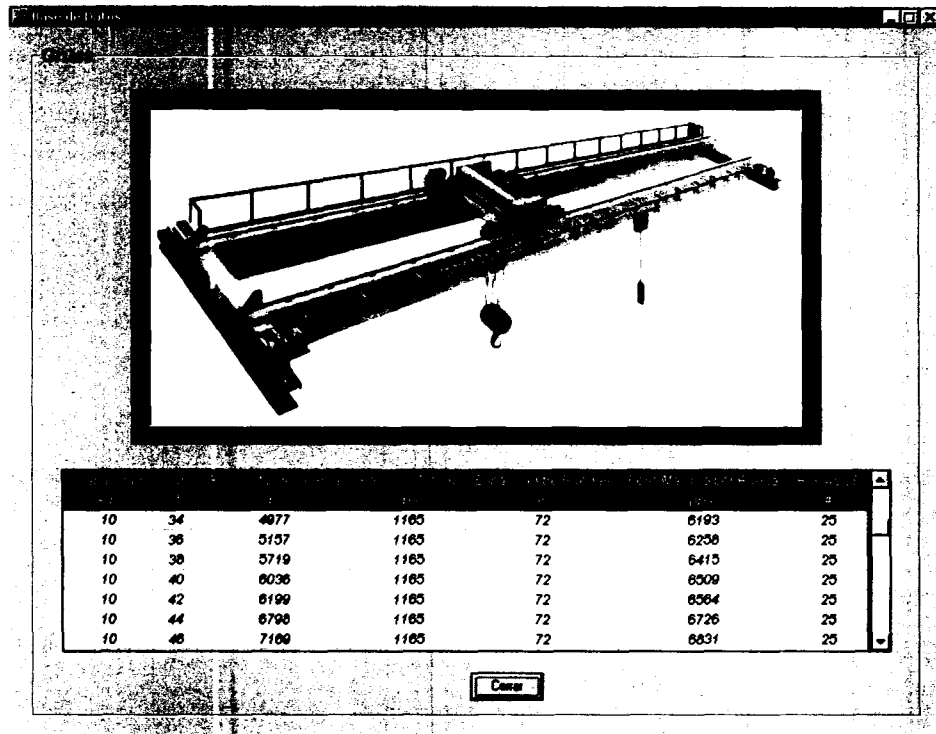


Figura 6.19. Bases de datos para Grúas

6.8.4. Rieles

La base de datos de rieles cuenta con 13 tipos de rieles de la ASCE, en ella se muestra el peso, el peralte y la inercia en el eje "x" para cada riel. (Figura 6.20).

Weight	Height	Inertia
50	3.88	10.10
60	4.25	14.60
70	4.62	19.70
80	5.00	26.40
85	5.19	30.10
100	5.75	44.00
104	5.00	29.80

Figura 6.20. Bases de datos para Rieles

6.8.5. Factor de Reducción β

Regularmente las traveses carril se encuentran simplemente apoyadas con el fin de no causar fatiga. En traveses carril empotradas se produce fatiga, debido al constante cambio de claros por parte de la grúa. Por tal motivo, solo se necesitan los factores de reducción β para el caso de vigas simplemente apoyadas, que son los que se muestran en la siguiente figura:

0.5	0.980	0.980	0.980	0.980	0.980
1	0.920	0.930	0.940	0.950	0.970
2	0.780	0.770	0.800	0.840	0.910
3	0.600	0.620	0.650	0.720	0.830
4	0.480	0.500	0.540	0.620	0.760
5	0.380	0.410	0.450	0.540	0.700
6	0.330	0.340	0.380	0.470	0.650
8	0.250	0.260	0.300	0.370	0.500
10	0.200	0.210	0.240	0.310	0.480

Figura 6.21. Bases de datos de Factores de Reducción β

6.9. Menú Formato

Este menú nos sirve para cambiar de color el fondo de los gráficos y también el color de las líneas que simbolizan a los elementos de la nave industrial. (Figura 6.22).

