



UNIVERSIDAD DON VASCO A.C.

Incorporación No. 8727 - 15

a la Universidad Nacional Autónoma de México.

Escuela de Ingeniería Civil

PROPUESTA DE ANÁLISIS POR GRANIZO DE LA CUBIERTA DE NAVES INDUSTRIALES EN EL ESTADO DE MICHOACÁN.

Tesis

que para obtener el título de

Ingeniero Civil

Presenta:

Juan Eduardo Martínez Alcantar.

Asesor:

Ing. Sandra Natalia Parra Macías

Uruapan, Michoacán, 22 de Marzo del 2013.

ÍNDICE



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Introducción

| | |
|--------------------------------------|---|
| Antecedentes | 1 |
| Planteamiento del problema | 3 |
| Objetivos | 4 |
| Pregunta de investigación | 5 |
| Justificación | 5 |
| Marco de referencia | 7 |

Capítulo 1.- El acero.

| | |
|---|----|
| 1.1. Concepto de acero | 8 |
| 1.2. Historia del uso del acero | 8 |
| 1.3. El acero como material estructural | 11 |
| 1.4. Diagrama esfuerzo-deformación del acero. | 12 |
| 1.5. Tipos de aceros estructurales | 19 |
| 1.6. Ventajas del uso del acero | 24 |
| 1.7. Desventajas del uso del acero | 26 |
| 1.8. Tratamientos del acero | 28 |
| 1.9. Perfiles estructurales | 31 |

Capítulo 2.- Análisis estructural.

| | |
|---|----|
| 2.1. Definición de análisis estructural y de sus diferentes componentes | 33 |
| 2.2. Apoyos | 36 |
| 2.3. Estructura y elementos estructurales. | 39 |
| 2.3.1. Vigas | 40 |
| 2.3.2. Columnas | 40 |
| 2.3.3. Cables. | 41 |

| | |
|---|----|
| 2.3.4. Armaduras | 42 |
| 2.4. Principios de análisis estructural | 44 |
| 2.5. Convención de signos. | 48 |
| 2.6. Tipos de análisis | 48 |
| 2.7. Clasificación de cargas | 49 |
| 2.8. Métodos de análisis | 55 |
| 2.8.1. Métodos de las flexibilidades | 55 |
| 2.8.2. Método de rigideces. | 59 |

Capítulo 3.- Diseño estructural

| | |
|--|----|
| 3.1. Concepto de diseño estructural | 63 |
| 3.2. Especificaciones para el diseño de elementos de acero en cubiertas de naves industriales | 63 |
| 3.3. Especificaciones para el análisis por viento. | 67 |

Capítulo 4.- Resumen ejecutivo de macro y microlocalización.

| | |
|---|----|
| 4.1. Generalidades de la República Mexicana | 73 |
| 4.2. Estado de Michoacán | 74 |
| 4.3. Clima de la zona en estudio | 76 |
| 4.4. Economía de la zona en estudio | 76 |
| 4.5. Estado físico actual | 77 |
| 4.6. Alternativa de solución | 78 |

Capítulo 5.- Metodología

| | |
|--------------------------------|----|
| 5.1. Método empleado | 79 |
|--------------------------------|----|

| | |
|--|----|
| 5.2. Enfoque de la investigación | 81 |
| 5.2.1. Alcance de la investigación | 83 |
| 5.2.2 Diseño de la investigación | 84 |
| 5.3. Instrumentos de recopilación de información | 84 |
| 5.4. Descripción del proceso de investigación | 85 |

Capítulo 6.- Cálculo, análisis e interpretación de resultados

| | |
|---|------------|
| 6.1. Análisis por viento de una cubierta a dos aguas | 87 |
| 6.1.1. Datos | 87 |
| 6.1.2. Velocidades de diseño | 88 |
| 6.1.3. Empuje estático del viento. | 88 |
| 6.1.4. Coeficientes de empuje y presiones | 89 |
| 6.1.4.1. Viento actuando normal a las generatrices | 89 |
| 6.1.4.2. Viento actuando paralelamente a las generatrices | 93 |
| 6.2. Análisis de los largueros | 96 |
| 6.3 Comparación de cargas | 106 |
| Conclusiones | 109 |
| Bibliografía | 112 |

Anexos

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Debido al desarrollo tecnológico y al uso de máquinas durante la fabricación de productos que se usan en la vida cotidiana del ser humano, se ha tenido la necesidad de crear espacios con determinados requisitos en los cuales se puedan producir cómodamente y con mayor rapidez cada uno de los bienes que se utilizan día con día, puesto que cada vez las demandas son mayores debido al incremento poblacional que se ha suscitado en los últimos 100 años.

A estos espacios se les ha asignado el nombre de naves industriales, debido a que son utilizados por las grandes fábricas, tanto para producir como para almacenar los productos, por lo que se puede decir que una nave industrial es una estructura de uso industrial en la cual se pueden desarrollar una gran cantidad de actividades económicas, aunque generalmente son diseñadas para almacenar mercancías, para producidas ahí mismo o simplemente para recolectarlas y después distribuirlas a sus destinos finales, también alberga las maquinas que generan dichos bienes, los camiones que transportaran las mercancías, etcétera.

Sin embargo, una nave industrial puede no solo utilizarse para almacenar o producir bienes, sino que también podrían utilizarse como albergue ante cualquier fenómeno natural que pueda afectar a la sociedad más vulnerable de ciertas regiones.

El uso de las naves ha ido teniendo un gran auge desde hace muchos años debido a la oferta de bienes en el mercado, ya que año con año surgen nuevos productos y nuevas tecnologías que requieren la construcción de estas fabulosas

estructuras tanto para su fabricación o su almacenamiento antes de llegar a la mano del consumidor final. Cabe mencionar que en la actualidad existen diferentes diseños de naves industriales dependiendo de la ubicación en la que se necesita o se requiera ser construida, dicho diseño depende de varios factores que se deben contemplar a la hora de realizar el diseño estructural siendo el diseño por viento el más importante o el que rige en todos los análisis.

Sin embargo, también es importante señalar que los procesos de análisis y diseño han evolucionado con el tiempo debido a que han surgido métodos desde los simples hasta los más detallados que se utilizan hasta el momento, esto se debe principalmente al uso de aparatos y equipos electrónicos los cuales facilitan la realización de los cálculos en mucho menor tiempo y con mayor precisión que si se hicieran manualmente, además es de suma importancia mencionar que existen software en los cuales los análisis pueden realizarse en 3D dando como resultado datos mucho más reales a los resultados que daría un análisis de 2D.

En la Universidad Don Vasco no se encuentran tesis relacionadas con el diseño de cubiertas, sin embargo, existen tesis que se enfocan en el análisis y diseño de estructuras de acero, como es el caso de la tesis de los actuales ingenieros civiles Sandra Natalia Parra Macías y Guillermo Navarrete Calderón la cual lleva por título el siguiente “Análisis y diseño estructural para un estadio de segunda división en la ciudad de Uruapan, Michoacán”, sin embargo en la universidad de Puebla se encuentra una tesis que tiene relación con la investigación presente, del ahora ingeniero civil Alejandro Solana Ríos, dicha tesis tiene el nombre de daños en cubiertas industriales por granizo.

Planteamiento del problema.

La presente tesis tiene como objetivo proponer un análisis y diseñar estructuralmente las cubiertas de naves industriales por granizo, siendo éste un factor de suma importancia, debido a que en ellas se almacenan una gran variedad de productos, así como de maquinarias, equipos y sobre todo vidas humanas, que de no ser correctamente diseñada pondrían estar en riesgo.

Sin embargo, cabe mencionar que hasta la fecha es común que durante el análisis y diseño de las cubiertas de las naves industriales se desprecien o simplemente no se consideren las cargas excesivas que se pudieran acumular en ésta por granizo, puesto que el granizo es la fase sólida del agua y como consecuencia impacta con mayor fuerza sobre toda superficie, además de que éste puede acumularse con mayor rapidez sobre cualquier cubierta y como resultado logra aplicar una carga excesiva sobre la estructura.

No obstante, debido a los frecuentes cambios climáticos que ha sufrido el planeta es muy importante que a partir de ahora se consideren cargas que puedan ser provocadas por el granizo, puesto que, las cargas pueden llegar a ser tan grandes que al no ser consideradas durante el diseño estructural llegue colapsar la cubierta poniendo en riesgo todos los productos y maquinas almacenadas en dicha nave, pero sobre todo se pone en riesgo las vidas humanas que estén laborando.

Otro factor importante que debe considerarse es el impacto que provoca el granizo sobre la cubierta, ya que éste puede ser de tal magnitud que podría penetrar las cubiertas y como consecuencia dañar la estructura parcial o totalmente, además dañaría los equipos e incluso lastimar a las personas y en caso extremo llegar a matarlas.

Ahora bien, con el objetivo de evitar pérdidas económicas y/o humanas en el estado de Michoacán o en cualquier lugar de la República Mexicana, es necesario comenzar a analizar las cargas excesivas que provoca el granizo en todo proyecto relacionado con naves industriales con el objetivo de construir estructuras seguras basadas en un análisis lo más real posible, para ello después de considerar todos los factores mencionados anteriormente, la cuestión es ¿Por qué considerar el peso generado por el granizo durante el análisis y diseño estructural de una nave industrial?

Objetivos.

Objetivo general:

Proponer un análisis estructural por granizo las cubiertas de las naves industriales con el fin de evitar pérdidas tanto materiales como de vidas humanas.

Objetivos particulares.

- 1.- Definir el acero estructural, sus características, sus ventajas y desventajas.
- 2.- Mencionar los perfiles ideales para la construcción de las naves industriales.
- 3.- Señalar los puntos críticos a causa del granizo en las cubiertas de naves industriales.
- 4.- Mencionar las normas de construcción que se deben cumplir al analizar y diseñar una nave industrial en el estado de Michoacán.
- 5.- Proponer las ecuaciones correspondientes al tema de investigación.
- 6.- Establecer las ventajas de diseñar por granizo

Pregunta de investigación

¿Por qué se debe analizar por granizo las cubiertas de naves industriales en el estado de Michoacán?

Justificación

En el presente trabajo se pretende concientizar a todos los ingenieros estructuristas y diseñadores de cubiertas de naves industriales la importancia de contemplar durante el análisis y diseño de éstas las cargas que pueden llegar a aplicarse sobre dicha cubierta, puesto que de no ser así las estructuras estarán expuestas a sobre cargas y por lo tanto la probabilidad de fallar o colapsarse cada vez es mayor.

La finalidad de esta propuesta de análisis es que se contemple el factor granizo en el diseño, para tener estructuras confiables y sobre todo seguras ante cualquier fenómeno meteorológico, ya que los cambios climáticos cada vez son más frecuentes e irreversibles, y es de esperarse que en lugares en los cuales no es común que granice comience a presentarse estos fenómenos.

Dicho análisis es muy importante porque con éste se asegura el bienestar tanto de la estructura misma como de los productos que se estén almacenando o produciendo dentro de cada nave industrial, también cabe mencionar que se aseguraran las vidas humanas que se encuentren laborando ahí mismo.

De esta tesis se beneficiarán principalmente todos aquellos propietarios de las industrias, debido a que tendrán la seguridad de que su nave está protegida debidamente ante cualquier fenómeno que pueda suscitarse. También se beneficiaran todos aquellos estudiantes que deseen consultar temas relacionados

con análisis y diseño estructural de naves industriales. Además de que la Universidad Don Vasco se verá beneficiada debido a que habrá una investigación en esta rama de la ingeniería civil de manera favorable. Por último, se beneficiara al autor de ésta investigación debido a que ampliara su conocimiento dentro del área de las estructuras.

Marco de referencia

La zona en estudio es en el estado de Michoacán el cual se encuentra en la zona centro - oeste de la República Mexicana, entre las coordenadas 20°23'27" y 17°53'50" de la latitud norte y entre 100°03'32" y 103°44'49" la longitud oeste del meridiano de Greenwich, su superficie es de 58,836.95 kilómetros cuadrados.

En este estado se tiene una precipitación media anual de 806 mm, con temperaturas de 22 °C en promedio, con temperaturas mínimas de 14.7 °C, predominando los climas Templados con lluvias en verano, el semicálido con lluvias en verano el semiseco muy cálido entre otros.

La agricultura es la actividad más importante del sector agropecuario, destacan los cultivos de maíz, trigo, frijol, alfalfa, jitomate, hortalizas y la fruticultura, sobresaliendo la producción de: aguacate, guayaba, manzana, pera, plátano, mamey, chabacano, ciruela, limón, naranja, tamarindo, toronja y tuna, sin embargo, la población se ocupa mayoritariamente en el sector terciario (comercio y servicios), con 62.7% del total en 2005, seguido del sector secundario con el 24.56%

La flora existente en el estado es abundante y muy variada, destacan las especies forestales de aile, álamo, encino, fresno, madroño, ocote, oyamel, pino, sauz y tepozán. De entre las especies forestales, destaca el pino y el oyamel que pueblan una superficie no determinada, pero importante, por ser santuario o refugio de la Mariposa Monarca, durante los meses de octubre a marzo.

CAPÍTULO 1

EL ACERO.

En el presente capítulo se da a conocer el concepto y la historia del uso del acero, así como su definición; de igual manera se hablará del acero como material estructural, además se mostrará el diagrama esfuerzo-deformación del mismo, no obstante, se mencionarán las ventajas y desventajas del acero, así como los tipos de acero y tipos de perfiles más utilizados en el diseño estructural.

1.1. Concepto de acero.

Acero es la denominación que comúnmente se le da en ingeniería metalúrgica a una aleación de hierro con una cantidad de carbono variable entre el 0,03% y el 1,76% en peso de su composición, dependiendo del grado.

1.2. Historia del uso del acero.

De acuerdo con McCormac (1999) se dice que el primer metal que fue utilizado por el ser humano fue una aleación de cobre, al igual que el bronce que se elabora a base de algunos metales como son: el cobre, el estaño y otros aditivos, no obstante, han existido avances significativos en el desarrollo del metal, éstos se deben a la fabricación del hierro y el acero, puesto que actualmente éstos últimos comprenden casi el 95% en peso de todos los metales que se producen a nivel mundial.

Cabe señalar que durante muchas décadas los antropólogos no han logrado establecer cuándo fue la primera vez que se utilizó el hierro, sin embargo, se

encontró en la Gran Pirámide de Egipto un brazalete y una daga de hierro en los cuales se estableció que la edad de éstos radica en por lo menos 5000 años. El uso del hierro ha tenido un avance significativo en la civilización desde hace miles de años y probablemente la seguirá teniendo en los próximos siglos.

El autor antes mencionado señala que según la teoría clásica acerca de la primera producción de hierro en el mundo, se remonta en la antigua Troya (actualmente Turquía) en el Monte Ida, el cual supuestamente era muy rico en fierro y debido a un incendio forestal el fuego y el calor se produjo una forma primitiva de hierro a la que al golpearla se le lograba dar diversas formas; aunque gran cantidad de historiadores creen que el ser humano aprendió a utilizar primero el hierro que cayó a la Tierra en forma de meteoritos, puesto que, comúnmente el hierro de los meteoritos se encuentra combinado con níquel, lo que resulta un metal mucho más duro que posiblemente los primeros pobladores del planeta utilizaron para fabricar armas y herramientas primitivas.

El acero se define como la combinación entre hierro y pequeñas cantidades de carbono que por lo general equivalentes a menos del 1%, sin embargo, también suele contener pequeños porcentajes de otros elementos para sus diferentes usos. No obstante, aunque el acero se ha fabricado desde hace aproximadamente 3000 años no existió un método de producción que fuese económico sino hasta la mitad del siglo XIX.

Además, se dice que el primer acero se logró cuando se calentaba el hierro y accidentalmente en él se encontraban los otros elementos, de igual manera con el transcurso del tiempo el acero se fabricó al calentar el hierro en presencia de carbón vegetal, por lo que el hierro absorbió el carbono del carbón vegetal que después se

martilló y al repetirse varias veces este proceso se obtuvo una capa exterior sumamente dura de acero, de esta manera se logró elaborar las espadas de Toledo y Damasco.