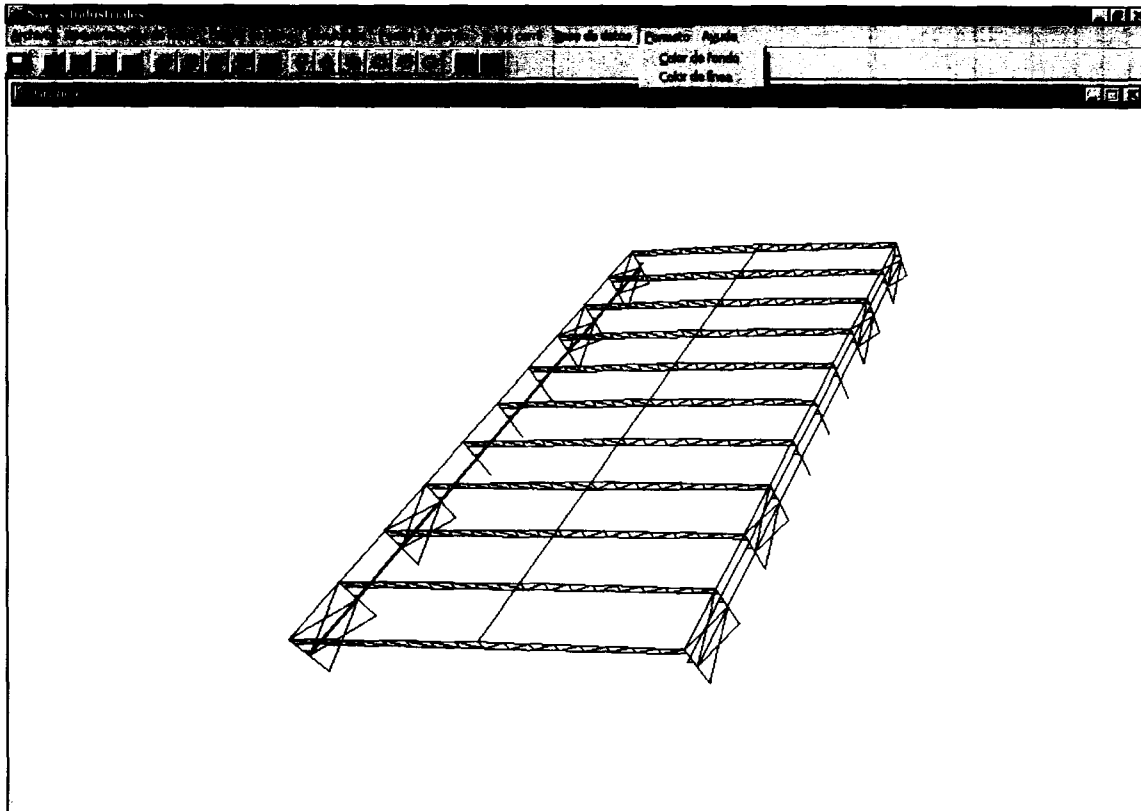


Figura 6.22. Menú Formato

6.9.1. Color

Tanto para el fondo como para las líneas, el formato de color en donde el usuario puede seleccionar un color para cada uno de los dos puntos mencionados, es como el que aparece en la figura siguiente:

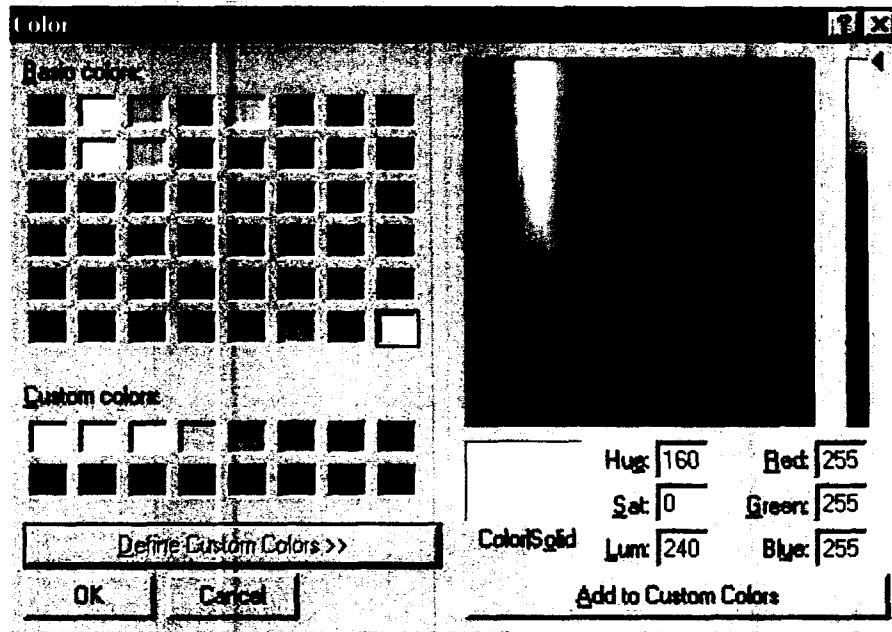


Figura 6.23. Formato de selección de colores

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Se ha desarrollado una herramienta básica para el diseño de naves industriales de planta rectangular, en el cual se realiza el diseño de los elementos principales como columnas, amaduras, contravientos, trabe carril, placas base, polinería de fachada y cubierta, además de que contiene bases de datos con información importante relacionada con grúas y perfiles.