El mismo McCormac (1999) menciona que al primer proceso que se realizó para producir grandes volúmenes de acero se le asignó el nombre de Sir Henry Bessemer de Inglaterra, debido a que se patentó su proceso en 1855, sin embargo los esfuerzos para lograr la patente en los Estados Unidos fue un rotundo fracaso, puesto que se comprobó que William Kelly de Eddyville ya había producido acero durante siete años con el mismo procedimiento que Bessemer, no obstante, Kelly recibió la patente, pero se usó el nombre Bessemer para el proceso.

Kelly y Bessemer descubrieron que al pasar un chorro de aire a través del hierro fundido se quemaba la mayor parte de las impurezas que éste contenía, pero que desafortunadamente también se eliminaban algunos de los elementos esenciales como el carbono y el manganeso. Después se descubrió que esos elementos podrían ser agregados posteriormente con hierro especular, que es la aleación de hierro, carbono y manganeso, además también se descubrió que podría eliminarse el fósforo y la mayor parte del azufre.

El convertidor Bessemer se usó en Estados Unidos a principios del siglo XX, pero a partir de ese momento se ha remplazado con métodos cada vez mejores como son el proceso de hogar abierto y el de oxígeno básico. Pero gracias al proceso Bessemer en el año de 1870 ya se lograba producir grandes cantidades de acero estructural al carbono y cerca de 1890 el acero era el principal metal utilizado en las estructuras de los Estados Unidos.

El primer uso que se le dio al metal en una estructura fue en Shropshire, Inglaterra en 1779, donde se construyó el puente Coalbrookdale con hierro fundido, éste fue construido en arco y cuenta con 100 pies de claro sobre el río Severn, además se dice que este puente fue una parte crítica para la historia de Inglaterra debido a que cambió el curso de la Revolución Industrial al emplear un hierro que era cuatro veces más fuerte que la piedra y treinta veces más que la madera, como un material estructural.

McCormac (1999), también menciona que se construyeron una gran cantidad de puentes de hierro fundido en décadas pasadas, aunque después de 1840 el hierro dulce, por ser más maleable, comenzó a reemplazar al hierro fundido. Y el desarrollo del proceso Bessemer y sus avances, como lo son el proceso de hogar abierto han permitido la elaboración de aceros económicos, lo que ha estimulado un desarrollo increíble que ha tenido gran auge en los últimos 100 años del acero estructural.

1.3. El acero como material estructural.

Según Joseph (1989), el acero es uno de los materiales estructurales más importantes en la construcción debido a sus propiedades muy particulares en las cuales destaca su alta resistencia comparada con cualquier otro material y la ductilidad que éste posee. Por lo general la ductilidad se define como la capacidad que posee un material para deformarse sustancialmente ya sea a compresión o a tensión antes de que recurra a la falla, también cabe señalar otras ventajas que se consideran de suma importancia sobre el uso del acero, que por su puesto son: su gran disponibilidad en cualquier momento que se requiera y sobre todo su durabilidad con su debido tratamiento contra la intemperie.

El acero se elabora mediante la refinación de su mineral principal que es el hierro y los metales de desecho junto con otros agentes fundentes, como el coque (para el carbono) y el oxígeno en unos hornos a muy altas temperaturas con el fin de producir grandes volúmenes de hierro a los cuales se les denomina arrabio de primera fusión; el arrabio también se refina para remover el exceso de carbono y otras impurezas que pudiera contener y/o se alea con otros metales como el cobre, níquel, manganeso, cromo, molibdeno, titanio, azufre, sílice, colombio y vanadio, para lograr las características deseadas tanto de resistencia como de ductilidad, soldadura y resistencia a la corrosión.

De acuerdo al mismo Joseph (1989), los lingotes de acero que se obtienen durante dicho proceso pasan entre dos rodillos que giran a la misma velocidad pero en direcciones opuestas, esto para obtener un producto semiterminado, largo y de forma rectangular al cual se le dio el nombre de plancha o lingote dependiendo de su sección transversal, después el producto se envía a otros molinos laminadores, los cuales producen el perfil geométrico final de la sección, esto incluye perfiles estructurales, así como placas, tubos, barras, etc., también cabe señalar que el proceso de laminado no solo es útil para la elaboración de los perfiles, sino, también tiende a mejorar las propiedades de los materiales como son la tenacidad, resistencia y maleabilidad, finalmente de los molinos laminadores los perfiles se transportan a los fabricantes de acero o a los almacenes según sea el caso.

1.4. Diagrama esfuerzo-deformación del acero

McCormac (1999) menciona que todo proyectista debe conocer con exactitud las propiedades del acero para lograr entender cómo será el comportamiento de las

estructuras construidas con éste material, al respecto de esto existe el diagrama esfuerzo-deformación en el cual se muestra la información necesaria para comprender cuál será el comportamiento del acero ante diferentes situaciones; además al respecto del diagrama esfuerzo-deformación se dice que no podrían desarrollarse métodos que sean lo suficientemente satisfactorios para el diseño estructural a menos que se disponga de la información completa relacionada con dicho diagrama de los materiales que se utilizan.

De igual manera se dice que “si una pieza de acero estructural dulce se somete a una fuerza de tensión, ésta comenzará a alargarse. Si se incrementa la fuerza a razón constante, la magnitud del alargamiento aumentará constantemente dentro de ciertos límites. En otras palabras, el alargamiento se duplicará cuando el esfuerzo pase de 6000 a 12000 lb/plg². Cuando el esfuerzo de tensión alcance un valor aproximadamente igual a un medio de la resistencia última del acero, el alargamiento comenzará a aumentar más rápidamente sin un incremento correspondiente del esfuerzo.” (McCormac; 1999: 11)

De acuerdo al esfuerzo para el que aún es válida la Ley de Hooke o el punto más alto de la recta del diagrama esfuerzo-deformación se le denomina límite proporcional; además se le asignó el nombre de límite elástico al esfuerzo máximo que resiste un material sin deformarse de manera permanente, es decir, es el esfuerzo al que puede ser sometido cualquier material pero que al dejar de aplicarlo el material es capaz de regresar a su estado original, el límite elástico en muy pocas ocasiones es medido puesto que, para la mayoría de los materiales estructurales es sinónimo del límite proporcional, debido a este motivo en general se utiliza el término de límite proporcional elástico.

Se le denomina esfuerzo de fluencia al esfuerzo al que se somete un material y en éste se presenta una deformación o alargamiento demasiado brusco sin que se le aplique un incremento de esfuerzo proporcional, es decir, es el punto para cual la curva del diagrama esfuerzo-deformación su tangente es totalmente horizontal, debido a lo antes mencionado, el esfuerzo de fluencia es la propiedad más importante del acero que debe conocer todo proyectista, puesto que, la mayoría de los métodos de diseño estructural están basados en dicho valor.

El mismo McCormac (1999) menciona que existe un intervalo en el cual hay un incremento considerable en la deformación del acero sin que exista un incremento brusco del esfuerzo aplicado, por otra parte, la deformación que sufre el acero antes de llegar al esfuerzo de fluencia se le denomina deformación elástica y a la deformación que se presenta después del esfuerzo de fluencia sin que se incrementen los esfuerzos se le llama deformación plástica además se dice que esta deformación por lo general es de 10 a 15 veces la deformación elástica.

Una característica muy importante de la fluencia del acero es que podría parecer una gran desventaja, sin embargo es una de las características más útiles debido a que frecuentemente ha prevenido que una estructura llegue a su falla debida a errores y omisiones del proyectista. Por otra parte cuando se aplica un esfuerzo sobre un punto de una estructura de acero dúctil y ésta alcanza su esfuerzo de fluencia, ese punto fluirá localmente sin un incremento de esfuerzo lo que podrá impedir una falla prematura.

Existe también una zona llamada endurecimiento por deformación la cual comienza inmediatamente después de la región plástica, en la que se requiere aplicar esfuerzos adicionales para lograr deformaciones mayores, no obstante, esta

parte de la curva esfuerzo-deformación es muy poco importante para los actuales proyectistas.

Por otra parte en el diagrama típico de un acero estructural de bajo contenido de carbono solo se muestra la parte inicial de la curva debido a la gran deformación que sufre antes de que ocurra la falla, puesto que el punto de falla de estos aceros soporta deformaciones unitarias las cuales oscilan entre 150 y 200 veces los valores correspondientes a la deformación elástica.

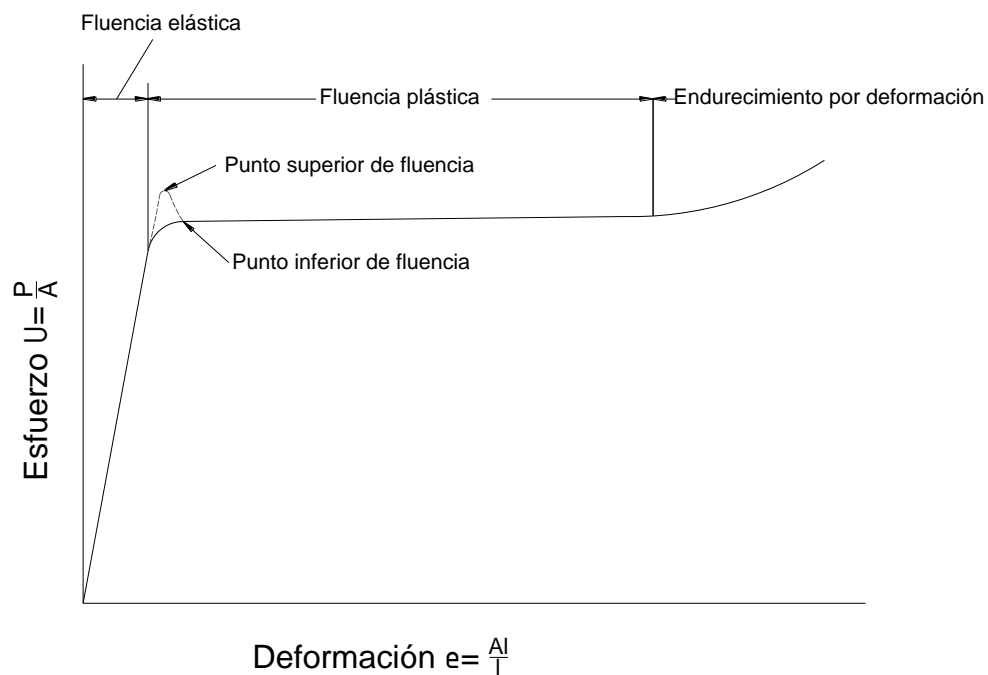


Figura 1. 1 Diagrama esfuerzo deformación de un acero estructural con bajo contenido de carbono.
(Fuente: McCormac; 1999:12)

De acuerdo a McCormac, la curva esfuerzo de formación de la figura 1.1 es la más común del acero estructural con bajo contenido de carbono o comúnmente llamados aceros dúctiles y se supone que su deformación es idéntica para miembros

tanto a tensión como a compresión, sin embargo los miembros que trabajan a compresión deben ser de una sección transversal más grande ya que los miembros demasiado esbeltos expuestos a fuerzas de compresión tienden a presentar flexión lateral o dicho en otras palabras pandeo y sus propiedades son afectadas a causa del momentos que se genera.

Así mismo, se dice que la forma del diagrama antes presentado varía de acuerdo a la velocidad con que se aplique la carga, el tipo de acero que se esté utilizando y la temperatura; por ejemplo en la figura 1.1 se presenta esta variación, la línea que se denominó como fluencia superior se genera cuando este tipo de acero se carga de manera rápida, mientras que la línea de fluencia inferior se presenta al aplicar una carga lentamente.

El autor antes mencionado señala que la propiedad más importante de las estructuras que no se les aplica un esfuerzo mayor al de su punto de fluencia es que los elementos logran recuperar su longitud original al momento de quitar las cargas que se están aplicando, mientras que, por el contrario si a la estructura se le aplica un esfuerzo más allá del punto de fluencia sólo se recuperará parte de su longitud inicial, por lo tanto, esta propiedad permite la posibilidad de probar un elemento existente cargándolo y descargándolo, que si al retirarle las cargas no recupera sus dimensiones iniciales significará que el esfuerzo aplicado es mayor que el punto de fluencia del acero utilizado para ese elemento.

Como ya se mencionó anteriormente en el subcapítulo 1.1 el acero es una aleación en la cual está presenta más del 98% de hierro y pequeñas cantidades de carbono, manganeso, azufre, silicio, fósforo, y algunos otros elementos, siendo el carbono quien tiene la mayor influencia para determinar las propiedades del acero,

puesto que, la resistencia y dureza de mismo aumentan con el porcentaje de carbono que se suministre, sin embargo al aumentar el porcentaje de carbono se tiene la desventaja de que resulta un acero bastante frágil y su soldabilidad también se ve afectada.

El mismo McCormac (1999) menciona que la baja ductilidad o fragilidad es una de las propiedades asociadas con la alta resistencia de los aceros con altos contenidos de carbono, sin embargo, lo más conveniente de un acero es que éste tenga tanto alta resistencia como gran ductilidad, debido a que, un acero frágil falla de manera repentina, es decir, falla sin avisar o sin deformarse al aplicarle un esfuerzo mayor al que resiste, o de igual manera podría fallar al tratar de montarse debido a los impactos que se presentan durante la construcción.

No obstante, al mezclarse el hierro con pequeñas cantidades de carbono resulta un acero más suave y dúctil, pero como consecuencia se obtiene un acero de menor resistencia, por otra parte, la adición de algunos elementos como el cromo, el silicio, y el níquel resulta un acero con resistencias más altas, pero desafortunadamente son aceros muy caros y difíciles de fabricar.

Como ya se mencionó anteriormente las propiedades del acero pueden cambiar en gran medida al variar las cantidades de los elementos adicionales al hierro aunque las cantidades de dichos elementos son muy pequeñas tienen un gran efecto en las propiedades finales del acero, siendo que el contenido de carbono presente en un acero casi siempre es menor que el 0.5% en peso y que por lo general el porcentaje radica entre 0.2 y 0.3%.

A continuación se muestra el diagrama esfuerzo-deformación de un acero frágil.

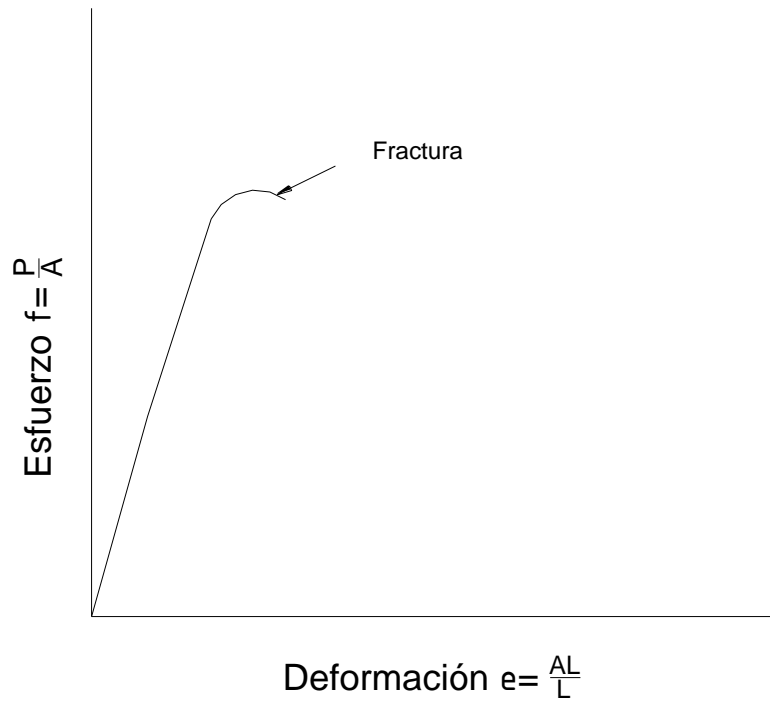


Figura 1. 2 Diagrama esfuerzo deformación de un acero frágil.
(Fuente: McCormac; 1999:14)

Por otra parte la composición química del acero es muy importante debido a que sus efectos se ven reflejados en las propiedades del acero tal como la resistencia a la corrosión, la soldabilidad, la resistencia a la fractura, entre otros; de igual manera el fósforo y el azufre que se encuentran presentes en el acero incrementan la resistencia y al mismo tiempo reducen la ductilidad.

Así mismo McCormac (1999) señala que la ASTM ha especificado los porcentajes exactos de carbono, manganeso, silicio, etcétera, que se permiten en los

aceros estructurales, aunque en cierta manera las propiedades físicas y mecánicas de los perfiles de acero las determina la composición química, sin embargo hasta cierto punto el proceso de laminado y el tratamiento térmico que se le aplica al acero influyen en dichas propiedades.

Por otra parte se dice que cerca del 50% del acero estructural que se ha usado en los Estados Unidos de América es el acero denominado por la ASTM como A36, sin embargo, existen otros aceros los cuales su demanda se ha ido incrementando, tal es el caso del acero A572 que se está utilizando al mismo ritmo que se usa el A36, la diferencia radica en que éste es más resistente.

1.5. Tipos de aceros estructurales

McCormac (1999) señala que los aceros estructurales están agrupados según a las clasificaciones de la ASTM las cuales son:

➤ Los aceros estructurales de carbono:

En estos aceros la dosificación debe ser muy cuidadosa tanto de carbono como manganeso, ya que éstos son los principales elementos que le dan la resistencia a este tipo de acero, puesto que los elementos están con las cantidades máximas siguientes: 1.7% de carbono, 1.65% de manganeso, 0.6% de silicio y 0.6% de cobre, que a su vez los aceros se dividen en 4 categorías de acuerdo al porcentaje de carbono que contiene, como se indica a continuación:

1. Acero de bajo contenido de carbono, menor al 0.15%
2. Acero dulce al carbono, entre 0.15 y 0.29%
3. Acero medio al carbono, entre 0.30 y 0.59%
4. Acero con alto contenido de carbono, entre 0.6 y 1.70%

➤ Aceros de alta resistencia y baja aleación

Según al autor antes mencionado, existe una gran cantidad de aceros de este tipo los cuales están clasificados por la ASTM, debido a que estos aceros obtienen su alta resistencia (aparte del carbono y del manganeso) debido a la adición de uno o varios de los siguientes elementos: columbio, vanadio, cromo, silicio, cobre, níquel u otros, así mismo se obtiene un acero con un límite de fluencia el cual radica entre 40,000 y 70,000 lb/plg². Debido a lo anterior “estos aceros son mucho más resistentes a la corrosión que los aceros al carbono” (McCormac; 1999:18).

➤ Aceros estructurales de alta resistencia, baja aleación y resistentes a la corrosión

Los aceros se vuelven más resistentes a la corrosión cuando durante su elaboración se alean con porcentajes muy pequeños de cobre, gracias a esto cuando se ponen en contacto con el medio ambiente las superficies del acero se forma una capa impermeable que se adhiere e impide una mayor oxidación sin la necesidad de pintar la superficie; después de ocurrir lo anterior, en un tiempo estimado que va de 18 meses a tres años el acero adquiere un color entre rojo oscuro, café o negro.

De acuerdo con la historia se dice que este tipo de aceros lo desarrolló la U.S. Steel Corporation en el año de 1933 con la finalidad de mejorar la resistencia de los ferrocarriles que transportaban carbón en los cuales era muy común la corrosión, este tipo de acero tiene un gran auge en las estructuras expuestas a la intemperie o en elementos que son muy difíciles de recubrir con pintura como lo son los puentes, las torres de transmisión, entre otros.

Una de las desventajas que menciona McCormac (1999) de este tipo de acero es que no se recomienda su uso en lugares donde este en contacto con la brisa del mar, niebla o con humos industriales que contengan partículas corrosivas, además tampoco son adecuados para utilizarse en estructuras sumergidas tanto en agua dulce como en agua salada ni tampoco en zonas secas, sin embargo para que se logre formar la capa impermeable que se adhiere es necesario que el acero este expuesto a ciclos de humedad y resequedad, de lo contrario siempre tendrá la apariencia de acero sin pintar.

➤ Aceros templados y revenidos.

Este tipo de acero presenta un exceso de adición de aleantes comparado con las cantidades que se usan en los aceros al carbono, por lo que su tratamiento es térmico para darles su dureza su límite de fluencia está comprendida entre 80,000 y 110,000 lb/plg²., y para lograr lo anterior el acero debe ser revenido y enfriado rápidamente con agua o aceite, logrando así la disminución de temperatura de aproximadamente 1650°F a 300 o 400°F, después este acero se vuelve a calentar hasta llegar a una temperatura de 1150°F para posteriormente dejarlo enfriar.

Sin embargo un dato muy importante de los aceros templados y revenidos es que éstos no muestran los límites de fluencia bien definidos como lo hacen los aceros al carbono, por lo que su resistencia a la fluencia está dada en función del esfuerzo asociado a una deformación del 0.2%, es decir “se traza una línea paralela a la porción recta del diagrama esfuerzo-deformación a partir de una deformación igual a 0.002 hasta que interseca la curva del diagrama. El esfuerzo en el punto de intersección se define entonces como el punto de fluencia.” (McCormac; 1999: 18)

➤ Aceros de alta resistencia.

En la actualidad existen en el mercado más de 200 aceros con esfuerzos de fluencia mayores a 36,000 lb/plg²., aunque la industria del acero ha experimentado con aceros de ultra resistencia los cuales alcanzan esfuerzos de fluencia que van desde 200,000 hasta 300,000 lb/plg²., sin embargo algunas personas de estas industrias afirman que en unos años se lograrán elaborar aceros con esfuerzos de fluencia de 500,000 lb/plg². No obstante, McCormac afirma que de acuerdo al Structural Steel Design (Diseño de estructuras de acero) la fuerza de unión de los átomos de hierro teóricamente es de 4'000,000 lb/plg².

En cuanto a los precios el mismo autor indica que éstos aumentan con el esfuerzo de fluencia, además menciona que el porcentaje de incremento de los precios no es proporcional al incremento en los esfuerzos de fluencia y consecuentemente el uso de este tipo de aceros en elementos sujetos a tensión, columnas y vigas resultará muy económico, aunque la mayor economía se logrará usándolo en los elementos sujetos a tensión.

Además se dice que los factores que pueden llevar a utilizar aceros de alta resistencia son los siguientes:

1. Su alta resistencia a la corrosión.
2. La posibilidad de ahorrar costos en el montaje de los elementos, el transporte y la cimentación gracias a su reducido peso.
3. El uso de vigas menos peraltadas.
4. La posibilidad de ahorrar en proteger los elementos contra el fuego debido a que pueden utilizarse perfiles de menor sección transversal.

Una de las primeras consideraciones que hacen la mayoría de los ingenieros al elegir el acero es el costo directo o inicial de los perfiles a utilizarse, aunque puede hacerse una comparación al elegir el tipo de acero, en la cual se esté involucrando tanto el costo inicial del acero como otros factores como el peso, el tamaño de los elementos, las deflexiones, el mantenimiento y la fabricación.

En la siguiente figura se mostrarán los diagramas esfuerzo-deformación de los aceros:

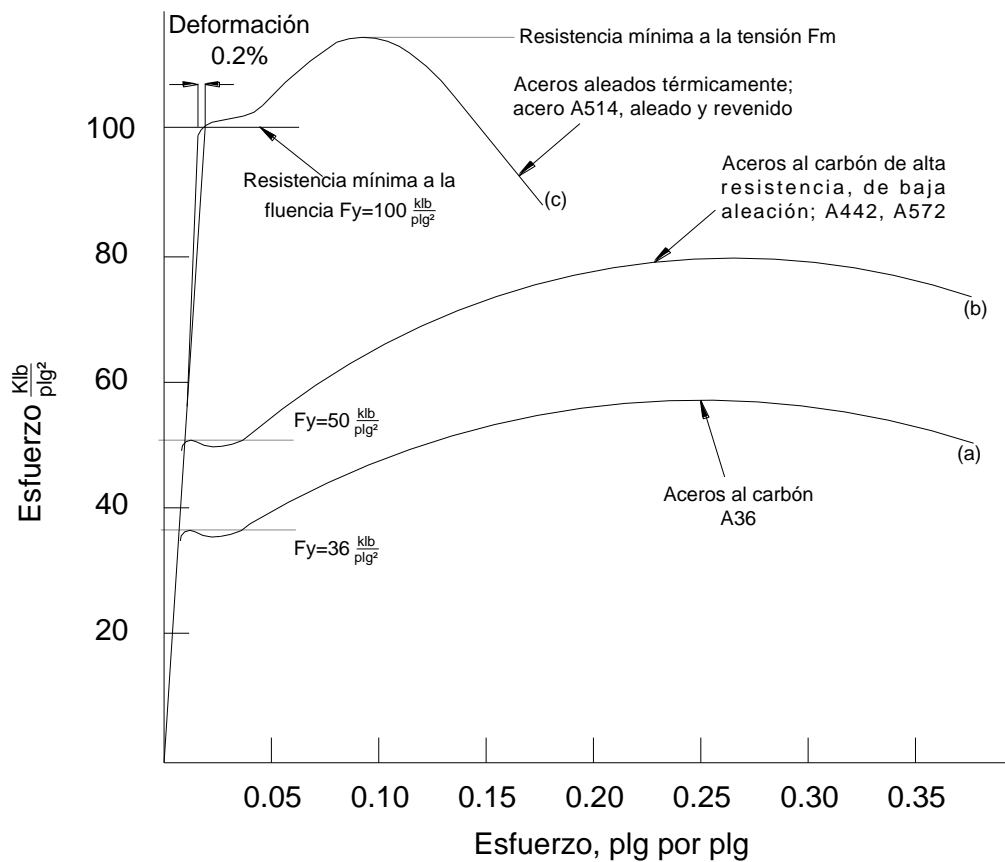


Figura 1. 3 Curvas esfuerzo deformación
(Fuente: McCormac; 1999:19)

1.6. Ventajas del uso del acero

McCormac (1999) menciona que debido a la supuesta perfección del acero, éste sea el material más versátil de todos los materiales estructurales, pues al respecto parece ser el material más razonable cuando se calcula su gran resistencia, su poco peso, su facilidad de fabricación entre otras ventajas del uso del acero como material estructural, las cuales a continuación se mencionan:

- Alta resistencia.

Esta propiedad del acero hace que los elementos sean de mucho menor dimensión, lo que se refleja en el poco peso que tendrán las estructuras, puesto que es se necesita menor cimentación, además es de suma importancia en puentes que cuentan con grandes claros, edificios muy alto, en estructuras con cimentaciones en malas condiciones, entre otros.

- Elasticidad.

Es esta otra de las ventajas del acero debido a que su comportamiento sigue la ley Hooke hasta tomar valores de esfuerzos relativamente altos, pero además pueden calcularse con exactitud los momentos de inercia de una estructura de acero mientras que los valores que se obtienen para una estructura de concreto armado son demasiado imprecisos.

- Ductilidad.

Es la particularidad que tiene este material para soportar grandes deformaciones antes de fallar ante esfuerzos de tensión. Un ejemplo es cuando se

somete a una prueba de tensión un acero con bajo contenido de carbono, pues su sección transversal se ve reducida considerablemente y se puede observar un gran alargamiento antes de que llegue a su falla, sin embargo, cuando un material no presente esta propiedad seguramente será duro y por lo tanto frágil y se romperá al ocasionarle un golpe repentino. Así mismo, la misma naturaleza dúctil del acero estructural le permite a los elementos fluir localmente en los puntos donde se estén aplicando esfuerzos normales en varios puntos evitando entonces que los elementos tengan fallas prematuras, entonces se puede decir que las estructuras dúctiles al sobrecargarse sufre grandes deflexiones que permiten ver a simple vista que el elemento está llegando a su falla.

➤ Tenacidad.

Se dice que cuando un acero estructural es tenaz cuando posee resistencia y ductilidad al mismo tiempo, es decir, “es la propiedad del material para absorber la energía en grandes cantidades” (McCormac; 1999: 2), además cuando a un elemento de acero se le aplican cargas hasta que llegue a sufrir grandes deformaciones y que aún es capaz de resistir más esfuerzos, esta es una característica muy importante debido a que todos los miembros de acero pueden ser sometidos a grandes deformaciones durante su elaboración o montaje sin que lleguen a fracturarse, puesto que se permite la posibilidad de doblarlos, martillarlos, cortarlos o taladrarlos sin que presente daños.

➤ Propiedades diversas.

Otras de las ventajas que tiene el uso del acero estructural son las siguientes:

- a) La gran facilidad que existe para unir varios elementos a través de diferentes tipos de conectores como la soldadura, los remaches y los tornillos.
- b) La posibilidad de prefabricar los miembros con características muy particulares.
- c) La rapidez que se tiene para montar cada uno de los elementos.
- d) La gran capacidad que tiene para laminarse.
- e) La resistencia que tiene a la fatiga.
- f) El reuso que se le puede dar después de haber montado la estructura.
- g) Y la ventaja de poder venderlo como chatarra.

1.7. Desventajas del acero

De acuerdo con McCormac (1999), así como existen ventajas del acero existen desventajas tales como las que se muestran a continuación:

- Costo de mantenimiento.

Como ya se ha mencionado la mayoría de los aceros están expuestos a presentar corrosión al ponerse en contacto con el agua y el aire, por lo que es necesario aplicarles periódicamente una capa de pintura con la finalidad de preservar sus características iniciales lo que genera un costo de mantenimiento relativamente caro y en ocasiones difícil.

➤ Costo de protección contra el fuego.

Este es uno de las características principales de la desventaja del acero debido a que su resistencia se ve afectada severamente al estar en contacto con el fuego. Otra característica del acero es que es un buen transmisor del calor de manera que los elementos que no son protegidos contra el fuego tienden a transmitirse el calor de un miembro a otro, en consecuencia a lo anterior el acero debe recubrirse con materiales con características aislantes lo que resultara una inversión sumamente costosa.

➤ Susceptibilidad al pandeo.

El autor mencionado anteriormente indica que el pandeo es más peligroso entre más largos y esbeltos sean los miembros expuestos a la compresión, de igual manera al usarse columnas no resulta económico debido a que se necesita una sección transversal más robusta para evitar que ocurra el pandeo, esto trae como consecuencia que los elementos se elaboren con bastante material lo que implica un costo adicional.

➤ Fatiga.

Este tipo de falla se presenta cuando el acero se somete a un gran número de cambios de esfuerzos de tensión, en consecuencia esto reduce radicalmente la resistencia de los miembros, por lo que actualmente se reduce la resistencia estimada del acero al saber que los elementos estarán sometidos a un cierto número de ciclos de esfuerzos variables durante su vida útil o construcción.

1.8. Tratamientos del acero

Los tratamientos que se le pueden aplicar al acero de acuerdo a la página de internet www.Wikipedia.org (2012) son los que se mencionan a continuación:

a) Tratamientos superficiales

Como es muy común que el acero logre oxidarse con mucha facilidad al estar en contacto con el aire y el agua, es necesario que se proteja de la corrosión y oxidación de la superficie de todo acero, así mismo existe un gran número de tratamientos superficiales los cuales se relacionan con darles un aspecto estético o simplemente decorativos para las piezas de acero.

Ahora bien, los tratamientos superficiales más comunes son los siguientes:

- Cincado: es un método en el cual a la superficie se le da un tratamiento antioxidante por medio de procesos electrolíticos o mecánicos.
- Cromado: este consiste en recubrir la superficie con la finalidad de proteger el acero de la oxidación y embellecerlo.
- Galvanizado: también es un tratamiento superficial que se da a la chapa de acero.
- Niquelado: este tipo de proceso consiste en bañar el acero con níquel con el fin de protegerlo de la oxidación.
- Pavonado: es un tratamiento superficial que se da a piezas pequeñas de acero, como la tornillería.
- Pintura: comúnmente este método es usado especialmente en estructuras, automóviles, barcos, entre otros.

b) Tratamientos térmicos

Los procesos basados en los tratamientos térmicos adecuados permiten que el acero logre aumentar considerablemente sus propiedades mecánicas como su dureza, su tenacidad y su resistencia, debido a que este tipo de tratamientos cambian la microestructura y por consiguiente sus propiedades macroscópicas igualmente son alteradas.