En traves carril se determinó que los perfiles de tres placas de sección constante, conocidos como monosimétricos y perfiles de 4 placas, tienen un buen comportamiento, son muy eficientes y en ciertas ocasiones resultan mas livianos que cualquier otro tipo de perfil, ya sea perfil W rolado, sección compuesta por perfil W y perfil canal u otro tipo. Esto se debe a que se puede hacer una variación de espesores y anchos de placas como se requiera, lo cual no es posible en perfiles previamente elaborados. Las traves carril al estar sometidas a cargas muy grandes, necesitan de resistencias altas, para lo cual son indispensables los perfiles de gran tamaño, que por lo general los perfiles W comerciales en México no cumplen con dichas resistencias.

Un factor muy importante en el diseño del recubrimiento de las naves, es el realizar el análisis de viento con dirección paralela a las generatrices de la nave, puesto que es cuando se producen las presiones de diseño más críticas que corresponden a succiones muy fuertes sobre la cubierta.

Al realizar una serie de entrevistas en el ámbito profesional de la construcción, se concluyó que hay una diversidad de criterios para proyectar y diseñar, lo cual significa que hay varios caminos para llegar a una solución aceptable.

7.2. Recomendaciones

El diseño de naves industriales es un campo muy diverso, por lo cual se tienen muchas áreas en las cuales se puede profundizar, además, existen varios criterios estructurales y constructivos que pueden ser descritos al momento de seleccionar cada una de las variantes que involucran a la nave industrial, de tal forma que el estudiante alcance a interpretar y comprender las ventajas y desventajas que se tienen al seleccionar un parámetro. Se recomienda lo siguiente:

- Implementar el diseño de marcos rígidos formados con elementos de sección variable y sección constante, y hacer una comparativa con el diseño de marcos a base de armaduras para que el alumno vea las diferencias que existen entre una y otra.
- Hacer una descripción en cada diseño sobre las ventajas y desventajas que implica el escoger apoyos empotrados o apoyos articulados.
- Incluir gráficos de los elementos mecánicos (fuerza cortante, fuerza axial, momento flector y momento torsor).
- Mejorar la programación gráfica de directx 8.1, con otro visualizador que ocupe menos memoria.
- Realizar comparativas entre un sistema de cubierta a base de joist y un sistema de cubierta a base de polín, y describir las razones por las que se recomienda seleccionar uno de ellos.
- Desplegar la lista de los materiales con las respectivas cantidades que se ocupan para formar el edificio industrial, de tal manera que el estudiante se vaya familiarizando con las volumetrías de perfiles, mismas que son muy indispensables a nivel profesional.

Adicionalmente, se sugiere que se haga lo posible por involucrar al estudiante en un campo profesional, al crearle herramientas básicas que le ayuden a formar los criterios estructurales relacionados con el diseño de naves industriales para que rápidamente se introduzca en un ámbito competitivo. Sobre este punto se recomienda lo siguiente:

- Ampliar el concepto de nave con planta rectangular a cualquier otro tipo de geometría, para que el alumno tenga un concepto más amplio sobre los proyectos irregulares, mismos que son muy comunes a nivel profesional.
- Realizar rutinas para que el programa genere planos estructurales, de detalle, montaje y arquitectónicos, para que el estudiante comprenda el proceso que se sigue en el diseño total de una nave industrial.
- Crear subrutinas que realicen comparaciones entre diversos diseños estructurales para un mismo proyecto y que obtenga la mejor solución, tanto del punto de vista estructural como constructivo.

Anexo A. Elaboración e instalación de elementos estructurales de acero

La elaboración de elementos estructurales de acero involucra diversos procesos, los cuales se enlistan a continuación:

- Extracción del mineral de hierro.
- Fundición y laminación.
- Fabricación de elementos constructivos.
- Montaje.
- Juntas soldadas y atornilladas.
- Entrepisos y cubiertas.