Sin embargo, existen tratamientos térmicos que pueden ser aplicados al acero sin que cambien su composición química como por ejemplo:

- Temple
- Revenido
- Recocido
- Normalizado

Los tratamientos termoquímicos son tratamientos térmicos en los que, además de los cambios en la estructura del acero, también se producen cambios en la composición química de la capa superficial, añadiendo diferentes productos químicos hasta una profundidad determinada. Estos tratamientos requieren el uso de calentamiento y enfriamiento controlados en atmósferas especiales. Entre los objetivos más comunes de estos tratamientos está aumentar la dureza superficial de las piezas dejando el núcleo más blando y tenaz, disminuir el rozamiento aumentando el poder lubricante, aumentar la resistencia al desgaste, aumentar la resistencia a fatiga o aumentar la resistencia a la corrosión.

➤ Cementación (C): aumenta la dureza superficial de una pieza de acero dulce, aumentando la concentración de carbono en la superficie. Se consigue teniendo en cuenta el medio o atmósfera que envuelve el metal durante el calentamiento y

enfriamiento. El tratamiento logra aumentar el contenido de carbono de la zona periférica, obteniéndose después, por medio de temple y revenidos, una gran dureza superficial, resistencia al desgaste y buena tenacidad en el núcleo.

➤ Nitruración (N): al igual que la cementación, aumenta la dureza superficial, aunque lo hace en mayor medida, incorporando nitrógeno en la composición de la superficie de la pieza. Se logra calentando el acero a temperaturas comprendidas entre 400 y 525 °C, dentro de una corriente de gas amoníaco, más nitrógeno.

➤ Cianuración (C+N): endurecimiento superficial de pequeñas piezas de acero. Se utilizan baños con cianuro, carbonato y cianato sódico. Se aplican temperaturas entre 760 y 950 °C.

➤ Carbonitruración (C+N): al igual que la cianuración, introduce carbono y nitrógeno en una capa superficial, pero con hidrocarburos como metano, etano o propano; amoníaco (NH₃) y monóxido de carbono (CO). En el proceso se requieren temperaturas de 650 a 850 °C y es necesario realizar un temple y un revenido posterior.

➤ Sulfinización (S+N+C): aumenta la resistencia al desgaste por acción del azufre. El azufre se incorporó al metal por calentamiento a baja temperatura (565 °C) en un baño de sales.

Entre los factores que afectan a los procesos de tratamiento térmico del acero se encuentran la temperatura y el tiempo durante el que se expone a dichas condiciones al material. Otro factor determinante es la forma en la que el acero vuelve a la temperatura ambiente. El enfriamiento del proceso puede incluir su inmersión en aceite o el uso del aire como refrigerante.

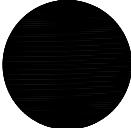
El método del tratamiento térmico, incluyendo su enfriamiento, influye en que el acero tome sus propiedades comerciales.

Según ese método, en algunos sistemas de clasificación, se le asigna un prefijo indicativo del tipo. Por ejemplo, el acero O-1, o A2, A6 (o S7) donde la letra "O" es indicativo del uso de aceite (del inglés: oil quenched), y "A" es la inicial de aire; el prefijo "S" es indicativo que el acero ha sido tratado y considerado resistente al golpeo (Shock resistant).

1.9. Perfiles estructurales.

De acuerdo con Camba y colaboradores (1990) existe una gran variedad de perfiles estructurales, sin embargo no todos son necesarios para la construcción de naves industriales, pues esto depende más que nada del diseño que se le quiera dar a la cubierta, sin descartar la seguridad y economía de la misma.

Ahora bien, los perfiles estructurales suelen ser de diferentes tipos de acero, según se requiera en la construcción, pues como ya se mencionó anteriormente hay aceros con límites de fluencia variables unos de otros de acuerdo a la necesidad que se tenga, por lo que el autor antes mencionado establece que los perfiles ideales para una cubierta de nave industrial se muestran en la tabla 1.1 la cual se muestra en seguida:

| Perfil | Imagen |
|---------|---|
| Redondo |  |

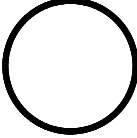



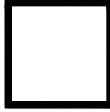
| | |
|---|--|
| <p style="text-align: center;">Tubos (PTC-Perfil Tubular Circular)</p> |  |
| <p style="text-align: center;">Ángulos (APS- Ángulo Perfil Standard)</p> |  |
| <p style="text-align: center;">Canales (CPS-Canal Perfil Standard)</p> |  |
| <p style="text-align: center;">Monten (CPL2- Canal Perfil Ligero Dos Patines Atiesados)</p> |  |
| <p style="text-align: center;">PTR (Perfil Tubular Rectangular)</p> |  |

Tabla 1.1 Perfiles más utilizados en las cubiertas de naves industriales.

(Fuente: Propia)

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

En éste capítulo se menciona la definición de análisis estructural, además de los conceptos más utilizados durante el análisis y diseño estructural como son fuerza, esfuerzos y tipos de esfuerzos, elementos estructurales como vigas, columnas, marcos, armaduras, entre otros, también se define el estado de reposo o también llamado estado de equilibrio, la convención de signos utilizados en el análisis estructural, así como la clasificación de las cargas actuantes sobre una estructura y los métodos de análisis más utilizados como son el de las flexibilidades y las rigideces.

2.1. Definición de análisis estructural y de sus diferentes componentes.

De acuerdo con Camba y colaboradores (1982) se establece que el análisis estructural es el proceso que consiste en realizar una serie de procedimientos matemáticos con el objetivo de determinar la respuesta interna de una estructura debida a fuerzas externas y así conocer las deflexiones que ésta presentará en cualquier punto.

Por otra parte, en el análisis estructural existen diferentes tipos de elementos y propiedades tanto geométricas como mecánicas que se definirán a continuación de acuerdo a Leet (2006), McCormac (1983) y a la página de internet www.wikipedia.org (2012):

- a) Fuerza: es toda acción que ejerce un cuerpo sobre otro alterando su estado de equilibrio y sus unidades más utilizadas son toneladas (ton), kilogramos (Kg), kilonewtons (KN), Newton (N), libras (lb), entre otros.
- b) Desplazamiento: es el cambio de ubicación de un punto u objeto respecto a un sistema de referencia, sus unidades en el sistema internacional (SIU) son el milímetro (mm), centímetro (cm), metro (m), kilómetro (Km) y en el sistema inglés la pulgada (in), el pie (ft), la yarda (yd) o la milla (mi).
- c) Área: es la medida de una superficie y tiene unidades de distancia al cuadrado.
- d) Esfuerzo: un esfuerzo es una fuerza aplicada sobre una unidad de área. Se suele utilizar para expresar el efecto que una fuerza está ejerciendo en una partícula de material en un elemento de una estructura o para expresar la resistencia de un material ante cierto tipo de carga, sus unidades más comunes son toneladas/metro cuadrado (ton/m^2), kilogramos/centímetro cuadrado (Kg/cm^2), libras/pulgada cuadrada (lb/in^2), entre otras. Además existen diferentes tipos de esfuerzos que actúan sobre las estructuras los cuales se mencionan a continuación:
- Tracción o tensión: es el esfuerzo que ocasiona la separación entre las partículas del elemento tendiendo a ocasionar un alargamiento en la pieza.
 - Compresión: este esfuerzo ocasiona que las partículas se aproximen tendiendo a que se produzca un acortamiento o aplastamiento del elemento.

- Cortante: se produce cuando a un elemento se le aplican fuerzas perpendiculares logrando que las partículas del material tiendan a resbalar o desplazarse unas sobre otras.
 - Flexión: este esfuerzo resulta de la combinación de compresión y de tracción, y mientras que las fibras sometidas a tensión se alargan las de compresión se acortan.
 - Torsión: los esfuerzos de torsión son los que hacen que un elemento tienda a retorcerse sobre su eje central.
- e) Elemento mecánico: es todo aquel que genera un esfuerzo en cualquier elemento estructural y debe estar diseñado para resistirlo.
- f) Deformación: cambio de tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos producidos por una o más fuerzas actuantes sobre el mismo.
- g) Reacción: es la fuerza de sujeción actuante entre el suelo y la estructura o elemento.
- h) Grado de libertad: número mínimo de parámetros que se necesitan especificar para determinar completamente la velocidad de un mecanismo o el número de reacciones de una estructura.
- i) Momento: es el producto de una fuerza y una distancia, que, generalmente representa una acción que genera una rotación en cierto punto y sus unidades para representarse con unidades de fuerza por unidades de longitud.

- j) Rigidez: es la oposición que presenta un elemento o estructura a ser deformada, sus unidades son fuerza/desplazamiento y se representa con la letra K $K = \frac{F}{D}$.
- k) Esbeltez: es la relación que existe entre la longitud y la sección transversal de un elemento estructural.
- l) Inercia o momento de inercia: es la propiedad geométrica que representa la oposición de un elemento a pandearse o flexionarse, para calcular esta propiedad se utilizan fórmulas que dependen de la geometría de la sección transversal del elemento que generalmente involucran la medida de la base y el cubo de la altura.
- m) Módulo de elasticidad: es una propiedad característica de cada material que indica la relación que existe entre los incrementos de tensión aplicados sobre un elemento y los incrementos de su deformación.

2.2. Apoyos.

Un apoyo es aquel lugar sobre el cual se estriba una palanca para que la potencia pueda vencer la resistencia o carga, además todo sistema estructural está sostenido o soportado por medio de apoyos ya sea articulados, apoyos libres, empotramientos o soportes de eslabón menciona McCormac (1983) y que a continuación se describen los tipos de apoyos más comunes dentro del análisis estructural:

a) Articulación o apoyo de pasador.

Este tipo de apoyo impide el movimiento en dirección vertical y horizontal, permite que el elemento tenga rotaciones muy leves alrededor del mismo, es decir, en este tipo de apoyo existen dos incógnitas: la magnitud de la fuerza que impide que el elemento tenga movimiento en dirección horizontal y la fuerza que logra impedir el movimiento vertical.

b) Apoyo libre o de rodillo.

En este caso existe únicamente la resistencia al movimiento en dirección ortogonal a la superficie sobre la cual descansará el apoyo, no obstante, este apoyo no tiene resistencia a la rotación alrededor del cuerpo rodante ni tampoco al movimiento paralelo a la superficie del rodillo y la única incógnita que presenta es la magnitud de la fuerza que requiere para impedir el movimiento en dirección perpendicular a la superficie del apoyo.

c) Empotramiento.

Se dice que un empotramiento o apoyo totalmente fijo ofrece resistencia tanto a la rotación con respecto al centro del soporte, así como la resistencia al movimiento en la dirección vertical y horizontal, y que, existen tres incógnitas, la magnitud que impide el movimiento en dirección vertical, la de la fuerza que impide el movimiento en dirección horizontal y por último la que impide la rotación.

d) El apoyo de eslabón.

Este apoyo es similar al apoyo libre debido a que sus articulaciones de los extremos se suponen totalmente lisas, en la cual existe una sola incógnita que es la magnitud de la fuerza en la dirección del soporte.

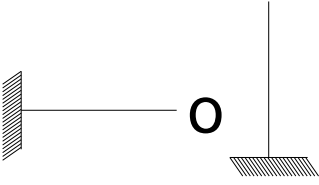
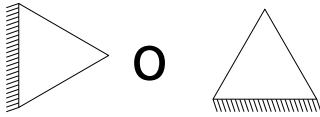
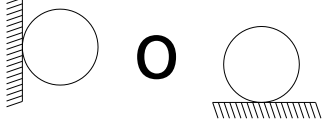
| Tipo de apoyo | Numero de reacciones |
|--|--|
|  <p data-bbox="524 594 808 625">EMPOTRAMIENTO</p> | <p data-bbox="971 468 1101 499">Marcos 3</p> <p data-bbox="982 541 1089 573">Vigas 2</p> |
|  <p data-bbox="524 867 808 898">ARTICULADO FIJO</p> | <p data-bbox="971 741 1101 772">Marcos 3</p> <p data-bbox="982 814 1089 846">Vigas 1</p> |
|  <p data-bbox="508 1129 824 1161">ARTICULADO MOVIL</p> | <p data-bbox="1027 1035 1044 1066">1</p> |

Tabla 2.1 Número de reacciones de los principales tipos de apoyo utilizados en el análisis estructural. (Fuente: Propia)

Por otra parte, Leet (2006) afirma que, para asegurar que una estructura logre permanecer en la posición que se requiere bajo ciertas condiciones de carga debe fijarse a una cimentación o conectarse a otros miembros estructurales por medio de soportes, además se dice que para algunas estructuras ligeras los soportes pueden clavarse o atornillarse a muros, columnas o vigas. Sin embargo en dichos soportes pueden descartarse los detalles de diseño debido a la facilidad de construcción, pero

en casos más específicos en los cuales se requiere apoyar estructuras muy grandes con cargas pesadas deben diseñarse sistemas grandes y complejos que permitan ciertos desplazamientos pero que impidan otros.

2.3. Estructura y elementos estructurales.

Según Francis (1984) se dice que una estructura es toda construcción que podrá satisfacer las necesidades del ser humano ante el medio ambiente, pero que además es capaz de soportar su peso propio y capaz de soportar las fuerzas externas sin perder su funcionalidad para lo que será destinada durante su vida útil, pero que, sin embargo es muy importante que exista seguridad, funcionalidad y economía simultáneamente.

Por otra parte, McCormac (1983) menciona que en la ingeniería estructural existen una gran variedad de estructuras entre las que destacan los puentes, los edificios, estadios, cables, arcos tanques de agua, entre muchos otros, y que sus dimensiones son muy variables que van desde pequeños marcos hechos de poca cantidad de vigas y columnas hasta construcciones tan grandes como la Torre Sears de Chicago que mide 442 m de altura o el extraordinario puente de Nueva York Verrazano-Narrows que cuenta con un claro libre de 1300 m.

Así mismo, Leet (2006) señala que cada sistema estructural está compuesto por elementos estructurales básicos como vigas, columnas, armaduras, cables, entre otros.

2.3.1. Vigas.

Se dice que las vigas son elementos delgados los cuales son capaces de resistir cargas perpendiculares a su eje longitudinal, así que, cuando a una viga se le aplica una carga ésta se flexiona y presenta una deformación siguiendo una pequeña curva la cual se ve reflejada en su mayoría en el centro de la misma, como se muestra en la siguiente imagen:

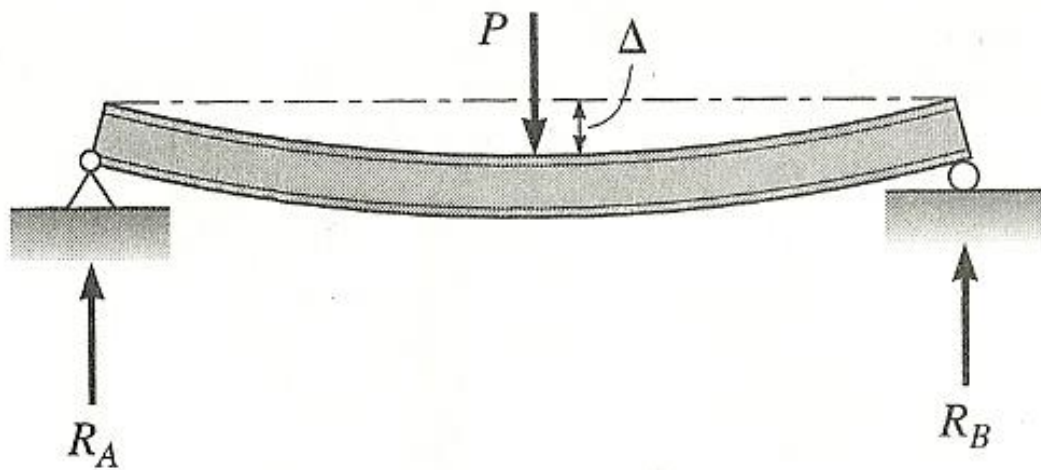


Fig. 2.1 la viga se flexiona bajo una carga puntual en el centro.