Anexo B. Reglamentos de acero

- American Institute of Steel Construction Inc., “Load and Resistance Factor Design”, 3rd Ed., 2001.
- Metal Building Manufacturers Association, Low Rise Building Systems Manual, 1996.
- Association of Iron and Steel Engineers Technical Report No. 13, “Guide for the Design and Construction of Mill Buildings”, 1997.
- Light Gage Structural Institute, Design Handbook, 1990.

Anexo C. Tipos de especificaciones

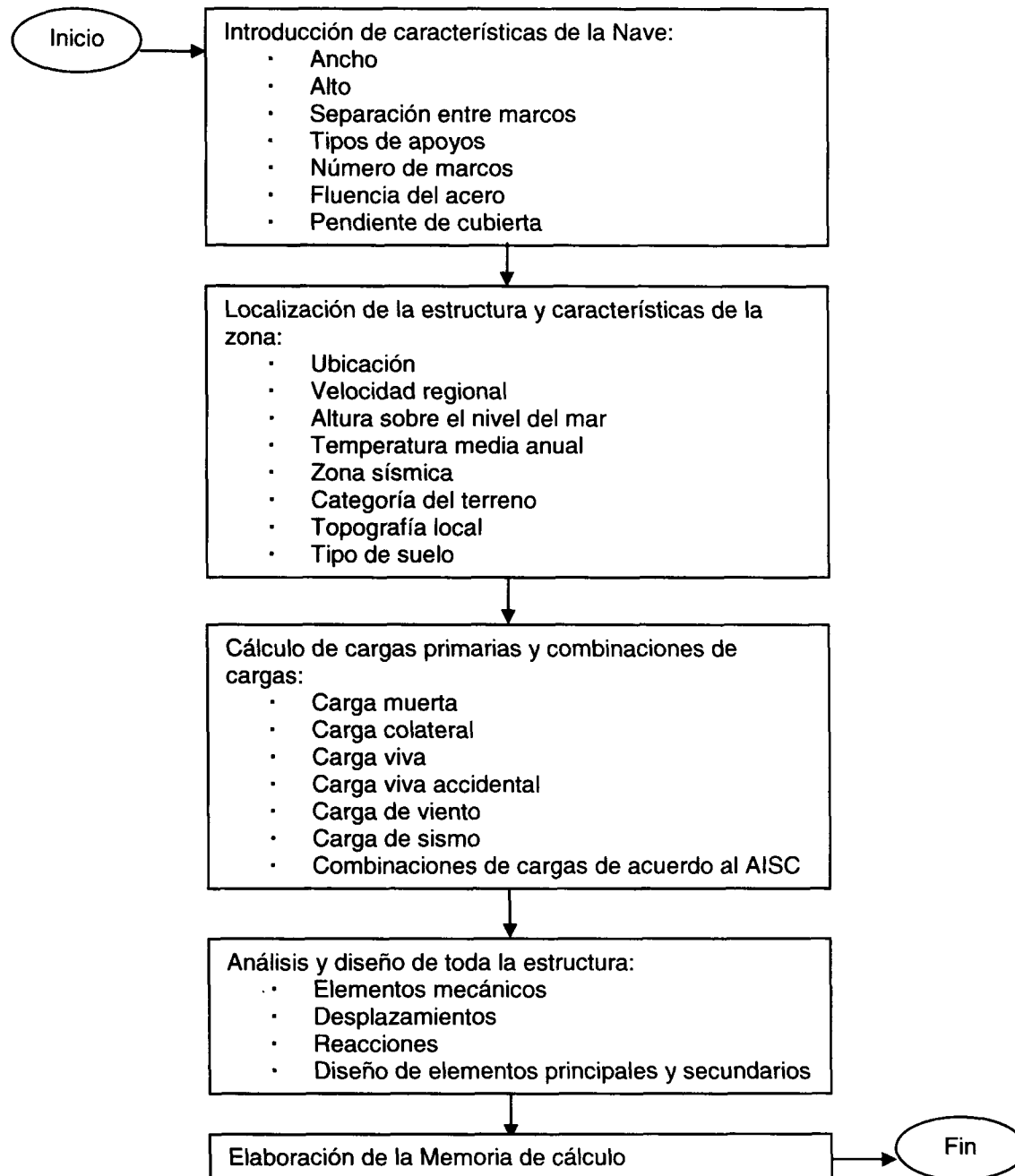
En un proyecto de construcción pueden utilizarse uno o más de los siguientes tipos de especificaciones técnicas:

- **Especificaciones descriptivas:** describen los componentes de un producto y la forma como se ensamblan. El redactor de estas especificaciones escribe en ellas: las propiedades físicas y químicas de los materiales, el tamaño de cada componente, las dimensiones y los espaciados de los dispositivos de fijación, la relación exacta de las partes móviles, la secuencia de ensamblaje, etc. En general, los ingenieros o arquitectos no disponen de los recursos, laboratorios o personal técnico capaces de realizar investigaciones de los productos o materiales especificados. Al considerar estos hechos, a menos que su redactor esté completamente seguro de que el producto terminado funcionará en forma adecuada, no se recomienda la utilización de las especificaciones descriptivas.
- **Especificaciones por referencia (normalizadas):** estas utilizan normas de autoridades reconocidas para especificar claridad. Como ejemplo de estas autoridades se tienen la NOM o NMX en México; en Estados Unidos la ASTM (American National Standards Institute), en la comunidad europea la organización ISO, etc.
- **Especificaciones de productos patentados:** describen materiales, equipos y diversos productos por marca comercial, número de modelo y fabricante, lo que simplifica la tarea del redactor, pues establece una norma de calidad aceptable para el ingeniero o arquitecto con base en productos que se encuentran a la venta.
- **Especificaciones para licitación o concurso base:** estipulan materiales y equipos aceptables citando uno o más fabricantes (se recomiendan tres). Con frecuencia las especificaciones para licitación permiten que los concursantes sugieran sustitutos o alternativas respecto a lo

especificado. Las especificaciones para licitación permiten lograr un mayor control en la calidad de materiales y equipos.

Anexo D. Diagrama de flujo

A continuación se presenta el diagrama de flujo general utilizado en este proyecto de diseño de naves industriales:



BIBLIOGRAFÍA

- American Institute of Steel Construction Inc., Load and Resistance Factor Design, 3rd Ed., 2001.
- Association of Iron and Steel Engineers, Guide for the Design and Construction of Mill Buildings, AISE Technical Report No. 13. June 1993.
- Association of Iron and Steel Engineers Technical Report No. 13, Guide for the Design and Construction of Mill Buildings, 1997.
- Bakota, Jhon F. "Mill Building Design Procedure", AISC Engineering Journal, Fourth quarter, 1977.
- Comisión Federal de Electricidad, "Diseño por sismo", 1^{ra} Ed., 1993.
- Comisión Federal de Electricidad, "Diseño por viento", 1^{ra} Ed., 1993.
- De la Garza G., Materiales y Construcción, Trillas, 1991.
- Ellifritt Duane S., Lue Dung-Myau, "Design of Crane Runway Beam with Chanel Cap", AISC Engineering Journal, Second quarter, 1988.
- Fisher, James M. "Industrial Building – Guidelines and Criteria", AISC Engineering Journal, Third quarter, 1984.
- Galambos T.V., Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, Wiley Interscience Publication, 4th Ed., 1988.
- García Salvador, Procedimientos de Construcción, ITESM, 1997.
- Gaylord Edwin H. Jr, Gaylord Charles N., Diseño de Estructuras de Acero, McGraw-Hill, 1983.
- Gossett, Stephen R. "Calculador Program for Determining Properties of Build-up or Composite Members", AISC Engineering Journal, Second quarter, 1982.

- Heredia Rafael, Arquitectura y Urbanismo Industrial, ETSII, 2^{da} Ed., 1981.
- Johnston Bruce G., Lin F. J. y Galambos T. V., Basic Steel Design, 3rd Ed., Prentice-Hall, 1986.
- Kitipornchai Sritawat, Trahair Nicholas S., Buckling Properties of Monosymmetric I-Beams, Journal of Structural Division, May 1980.
- Ledo J.M., Construcción de locales industriales, Monografías CEAC de la construcción, 1989.
- Light Gage Structural Institute, Design Handbook, 1990.
- Lin, Phillip H. "Simplified Design for Torsional Loading of Rolled steel Members". AISC Engineering Journal, Third quarter, 1977.
- Meli Roberto, "Diseño estructural", 1^{ra} Ed., Limusa, 1997.
- Meli Roberto y Bazán Enrique, "Diseño sísmico de edificios", 1^{ra} Ed., Limusa, 1998.
- Metal Building Manufacturers Association, Low Rise Building Systems Manual, 1996.
- Ricker, David T. "Tips for Avoid Crane Runway Problems", AISC Engineering Journal, Fourth quarter, 1982.
- Salmon Charles G, Johnson John E, Steel Structures Design and Behavior, Harper Collins College Publishers, 1996.
- www.imsa.com
- www.knudson.com
- www.multipanel.com

Centro de Información-Biblioteca



30002006631790