(Fuente: Leet; 2006: 12)

2.3.2. Columnas.

Leet (2006) afirma que las columnas también transfieren carga bajo esfuerzo directo en forma muy eficiente y la capacidad de una columna sometida a esfuerzos de compresión está en función de su relación de esbeltez l/r , dicho en otras palabras, si su relación de esbeltez es muy grande quiere decir que el elemento fallará por pandeo aun cuando los esfuerzos sean pequeños, por otra parte, si su relación de esbeltez es pequeña suelen fallar por exceder la resistencia, ya sea por

aplastamiento o fluencia, sin embargo su capacidad de carga en axial es sumamente alta comparada con la anterior.

2.3.3. Cables.

El mismo Leet (2006) asegura que los cables son elementos estructurales muy delgados y flexibles compuestos de un conjunto de alambres entrelazados entre sí mecánicamente mediante el trefilado de barras de aceros de alta resistencia aleados por medio de troqueles, además de que el acero con el que están elaborados este tipo de elementos es aproximadamente 5 veces más resistente a la tensión que la mayoría de los aceros estructurales.

Sin embargo, los cables no tienen rigidez con respecto a la flexión, es decir, solo son capaces de transmitir esfuerzos de tensión directos, y debido a esta grandiosa característica las estructuras hechas por medio de cables son capaces de soportar las grandes cargas que provocan los claros largos y de una manera muy económica y eficiente en comparación con los demás elementos estructurales.

No obstante, debido a la poca rigidez que presenta un cable éstos experimentan un cambio de forma al aplicarles cargas concentradas, además facilita que las fuerzas pequeñas como la del viento provoquen oscilaciones en los sistemas estructurales formados a base de cables. Así mismo los ingenieros han descubierto diversas técnicas que permitan utilizar los cables de una manera efectiva que permiten casi en su totalidad eliminar las deformaciones y vibraciones causadas por las cargas vivas.

Dichas técnicas para rigidizar los cables son las siguientes:

1. El pretensado.
2. El uso de cables de amarre.
3. La adición de carga muerta.

Por otra parte, el autor antes mencionado señala que como parte del sistema a base de cables debe diseñarse los apoyos con el objetivo de absorber las reacciones de los extremos y que, además, cuando se dispone de una roca sólida éstos se pueden anclar de una forma muy económica, con el simple hecho de empotrar el anclaje dentro de la roca, mientras que, por el contrario se deben construir cimentaciones muy pesadas para poder anclar los cables o como el caso de los puentes colgantes en los cuales es necesario la construcción de torres para soportar los cables.

2.3.4. Armaduras.

De acuerdo con Leet (2006) se dice que una armadura en un elemento estructural formado por una serie de barras esbeltas interconectadas en los extremos, el arreglo de dichas barras por lo general subdividen a la armadura en triángulos para generar un sistema eficiente y ligero capaz de soportar la carga que se aplique, sin embargo las juntas por lo general están conectadas por medio de pernos, soldadura o incluso tornillos a placas de conexión, durante el cálculo se consideran que en las juntas los miembros se conectan entre sí por medio de pernos sin fricción debido a que este tipo de sistema no transfieren momentos y se considera que los miembros solo transmiten fuerza axial ya sea a tensión o a compresión.

Por otra parte, la acción estructural de la mayoría de las armaduras es muy similar a la de una viga, puesto que una armadura puede asimilarse como una viga pero con la diferencia de que a ésta se le ha retirado el exceso de material con la finalidad de disminuir su peso.

De igual manera, los diagonales de una armadura por lo general se colocan con una pendiente entre 45 y 60 con respecto a la horizontal, además en una armadura que requiera un claro muy grande la separación entre los bordes de los paneles debe estar entre 5 y 7 metros, esto para limitar la longitud no soportada de los elementos de la cuerda superior cuyos esfuerzos son de compresión y se diseñan como columnas, ya que de lo contrario se incrementaría la relación de esbeltez del elemento éste se vuelve más susceptible al pandeo, sin embargo no solo debe limitarse la esbeltez en elementos a compresión, sino que, también a miembros a tensión puesto que deben reducirse las vibraciones producidas por el viento y por la carga viva.

Así mismo, McCormac (1983) señala que existen diferentes tipos de armaduras las cuales se mencionan a continuación:

a) Armaduras simples.

Una armadura simple está constituida por tres barras unidas en sus extremos con el objetivo de formar triángulos y sus configuraciones consecuentes se obtienen añadiendo dos elementos y un nudo cada vez conectando los dos miembros en la nueva junta por uno de sus extremos y cada uno de sus extremos a un nudo de las barras ya existentes.

b) Armaduras compuestas.

Una armadura compuesta se obtiene al conectar dos a más armaduras simples las cuales pueden estar unidas por medio de eslabones, articulación y eslabón, o por otra armadura, etc., de esta manera se puede formar un número casi ilimitado de tipos de armadura.

c) Armaduras complejas.

Estas armaduras son estáticamente determinadas, sin embargo no cumplen los requisitos para considerarse dentro de la clasificación de las simples o compuestas. Por otra parte los elementos de las simples y compuestas comúnmente se ubican de tal manera que puedan hacerse pasar cortes con tres barras al mismo tiempo y tomar momentos con respecto a la intersección de los ejes de dos de ellas y calcular la fuerza de la tercera barra.

No obstante, una armadura no se puede calcular de esta manera debido a que no es posible aplicar el método de los momentos sino que, tampoco es posible el de fuerzas cortantes y el de nudos.

2.4. Principios de análisis estructural.

Los métodos de análisis estructural están basados en los siguientes tres principios:

a) Equilibrio.

Según McCormac (1983) se dice que cuando un cuerpo permanece en reposo en ese instante se encuentra en equilibrio, además se establece que la resultante que surge de las cargas externas aplicadas sobre el cuerpo y las fuerzas de los apoyos o reacciones es igual a cero, pero que además no solo debe cumplirse que la

sumatoria de fuerzas actuantes en cualquier dirección sea nula, sino, que de igual manera la suma de momentos de todas las fuerzas actantes con respecto a cualquier punto sea cero.

Así mismo, cuando una estructura se encuentra en equilibrio bajo la acción de cargas o esfuerzos debe cumplir las seis ecuaciones de la estática usando el sistema cartesiano en tres dimensiones (x,y,z) las ecuaciones son las siguientes:

$$\begin{array}{ll} \Sigma F_x=0 & \Sigma M_x=0 \\ \Sigma F_y=0 & \Sigma M_y=0 \\ \Sigma F_z=0 & \Sigma M_z=0 \end{array}$$

Por otra parte, para fines de análisis y diseño suele considerarse por lo general que la estructura a resolver es plana, es decir en dos dimensiones sin que represente una inexactitud importante, por lo que en estos casos la sumatoria de fuerzas en las direcciones x,y sea cero, así como la suma de momentos con respecto al eje ortogonal al plano de fuerzas dando como resultado las siguientes ecuaciones:

$$\Sigma F_x=0 \quad \Sigma F_y=0 \quad \Sigma M_z=0$$

Aunque comúnmente estas ecuaciones suelen expresarse de la manera siguiente:

$$\Sigma F_H=0 \quad \Sigma F_V=0 \quad \Sigma M=0$$

“De esta forma si se cumplen las condiciones antes mencionadas, bajo la acción del sistema de fuerzas externo y el sistema de reacciones, la estructura está en equilibrio” (Camba y colaboradores; 1982,4)

2. La compatibilidad de deformaciones de todos los elementos estructurales.

Según Camba y colaboradores (1982) cuando a una estructura se le aplica un sistema fuerzas, ésta tiende a deformarse pero conserva sus condiciones iniciales.

En la figura mostrada a continuación el nudo B al pasar a la posición B' se desplaza y gira, y si se tratara de una estructura en el espacio tendría tres componentes de desplazamiento lineal y tres angulares, pero en el caso del nudo en un plano dichos desplazamientos serían dos: uno lineal y otro sería un giro.

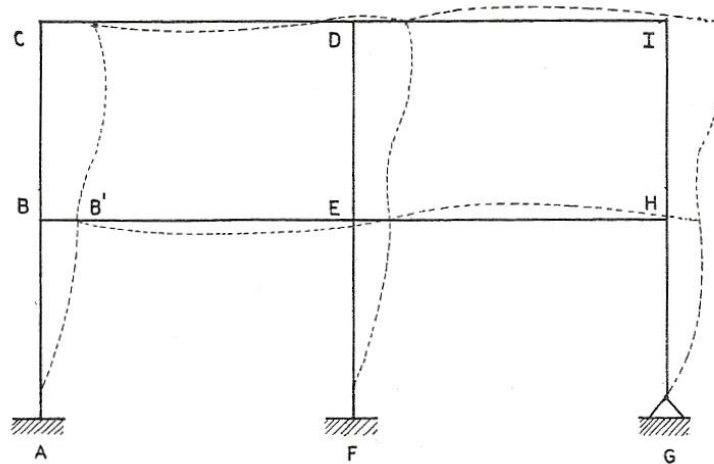


Figura 2.2. Desplazamiento de un nudo.

(Fuente: Camba y colaboradores; 1982: 6)

3. La relación fuerza-desplazamiento.

De acuerdo con los objetivos del análisis estructural es necesario para la estructura de geometría definida, la relación que existe entre las fuerzas actuantes y los desplazamientos. Existen dos tipos de relación fuerza-desplazamiento los cuales son lineales y no lineales como se muestra en la siguiente figura:

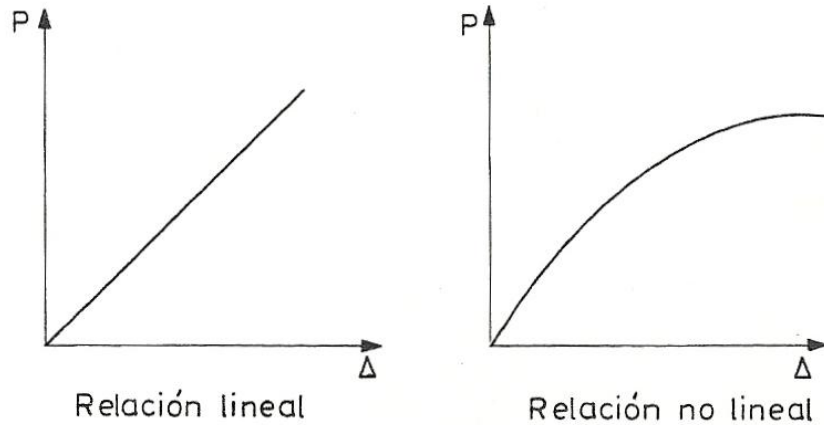


Figura 2.3. Tipos de relación fuerza-desplazamiento.

(Fuente: Camba y colaboradores; 1982: 6)

Generalmente existe una hipótesis de que la relación fuerza-desplazamiento es lineal, por lo que puede aplicarse a las estructuras el principio de la superposición; dicho principio establece que los efectos producidos por un sistema de fuerzas aplicados a una estructura son equivalentes a la sumatoria de los efectos producidos por cada una de las fuerzas del sistema actuando de manera individual.

Sin embargo una estructura debe ciertas condiciones para poder aplicarse al principio de la superposición, las cuales se mencionan a continuación:

- a) La estructura debe cumplir la ley de Hooke.
- b) No debe existir interacción entre fuerzas axiales y momentos flexionantes.
- c) Las deformaciones deben ser muy pequeñas, para evitar que se afecte el sistema de fuerzas interno y de reacciones.

De esta manera, si se cumplen las tres condiciones anteriores se tratará de una estructura cuyo comportamiento es elástico y lineal.

2.5. Convención de signos.

Según McCormac (1983) se dice que la convención de signos durante el análisis para tensión, para compresión, etcétera, carece de importancia siempre y cuando se utilice correctamente en un sistema congruente, pero que además la convención de signos generalmente se emplea de la siguiente manera:

- I. Para la tensión se utiliza el signo positivo, puesto que se considera que los elementos sujetos a esfuerzos de tensión se alargan, es decir aumenta su longitud positivamente.
- II. Por otra parte, se le asigna un valor negativo a los esfuerzos de compresión porque los elementos bajo este tipo de acciones se acortan, en otras palabras sufre un incremento negativo.
- III. Mientras que para los momentos actuantes en el sentido horario se les considera positivo, mientras que por el contrario al sentido anti horario se emplea el negativo, sin embargo, para este tipo de sistema la convención de signos es lo menos importante que los dos anteriores debido a que se puede utilizar la convención que se quiera siempre y cuando se eviten confusiones.

2.6. Tipos de análisis.

Beaufait (1997) indica que el análisis del comportamiento de un sistema estructural idealizado se divide en dos tipos el primero: *análisis de las acciones* el cual está relacionado con la evaluación de las reacciones en los apoyos y con la determinación de la variación de las fuerzas internas y los esfuerzos actuantes en la estructura; el segundo: *análisis de los desplazamientos* que se relaciona con la determinación de los elementos así como los desplazamientos de las estructura, sin

embargo durante el análisis estructural generalmente se combinan estos dos tipos de métodos simultáneamente.

Por otra parte, el autor mencionado anteriormente indica que se han desarrollado una gran cantidad de técnicas para resolver distintos aspectos de los análisis con respecto a las acciones y a los desplazamientos, y cada una de dichas técnicas tiene sus ventajas que la hacen apropiada para resolver un problema particular, así que, existen algunas técnicas apropiadas para realizar cálculos manuales, mientras que algunas están elaboradas para realizar los cálculos mediante computadoras digitales.

2.7. Clasificación de cargas.

De acuerdo con McCormac (1983) se dice que la tarea más difícil e importante del ingeniero en estructuras es calcular las cargas a las que estará sometido un sistema estructural debido a que no debe despreciar ninguna de las posibles cargas que puedan estar actuando sobre la estructura durante su vida útil, por otra parte el ingeniero debe determinar la combinación de cargas más desfavorable que pudiera actuar en un momento determinado.

A continuación se mencionará los diversos tipos de cargas que pudieran actuar sobre una estructura:

a) Cargas muerta.

Estas son las cargas constantes que estarán siempre en la misma ubicación del sistema y que no variarán durante la vida de la estructura, éstas están constituidas por el peso propio de la estructura y otras cargas que estarán permanentemente a la misma (muros, pisos, tuberías, etc.).

De igual manera cuando se diseña una estructura es necesario determinar el peso de los elementos que lo integraran, pues debe calcularse el peso exacto de una estructura en la cual aún no se conocen las dimensiones ni los pesos exactos de los elementos que la conformaran, esto con la finalidad de que, el peso obtenido en el diseño final sea similar al calculado inicialmente, ya que, de existir una gran variación será necesario repetir el análisis y el diseño con estimaciones más precisas de la carga muerta.

Así mismo, se dice que es posible estimar las cargas muertas de un estructura con estructuras similares o mediante el uso de fórmulas o tablas contenidas en la mayoría de manuales o reglamentos de construcción, por otra parte se dice que un ingeniero con experiencia suele calcular con mayor precisión el peso de las estructuras por lo que no necesita repetir sus diseños.

b) Carga viva.

El mismo McCormac (1983) menciona que las cargas vivas son aquellas que no permanecen en un sitio determinado y cuya magnitud puede ser variable, es decir todas las cargas que no son muertas se catalogan como cargas vivas, mientras que por otra parte, las cargas que suelen desplazarse por sí solas se les denomina *cargas móviles* como grúas, automóviles y personas.

c) Cargas por impacto.

Este tipo de cargas son ocasionadas por la vibración de las cargas móviles, entonces “la carga por impacto es igual a la que produce el choque en realidad, menos la magnitud que tendría si fuera una carga muerta” (McCormac; 1983: 5).

d) Cargas laterales.

Existen dos tipos de cargas laterales principales la primera es la que origina el viento y la segunda es la que se origina por la acción de sismos. Sin embargo es común que en la ingeniería se considere la presión del viento uniforme en todos los sentidos de un edificio expuesto a su acción y que éste puede provenir de cualquier dirección, dicha suposición es irreal debido a que el viento ejerce una presión diferente en grandes áreas, y lo más probable es que sea mayor en las esquinas o en las aristas de los edificios a causa de los cambios bruscos en la dirección del viento.

Ahora bien, si la altura de un edificio no es más de dos veces mayor que la dimensión lateral menor generalmente se omite el efecto del viento, esto se debe a la creencia de que los pisos y los muros dan la suficiente rigidez a la estructura por lo cual se piensa que no es necesario el uso de un sistema de contraventeo. Así mismo el viento suele actuar como una presión directa sobre la superficie perpendicular a su dirección, ya sea como fuerza de presión o de succión.

e) Granizo.

El Granizo es un tipo de precipitación que consiste en partículas irregulares de hielo, se origina en tormentas intensas en las que se producen gotas de agua sobre enfriadas, es decir, aún líquidas pero a temperaturas por debajo de su punto normal de congelación (0 °C), y ocurre tanto en verano como en invierno, aunque el caso se da más cuando está presente la canícula, días del año en los que es más fuerte el calor.

El agua sobre enfriada continúa en ese estado debido a la necesidad de una semilla sólida inicial para iniciar el proceso de cristalización. Cuando estas gotas de

agua chocan en la nube con otras partículas heladas o granos de polvo pueden cristalizar sin dificultad congelándose rápidamente. En las tormentas más intensas se puede producir precipitación helada en forma de granizo especialmente grande cuando éste se forma en el seno de fuertes corrientes ascendentes. En este caso la bola de granizo puede permanecer más tiempo en la atmósfera disponiendo de una mayor capacidad de crecimiento. Cuando el empuje hacia arriba cesa o el granizo ha alcanzado un tamaño elevado el aire ya no puede aguantar el peso de la bola de granizo y ésta acaba cayendo

El agua, junto con el galio, bismuto, ácido acético, antimonio y el silicio, es una de las pocas sustancias que al congelarse aumenta de volumen (es decir, que disminuye su densidad); se expande al congelarse. Esta propiedad evita que los océanos de las regiones polares de la Tierra se congelen en todo su volumen, puesto que el hielo flota en el agua y es lo que queda expuesto a los cambios de temperatura de la atmósfera. La densidad típica del hielo a 0 °C suele tomarse como 916,8 kg/m³ o como 0,9168 g/cm³.

Sin embargo, se pueden establecer 2 tipos de efecto sobre las estructuras:

1. El propio impacto del granizo (el tamaño es determinante en el efecto sobre las estructuras).

2. La acumulación de granizo que es la propuesta de la presente investigación representa ahora otros motivos por los cuales es necesario la aplicación de este tema:

- a. En primer lugar aparecen las cubiertas en forma de arco de medio punto, cuya pendiente es cercana a cero en las proximidades al centro

del claro, facilitando la acumulación de grandes masas de granizo según Solana (2002).

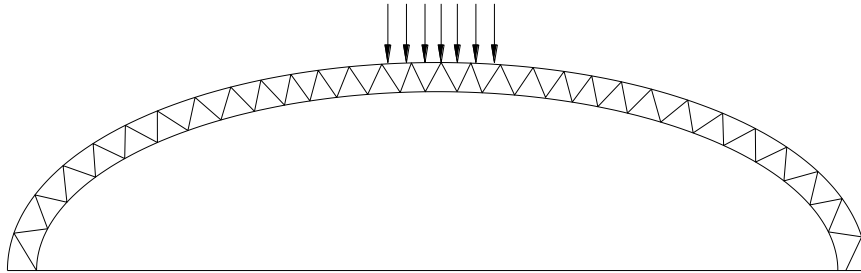


Figura 2. 1 cubierta circular de punto medio

(Fuente: propia)

- b. Las cubiertas a dos aguas, construidas con una pendiente baja impiden que el granizo escurra hacia las canalejas, llevando a la falla el sistema estructural por exceder las cargas de diseño.

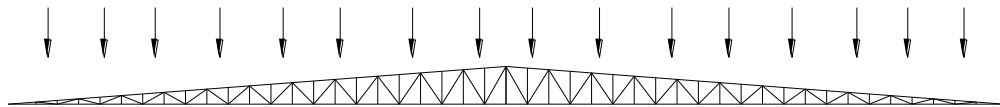


Figura 2. 2 cubierta a dos aguas con pendiente baja

(Fuente: propia)

- c. Las cubiertas en forma de diente de sierra, acumulan gran cantidad de granizo uniformemente distribuido a los largo de la trabe principal, en su lecho inferior que soporta directamente al canalón. La subestimación de la carga de granizo puede colapsar las naves industriales.

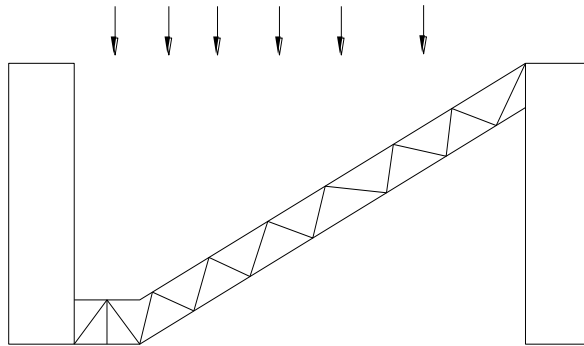


Figura 2. 3 cubierta en forma de diente de sierra

(Fuente: propia)

- d. Y por último, un cuarto grupo la constituyen las fallas locales de largueros en cubierta en la proximidades de canalones de valles, que han causado pérdidas de mercancía y maquinarias por las grandes inundaciones asociadas.

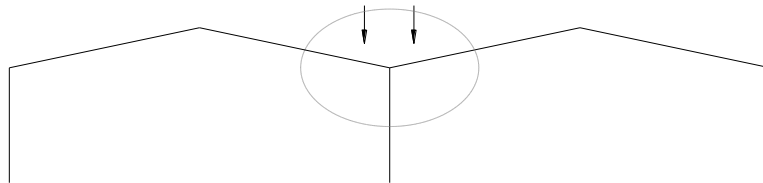


Figura 2. 4 cubierta en claros múltiples

(Fuente: propia)

2.8. Métodos de análisis.

A continuación se describirán los métodos de análisis más utilizados en la ingeniería de estructuras:

2.8.1 Métodos de las flexibilidades.

De acuerdo con Camba y colaboradores (1982) el método de las flexibilidades o también conocido como método de las fuerzas es la superposición de los desplazamientos de los sistemas estáticamente indeterminados de manera semejante a los de las estructuras estáticamente determinadas, en donde las fuerzas y los momentos son las incógnitas y se determinan a partir de los desplazamientos conocidos en base a las ecuaciones de la compatibilidad de deformaciones.

Así mismo, existen dos tipos de solución para este método los cuales se mencionan enseguida: 1) se le llamará solución particular a la estructura en donde solo actúan las fuerzas externas y 2) solución complementaria a la estructura sobre la cual actúa cada una de las incógnitas o también llamadas redundantes.

Si se tiene una estructura como la siguiente:

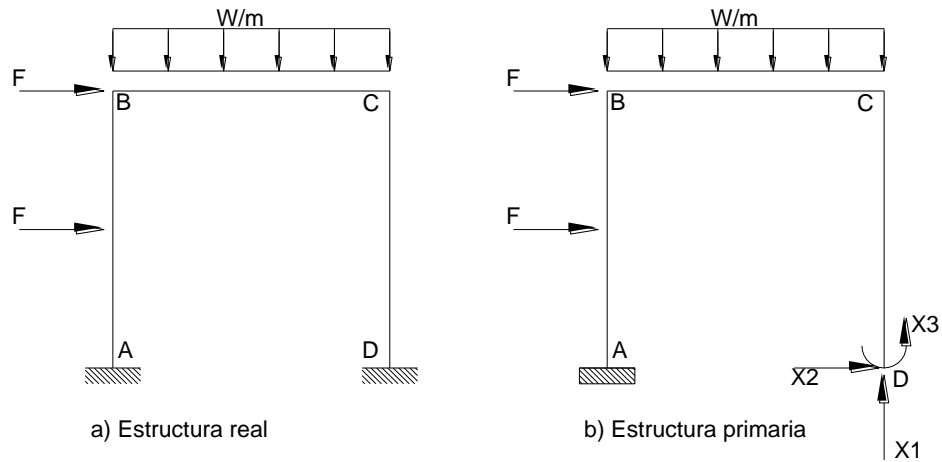


Figura 2. 5 Estructura estáticamente indeterminada.

(Fuente: Camba y colaboradores; 1982: 58)

De acuerdo con la figura las incógnitas serán las reacciones vertical, horizontal y el momento en D, por lo que la estructura podrá descomponerse de la siguiente manera:

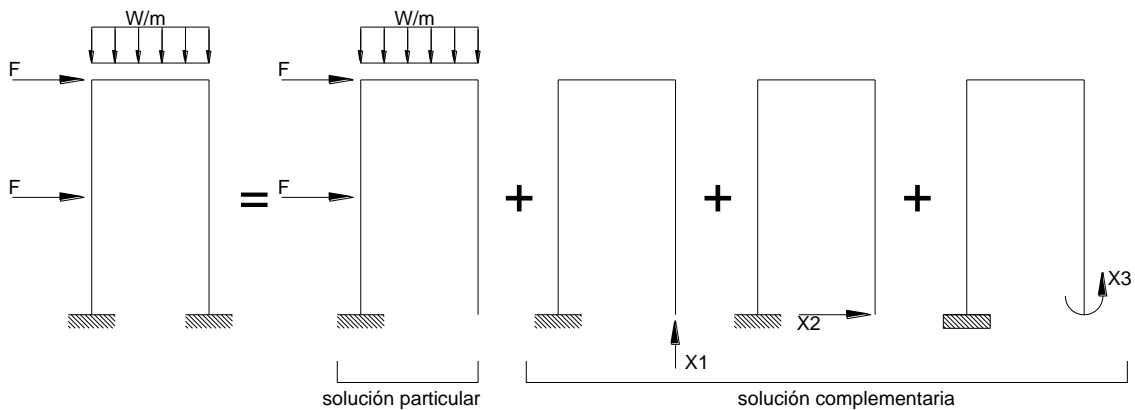


Figura 2. 6 Solución de la estructura estáticamente indeterminada.

(Fuente: Camba y colaboradores; 1982: 58)

En base a la compatibilidad en la estructura real se considerará que el desplazamiento vertical, horizontal y el momento en D serán nulos y se representan como se muestra a continuación:

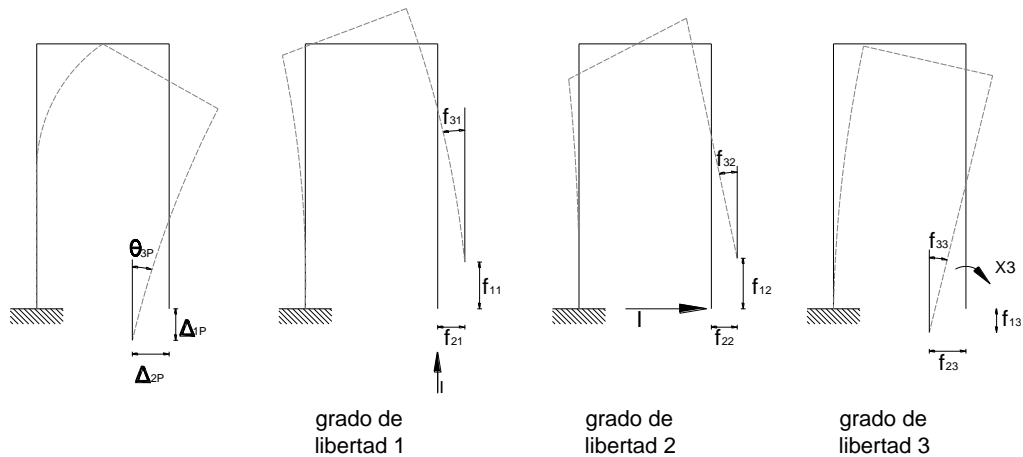


Figura 2. 7 grado de libertad del sistema
(Fuente: Camba y colaboradores; 1982: 58)

Por lo que las ecuaciones de compatibilidad serán las siguientes:

- a) El desplazamiento vertical en D es nulo:

$$\Delta_{1P} + f_{11}X_1 + f_{12}X_2 + f_{13}X_3 = 0$$

- b) El desplazamiento horizontal en D es nulo:

$$\Delta_{2P} + f_{21}X_1 + f_{22}X_2 + f_{23}X_3 = 0$$

- c) El giro en D es nulo:

$$\theta_{3P} + f_{31}X_1 + f_{32}X_2 + f_{33}X_3 = 0$$

De los sistemas de ecuaciones anteriores se obtiene el valor de las incógnitas, sin embargo cabe mencionar que si algún valor resulta negativo significa que se supuso en el sentido contrario al que realmente está actuando.

No obstante, el sistema de ecuaciones es llamado matriz de flexibilidades la cual siempre es simétrica y cuadrada, cuya diagonal principal es siempre positiva; suele expresarse de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \Delta_{1P} \\ \Delta_{2P} \\ \theta_{3P} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = 0$$

En donde Δ_{iP} es el vector de desplazamiento de estado y f_{ij} corresponde al grado de libertad i debido a una fuerza o momento unitario aplicado en j , y es llamado coeficiente de flexibilidad, entonces se puede decir que es el desplazamiento unitario y que depende de la geometría, propiedades elásticas de la estructura primaria y que son independientes del sistema de cargas real de la estructura inicial.

Por otra parte, los coeficientes pueden obtenerse por cualquier método aunque lo más recomendable es utilizar el método de trabajos virtuales, o por medio de integrales donde se obtiene el desplazamiento ocasionado por el momento y se representa de la siguiente manera:

$$f_{ij} = \int \frac{m_i m_j}{EI} dx$$

En síntesis los pasos del cálculo del método de flexibilidades pueden ser los siguientes:

1. Determinar el grado de hiperestaticidad de la estructura.
2. Seleccionar las incógnitas o redundantes de la estructura.
3. Calcular los desplazamientos debidos a las cargas y a cada una de las redundantes.
4. Plantear las ecuaciones de compatibilidad de desplazamientos y resolver el sistema de ecuaciones.

5. Obtener los diagramas de elementos mecánicos.

2.8.2 Método de rigideces

Según Camba y colaboradores (1982) en este método las incógnitas son los desplazamientos en los nudos, dichos desplazamientos son el número de grado de libertad o el grado de indeterminación cinemática de la estructura, la ecuación general fuerza-desplazamiento es la siguiente:

$$\begin{Bmatrix} N_{x'ri} \\ V_{y'ri} \\ M_{z'ri} \\ N_{x'rf} \\ V_{y'rf} \\ M_{z'rf} \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{-EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ \frac{-EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

Sin embargo, algunas barras pueden estar en otra posición por lo que se manejan dos sistemas de coordenadas una local y una global como se muestra enseguida:

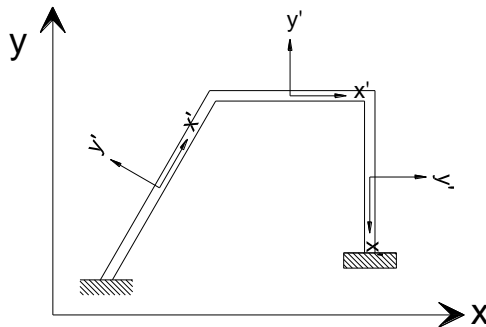


Figura 2. 8 Sistema global y sistema local del método de rigideces.

(Fuente: Propia)

No obstante, para ensamblar las ecuaciones fuerza-desplazamiento de las barras, éstas deben estar referidas al mismo sistema de coordenadas, así que, esto se logra haciendo la rotación en base al siguiente planteamiento:

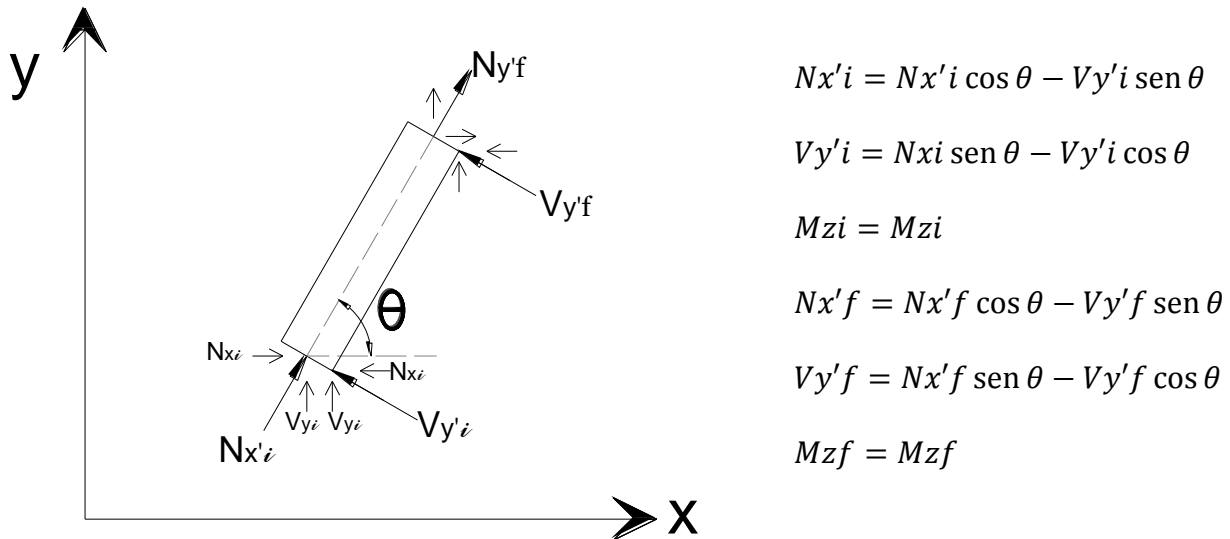


Figura 2. 9 Rotación del sistema local al sistema global.

(Fuente: propia)

Ahora estableciendo lo anterior en forma matricial queda:

$$\{F\} = [R]\{F'\}. \quad . \quad . \quad . \quad \text{ecuación 1}$$

Donde:

F = Fuerzas de empotramiento perfecto

$$R = \text{Matriz de rotaciones} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

F' = Fuerzas de empotramiento perfecto rotadas al sistema global

Lo mismo se aplica para los desplazamientos:

$$\{D\} = [R]\{D'\}. \quad . . . \text{ecuación 2}$$

Ahora despejando $\{F'\}$ y $\{D'\}$ de las ecuaciones 1 y 2

$$\{F'\} = [R]^{-1}\{F\}. \quad \text{ecuación 3}$$

$$\{D'\} = [R]\{D\}. \quad \text{ecuación 4}$$

$$\{FEP'\} = [R]^{-1}\{FEP\}. \quad . . . \text{ecuación 5}$$

$$\{FEP\} = [R]\{FEP'\}. \quad . . . \text{ecuación 6}$$

Tomando la ecuación fuerza desplazamiento de una barra.

$$\{F'\} = [K']\{D\} + \{FEP'\}$$

Sustituyendo 3, 4 y 5

$$[R]^{-1}\{F\} = [K'] [R]^{-1}\{D\} + [R]^{-1}\{FEP\}$$

Despejando $\{F\}$

$$\{F\} = \underbrace{[R][K'] [R]^{-1}}_{[K]}\{D\} + [R][R]^{-1}\{FEP\}$$

Donde:

$\{F\}$ = Vector de fuerzas rotado al sistema global.

$[K]$ = Matriz de rigideces rotada al sistema global.

$\{D\}$ = Vector de desplazamiento rotado el sistema global.

$\{FEP\}$ = Fuerzas de empotramiento perfecto rotadas al sistema global.

Y por último la ecuación 6 queda de la siguiente manera:

$$\begin{Bmatrix} Nxi \\ Vyi \\ Mzi \\ Nxf \\ Vyf \\ Mzf \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & D & -A & -B & D \\ B & C & e & -B & -C & e \\ D & e & F & -D & -e & F/2 \\ -A & -B & -D & A & B & -D \\ -B & -C & -e & B & C & -e \\ D & e & F/2 & -D & -e & F \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dxi \\ dyi \\ d\theta i \\ dx f \\ dy f \\ d\theta f \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} Rxi \\ Ryi \\ RMzi \\ Rxf \\ Ryf \\ RMf \end{Bmatrix}$$

Donde:

$$A = \frac{EA}{L} C^2 + \frac{12EI}{L^3} S^2$$

$$B = \left[\frac{AE}{L} - \frac{12EI}{L^3} \right] SC$$

$$C = \frac{AE}{L} S^2 + \frac{12EI}{L^3} C^2$$

$$D = \frac{-6EI}{L^2} S$$

$$e = \frac{6EI}{L^2} C$$

$$F = \frac{4EI}{L}$$

CAPÍTULO 3

DISEÑO ESTRUCTURAL DE CUBIERTAS DE NAVES INDUSTRIALES.

En este capítulo se define el concepto de diseño estructural, se describen los artículos más importantes de la Normas de Diseño en Acero relacionados con las cubiertas de naves industriales, además, se indican cuáles son los registros hidrológicos de granizo en los últimos años, así mismo, se mencionan los puntos críticos de las cubiertas.

3.1. Concepto de diseño estructural.

El diseño estructural es el paso por el cual se inicia el dimensionamiento de cada uno de los elementos que componen a una estructura, de tal manera que ésta cumpla en forma óptima con sus objetivos, señala Melli (2004).

3.2. Especificaciones para el diseño de elementos de acero en cubiertas de naves industriales.

De acuerdo con Tavera y Moreno (1990) las Normas Técnicas Complementarias del estado de Michoacán (NTCM) para el diseño de elementos de acero son las siguientes:

Artículo 316.- Criterio de diseño.

Los elementos de una estructura se podrán diseñar mediante el método de esfuerzos permisibles o con el criterio de Resistencia Última, siempre y cuando den condiciones de seguridad semejantes.

Artículo 317.- Esfuerzos permisibles y factores de carga.

El incremento de esfuerzos para cargas muertas y vivas combinadas con viento o sismo será de un 33%. Así mismo, si se utiliza el criterio de Resistencia Última se deberá emplear los factores correspondientes al mismo.

Artículo 318.- Análisis.

Las estructuras de acero se analizarán con métodos que supongan un comportamiento elástico, sin embargo, por el contrario se utilizan métodos de análisis plástico se deberá comprobar la estabilidad de la estructura.

Artículo 319.- Dimensionamiento.

La longitud efectiva es el punto de sujeción lateral del elemento; en tensión la longitud efectiva se tomará igual a la longitud real de la pieza, mientras que a compresión será su longitud real multiplicada por el factor de longitud efectiva (K).

Artículo 321.- Ancho para elementos planos en compresión.

a) Elementos planos No atiesados.

Son los que tienen un borde libre paralelo a la fuerza de compresión.

b) Elementos planos atiesados.

Son aquellos que están soportados lateralmente a lo largo de los bordes paralelos a la dirección de las fuerzas.

Artículo 322.- Relaciones ancho/grueso = b/t

En la tabla 3.1 del manual de diseño en acero se dan las limitaciones de la relación ancho/grueso para el caso de elementos planos atiesados y no atiesados, así como, un factor de reducción por resistencia Q_s y un ancho efectivo b_e .

Artículo 323.- Miembros a Tensión.

Relaciones de esbeltez.

La relación de esbeltez de elementos sometidos a esfuerzos de tensión debe limitarse de la siguiente manera:

a) para elementos PRINCIPALES $KL/r \leq 250$

b) para elementos SECUNDARIOS $KL/r \leq 300$

Por otra parte cuando se trate de elementos redondos no hay limitación en su relación de esbeltez, siempre y cuando se tenga cuidado en un tensado adecuado con el fin de evitar vibraciones.

Esfuerzos permisibles.

a) En secciones neta

$$F_t = 0.66f_y$$

Pero no mayor que la mitad del esfuerzo de ruptura del acero.

b) En secciones neta con agujeros.

$$F_t = 0.45f_y$$

Artículo 324.- Miembros a Compresión.

Relaciones de esbeltez.

Las relaciones de esbeltez para los elementos sometidos a esfuerzos de compresión estarán limitadas de la manera siguiente:

a) para elementos PRINCIPALES $KL/r \leq 250$

b) para elementos SECUNDARIOS $KL/r \leq 250$

Esfuerzos permisibles.

I.- Miembros cuyos elementos planos satisfacen las relaciones ancho/espesor (b/t) indicadas en A1, B1, A2, y B2 de la tabla 3.1

$$(324-1) \quad F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(KL/r)^2} \quad ; \quad \text{para } KL/r \geq (KL/r)_c$$

Donde:

$$(KL/r)_c = \frac{6340}{\sqrt{f_y}}$$

E = Módulo de elasticidad

$\pi = 3.141592\dots$

$$(324-2) \quad F_a = \frac{12}{23} \left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2(KL/r)_c^2} \right] f_y \quad ; \quad \text{para } KL/r \leq (KL/r)_c$$

b) Miembros cuyos elementos planos tengan relaciones b/t mayores a las establecidas en A1, B1, A2 y B2 de la tabla 3.1 (Casos C1, D1 y C2).

$$(324-3) \quad F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(KL/r)^2} \quad ; \quad \text{para } KL/r \geq (KL/r)^*_c$$

$$(324-4) \quad F_a = \frac{12}{23} Q_s Q_a \left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2(KL/r)^*_c^2} \right] f_y \quad ; \quad \text{para } KL/r \leq (KL/r)^*_c$$

En donde: $(KL/r)^*_c = \frac{6340}{\sqrt{Q_s Q_a f_y}}$

Q_s se tomará igual a 1 en elementos no atiesados.

Q_a es el cociente del área efectiva de la sección entre su área total, y el área efectiva es igual a la total menos la suma de los $(b-b_e)t$ de la sección; la suma comprende todos los elementos planos atiesados; Q_a se tomará igual a 1 en elementos No atiesados.

3.3. Especificaciones para el análisis por viento.

Artículo 407.- Generalidades.

- Las estructuras deberán ser analizadas suponiendo el viento acta en direcciones perpendiculares, despreciando la protección que pudiera brindarles las estructuras aledañas.
- Se acepta la actuación del viento, cargas muertas y vivas de manera simultánea, en la condición más desfavorable.
- No se considerará la acción del viento y sismo simultáneamente.
- Los esfuerzos permisibles bajo la acción de cargas permanentes más la acción del viento, podrá incrementarse un 33%.
- Se revisarán las condiciones necesarias para garantizar la estabilidad local considerando el efecto producido por las presiones interiores y los incrementos de presión exterior.

Artículo 408.- Clasificación de las construcciones.

Las construcciones se clasifican de acuerdo a su destino en los grupos A, B y C, según su respuesta a la acción del viento las estructuras se clasifican en las siguientes cuatro tipos principales:

- Tipo 1 Construcciones como casas, edificios de hasta 7 pisos de altura y todas aquellas que cuya altura es inferior a 21 metros.
- Tipo 2 En general son edificaciones entre 8 y 20 pisos de altura.
- Tipo 3 Construcciones en las que se puedan presentar aparición periódica de vórtices.
- Tipo 4 Corresponde a edificios altos, es decir, mayores de 20 pisos.

Artículo 409.- Velocidades de diseño.

Velocidad de diseño básica.

Se entiende por velocidad básica, a la fuerza del que se supone actuando horizontalmente a una altura de 10 metros sobre el nivel del terreno, la cual se calcula con la siguiente expresión.

$$V = K_1 K_2 V_o$$

Donde:

K1= Factor de topografía, el cual adquiere un valor de 1.0 en terreno plano, 1.15 en terreno promontorio y 0.60 en zonas del centro de ciudades y zonas residenciales o industriales.

K2= Factor de recurrencia, se toma igual a 1.0 en construcciones del grupo B, 1.15 en construcciones del grupo A, mientras que, las del grupo C no requieren análisis por viento.

Vo= Velocidad regional en Km/h. Se tomará del mapa de regionalización eólica de la República Mexicana.

Artículo 411.- Empujes estáticos de viento es estructuras tipo 1, ésta se estima con la siguiente expresión.

$$P = N * C * V^2$$

Donde:

P = Presión en Kg/m²

C = Coeficiente de empuje.

N = Coeficiente de densidad del aire, igual a $0.005 \left(\frac{8+a}{8+2a} \right)$

a = Altura sobre el nivel del mar en Km.

V = Velocidad de diseño, en Km/h. (Ver anexo 1)

Así mismo, el coeficiente C será positivo cuando el viento empuje contra la superficie y será negativo cuando provoque succión.

Artículo 413.- Coeficiente de empuje.

Para valuar los esfuerzos debidos a los efectos de la presión exterior se usarán los coeficientes que se mencionan a continuación:

1) Paredes rectangulares verticales.

Cuando el viento actúa perpendicularmente a la superficie expuesta, se tomará C=0.75 en el lado del barlovento y C=-0.68 en lado del sotavento.

2) Edificios prismáticos rectangulares.

En paredes de barlovento y sotavento se tomarán los valores mencionados en el inciso anterior. En las paredes paralelas a la dirección del viento, así como en el techo cuando éste sea horizontal, se distinguirán otras tres zonas, la primera, se extiende desde la arista del barlovento hasta una longitud igual a $H/3$, en la cual $C = -0.75$, la segunda abarca hasta una longitud de $1.5H$ medida desde la misma arista que la anterior donde $C = -1.00$ y el resto tendrá un valor $C = -0.40$; en techos inclinados y cilíndricos se establecerán las mismas tres zonas paralelas a la dirección del viento.

3) Cubiertas de arco circular.

Cuando el viento actúa perpendicularmente a las generatrices de la cubierta se distinguirán tres zonas, la primera es la de barlovento que se extiende desde la horizontal hasta formar un ángulo de 45° ; la segunda zona es la central que se encuentra entre 45° y 135° , mientras que el resto es considerada la zona de sotavento.

- a) En la zona de barlovento, si la flecha vertical del cilindro guarda una relación con el claro paralelo a la dirección del viento menor de 0.20, se utilizará $C = -0.70$, si la relación flecha a claro es mayor de 0.20, $C = 4.35 (D/B) - 1.57$; donde B es el claro de la cubierta paralelo a la acción del viento, en metros y D la flecha de la cubierta en metros.
- b) En la zona central, $C = -0.95 (D/B) - 0.71$
- c) En la zona de sotavento, $C = -0.55$

4) Cubiertas a dos aguas.

Cuando el viento actúa perpendicularmente a las aristas se considerarán las tres zonas mencionadas en el inciso 2 (Artículo 413-2) para la superficie de barlovento, mientras que, los coeficientes del techo dependen de su inclinación con respecto a la horizontal, tal y como se menciona enseguida:

a) Para $\Theta < 15^\circ$ en la superficie de barlovento se distinguirán tres zonas, la primera, para la zona de barlovento donde $C = -1.75$, la segunda, la zona central en la cual $C = -1.00$, y la tercera, la zona de sotavento se usará un valor $C = -0.40$; mientras que, en la superficie inclinada de sotavento $C = -0.68$.

b) Para intervalos $15^\circ < \Theta < 65^\circ$ se estimará en valor de C con las siguientes expresiones:

$C = -2.10 + 0.023\Theta$, o $C = 0.012\Theta$; para la zona de barlovento.

$C = -1.20 + 0.013\Theta$, o $C = 0.007\Theta$; para la zona central.

$C = -0.40$ para la zona de sotavento.

$C = -0.68$ en la superficie de sotavento.

c) Para $\Theta \geq 65^\circ$ se utilizará $C = 0.75$ en las tres zonas de la superficie de barlovento y $C = -0.68$ para la superficie de sotavento.

5) Cubiertas con una sola agua.

Cuando el viento actúa perpendicularmente a las generatrices horizontales y la cubierta está en barlovento se usarán los mismos valores de los coeficientes de empuje mencionados en el inciso 4 (Artículo 413-4).

Si la cubierta es una superficie en sotavento y su inclinación excede los 15° se usará $C = -0.68$, sin embargo, si su inclinación es menor a 15° se tratará con una cubierta horizontal empleándose los coeficientes mencionados en el inciso 2 (Artículo 413-2).

9) Presiones interiores.

Cuando el porcentaje de aberturas n , de alguna de las paredes de la construcción en el nivel que se analiza sea mayor de 30% de la parte del área expuesta que corresponde a dicha planta, en adición a las presiones o succiones exteriores deberán considerarse, para el diseño local de todos los elementos que limitan en cualquier dirección al nivel en cuestión, presiones o succiones interiores calculadas según la ecuación.

$P = N \cdot C \cdot V^2$ del artículo 411, con los valores de C iguales, respectivamente a 0.80, cuando la abertura se encuentre del lado del barlovento, y a -0.60 cuando se encuentre del lado del sotavento, o en un costado.

Para valores de n menores de 30%, se supondrá para el cálculo de las presiones interiores, los valores de C más desfavorables entre los especificados a continuación:

Si las aberturas se encuentran del lado del barlovento

$$C = 0.8 \frac{n}{30} \pm 0.3 \left(1 - \frac{n}{30} \right)$$

Si la abertura se encuentra de lado del sotavento.

$$C = -0.6 \frac{n}{30} \pm 0.3 \left(1 - \frac{n}{30} \right)$$

Donde: n = Porcentaje de abertura en las paredes.

CAPÍTULO 4

RESUMEN DE MACRO Y MICROLOCALIZACIÓN.

En éste capítulo se menciona la ubicación de la República Mexicana; así como del estado de Michoacán donde se describirá la ubicación geográfica, los climas predominantes, el motor de la economía, además, se señala la alternativa de solución propuesta para el tema de esta investigación.

4.1. Generalidades de la República Mexicana.

La República Mexicana está situada en el continente americano en el hemisferio norte; parte de su territorio se encuentra en América del Norte y el resto en América Central. México se extiende entre los paralelos $14^{\circ} 32' 27''$ en la desembocadura del río Suchiate y el paralelo $32^{\circ} 43' 06''$ que pasa por la confluencia del río Gila con el Colorado; así mismo está comprendido entre las longitudes oeste de Greenwich de $118^{\circ} 22' 00''$ y $86^{\circ} 42' 36''$ respectivamente. (Coordenadas extremas).

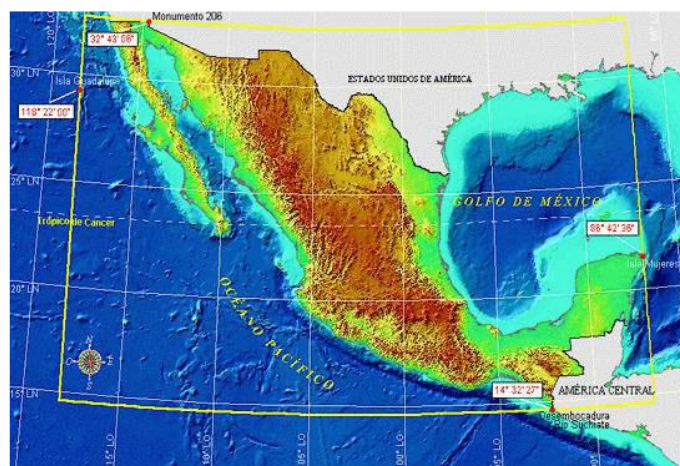


Imagen 4. 1 Ubicación de la República Mexicana en el continente Americano.
(Fuente: INEGI; 2012)

Actualmente, México limita el norte con los Estados Unidos de América, limita en su frontera sur con las Repúblicas de Guatemala y Belice mediante una línea fronteriza sinuosa, que alcanza 1 149 Km de extensión total, al este se encuentra delimitada por el océano Atlántico, el Golfo de México y la porción que se conoce con el nombre del mar de las Antillas, en su frontera oeste, a ella pertenece el océano Pacífico y el Golfo de California con la presencia de la península de la Baja California.

El área de nuestro territorio se ha modificado a lo largo del tiempo, de acuerdo con la mayor precisión de los levantamientos geográficos, y en nuestros días se acepta como cifra oficial la de 1.9 millones de Kilómetros cuadrados de superficie continental, 5127 kilómetros cuadrados de superficie insular y 3.1 millones de kilómetros cuadrados de Zona Económica Exclusiva, por lo que la superficie total de México supera los cinco millones de kilómetros cuadrados.

México tiene derechos económicos sobre la Zona Económica Exclusiva -faja marítima situada fuera del mar territorial y adyacente a este-, de una anchura máxima de 300 millas náuticas (684.5 kilómetros) y en la cual, tanto los estados ribereños como los sin litoral tienen derechos de exploración y explotación, gozan de libertades de navegación y sobrevuelo y otros como: investigación científica marina, tendido de cables y tuberías submarinas, entre otros.

4.2. Estado de Michoacán.

El estado de Michoacán se encuentra en la zona centro - oeste de la República Mexicana, entre las coordenadas 20°23'27" y 17°53'50" de la latitud norte y entre 100°03'32" y 103°44'49" la longitud oeste del meridiano de Greenwich, colinda al

norte con los estados de Jalisco y Guanajuato, al noroeste con el estado de Querétaro, al este con los estados de México y Guerrero, al oeste con el Océano Pacífico y los estados de Colima y Jalisco, al sur con el Océano Pacífico y el estado de Guerrero, según la página de Internet www.michoacan.gob.mx (2012)

Tiene una superficie de 58,836.95 kilómetros cuadrados, que representa el 3.04 % de la extensión del territorio nacional. Por su extensión territorial ocupa el décimo sexto lugar nacional. La entidad cuenta con 213 km. de litoral y 1,490 km. cuadrados de aguas marítimas, como se muestra en la siguiente imagen.



Imagen 4. 2 Ubicación del estado de Michoacán en la República Mexicana.
Fuente (www.michoacan.gob.mx; 2012)

4.3. Clima de la zona en estudio.

En Michoacán se tiene una precipitación media anual de 806 mm, por lo cual entidad corresponde a la décimo sexta más lluviosa del país. Por otra parte, la temperatura promedio anual es de 22.2 °C, teniendo como extremos temperaturas mínimas anuales de 14.7 °C y de 29.6 °C, lo cual la constituye en la décimo tercer entidad federativa más cálida del país.

Los climas que predominan en la entidad son:

- Cálido sub-húmedo con lluvias en verano: 34.7 % de la superficie estatal.
- Templado sub-húmedo con lluvias en verano: 27.9 % de la superficie estatal.
- Semicálido sub-húmedo con lluvias en verano: 20.3 % de la superficie estatal.
- Semiseco muy cálido y cálido: 10.6 % de la superficie estatal.
- Otros: 6.5 % de la superficie estatal.

4.4. Economía de la zona en estudio.

La población económicamente activa del municipio en 2005 fue el 33.1% y el desempleo fue de 1.27%, la gente se ocupa mayoritariamente en el sector terciario (comercio y servicios), con 62.7% del total en 2005, seguido del sector secundario con el 24.56%. El ingreso promedio del municipio en salarios mínimos es de 3.5.

La principal actividad agrícola del municipio de Uruapan sin duda es el cultivo del aguacate, que ha sido llamado el oro verde de Michoacán. El gran auge de la producción de aguacate en el estado se dio a partir del año 1997, este fue el año donde se suspendió la prohibición de exportar aguacate Mexicano a Estados Unidos decreto impuesto desde el año de 1913. A partir de 1997 el municipio ha exportado aguacate a los Estados Unidos siendo este el mayor consumidor de la producción

Uruapense alcanzando las 200 mil toneladas de un total de 300 mil toneladas exportadas al extranjero.

4.5. Estado físico actual.

En la actualidad el clima se ha convertido en una verdadera incertidumbre debido a los cambios que éste ha sufrido, puesto que, ahora graniza con más frecuencia en zonas donde jamás granizaba, a causa de esto se muestran algunas imágenes debidas a este fenómeno, tal y como se muestra en la fotografía siguiente, en la cual se logra observar la cantidad de granizo que se acumuló durante una tormenta.



Fotografía 4. 1 Cantidad de granizo que se acumuló en una tormenta de tan sólo 2 minutos en la ciudad de Uruapan, Michoacán, en Agosto del 2012.

4.6. Alternativa de solución.

A continuación se plantea la alternativa de solución para que una nave industrial cumpla con su funcionalidad, tomando en cuenta factores más importantes como seguridad, eficiencia y economía.

La alternativa de solución se hará, de acuerdo al cálculo estructural de una cubierta de nave industrial tal y como se ha realizado hasta el día de hoy, sin embargo se agregarán las condiciones que provoca el granizo en ésta, es decir, se diseñará por carga muerta, viento y granizo actuando de manera simultánea, con respecto a los registros hidrológicos de granizo más desfavorables.

Debido a que, no se debe descartar la economía y sobre todo la seguridad de este tipo de estructuras, puesto que, son parte importante para la economía de cualquier región, gracias a su especial característica de almacenar infinidad de productos.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA.

En el presente capítulo se describe el método empleado para la elaboración de presente trabajo, así como el enfoque del mismo, el alcance de la investigación, además se menciona el diseño y los instrumentos utilizados para la recopilación de información y se describe el proceso de la investigación realizada.

5.1 Método empleado.

La investigación presente se basa en el método científico, que es un proceso lento apoyado de los conocimientos del mismo investigador, siempre y cuando éste domine la materia y conozca ampliamente el campo donde se realizará la investigación, sin embargo, el investigador primeramente debe de establecer hipótesis apoyadas de sus vastos conocimientos que le son útiles para poder sostener dichas hipótesis que si bien son uno de los primeros pasos en el método científico, según afirma Mendieta (2005).

El autor antes mencionado, establece que desde que se comienza el proceso de investigación científica, el investigador debe ir recabando conocimientos y resultados, los cuales servirán para sustentar las hipótesis establecidas inicialmente, no obstante, tanto su conocimiento como su observación son parte esencial en el método científico pues son las herramientas principales que permiten lograr resultados satisfactorios durante la investigación.

Sin embargo, cabe mencionar que la hipótesis requiere de la investigación para poder sustentar lo establecido en la teoría y con esto lograr comprobar y por

consecuencia la aceptación, de igual manera, la paciencia es uno de los factores importantes que se requieren para lograr un buen resultado en este método, debido a que se requiere realizar pruebas, registros, reportes, entre otros.

El mismo Mendieta (2005) establece que una vez realizadas y finalizadas los reportes y se han obtenido los resultados de las pruebas, registros, etc., es necesario realizar una revisión para detectar y corregir posibles errores durante el proceso. Una vez realizado lo anterior, el paso a seguir es realizar la síntesis de todo lo anterior. Después se procede a la realización de las conclusiones, para finalizar la etapa de la exploración y así establecer la elaboración de materiales, leyes o si bien es posible elaborar los informes basados en las conclusiones obtenidas.

Una vez realizado todo lo anterior señalado, para finalizar por completo el método científico es necesario realizar un informe general, de manera oficial y de carácter científico con todos los resultados obtenidos durante todo el proceso de la investigación realizada.

Por otra parte, el autor antes mencionado, afirma que el método matemático está sustentado prácticamente en la cuestión de las cantidades, que por lo general, es utilizado en ámbitos económicos, estadísticos, capacidades, rendimientos, volúmenes, entre otros, pero que finalmente deben ser representados con números. Así mismo, los números son la forma más segura y fácil de interpretar cualquier resultado, es por ello que en la presente investigación se tomara el método matemático ya que los resultados se darán en forma numérica además de utilizar medidas, estadísticas, etc.

El método analítico estudia cada uno de los elementos de manera separada que componen a una estructura, para después lograr llevar a cabo la postulación de leyes los resultados que se obtuvieron. Además este método es de carácter sistemático, debiendo cumplir distintas etapas, que una vez ejecutadas se logrará realizar comparaciones y las adecuaciones pertinentes.

5.2 Enfoque de la investigación.

De acuerdo a lo que establece Hernández (2004) existen diferentes tipos de enfoque, que si bien, el cuantitativo es que describe a la investigación presente, puesto que, éste tiene un carácter secuencial y requiere de la aprobación de los expertos, habiendo características esenciales tal y como la que es del orden estrictos, debido a que no se admite el desorden durante el proceso de investigación que abarcan desde las ideas preliminares hasta la etapa donde se presentan los resultados oficiales de dicho trabajo.

Dicho lo anterior en otras palabras, en el enfoque cuantitativo se utiliza la obtención de datos para probar la(s) hipótesis postuladas en base al cálculo numérico o el método estadístico, para así establecer modelos de comportamiento y lograr la comprobación de las teorías.

La investigación presente lleva como enfoque el cuantitativo ya que lleva a cabo las etapas o fases que establece dicho proceso, las cuales se describen a continuación:

1. El investigador deberá plantear un problema para realizar estudios sobre el tema
2. El investigador deberá de tomar en cuenta todo lo que se ha investigado acerca del tema y realizara un marco teórico, esto lo llevara a tener una hipótesis para verificar si es cierto o no las investigaciones previas.
3. La hipótesis se realiza antes de recolectar y analizar los datos.
4. La recolección de los datos debe ser precisa para que la investigación sea creíble y aceptada por otros investigadores
5. Como la investigación tendrá mediciones se representaran mediante números y se debe de analizar por un método estadístico.
6. Durante el proceso de la investigación se buscó un control para que otras explicaciones contrarias sean rechazadas y minimice el error, es por ello que se confía en las pruebas causa-efecto.
7. Los resultados cuantitativos se interpretan a la luz de las predicciones antes dichas de la hipótesis y la teoría, la interpretación de los resultados debe de encajar con las investigaciones y conocimiento existente.
8. La investigación cuantitativa debe de ser lo más objetiva posible.
9. Los estudios cuantitativos deben seguir un orden o proceso y se deben de tener en cuenta al momento de recolectar información.
10. Los resultados de dicha investigación se deberán de generalizar o agrupar en un segmento y también se busca que los resultados puedan replicarse.

11. Los estudios cuantitativos se deben de explicar y predecir los fenómenos investigados, buscando regularidades y relaciones causales de estos fenómenos.
12. Se debe seguir rigurosamente un proceso con lógica ya que los datos poseen validez y confiabilidad para que la investigación sea aceptada.
13. El investigador debe de poner a prueba la lógica que se tomó en la teoría y la hipótesis.
14. La investigación cuantitativa pretende identificar leyes universales y causales.
15. La búsqueda cuantitativa ocurre en la realidad externa del individuo, esto nos lleva a una explicación sobre cómo es la realidad con la aproximación a la investigación.

5.2.1 Alcance de la investigación.

El alcance de investigación descriptivo es el que se tiene en la presente, pues la meta de la misma es describir fenómenos, situaciones, eventos, contextos, etc., debido a que los estudios descriptivos buscan especificar propiedades o características de personas, procesos, objetos o cualquier fenómeno que sea cuestión del análisis, en otras palabras, se pretende calcular o recabar información de manera independiente o en conjunto sobre los temas a los que se pretenda analizar, de acuerdo a que establece Hernández (2004).

Así mismo, se dice que el investigador debe de tener una gran imaginación, creatividad y sobre todo una buena manera en la expresión ya que requiere de

transmitir sus ideas de tal manera que se entienda con claridad lo que está compartiendo. Por otra parte, el emisor de las ideas debe saber que puede transmitir su información mediante diferentes medios y que deberá utilizar el que le resulte más favorable para interactuar de acuerdo a sus necesidades.

5.2.2 Diseño de la investigación.

El estudio presente se entiende que es un diseño no experimental, puesto que según Hernández (2004) se trata de estudios en los cuales no se cambian las variables del proyecto, ya que, solo se trata de observar fenómenos tal y como se dan en su estado natural, para después analizarlos.

Así mismo, “la investigación no experimental es un parteaguas de varios estudios cuantitativos, como las encuestas de opinión, los estudios ex post-facto retrospectivos y prospectivos, etc.” (Hernández; 2004:149).

5.3 Instrumentos de recopilación de información.

Para llevar a cabo la ejecución de la investigación presente, es necesario recurrir a las herramientas actuales, que nos ayudan a facilitar el análisis, arrojando resultados más precisos y confiables, pero sobre todo con una gran eficiencia, que hacen posible un gran avance en cualquier campo de investigación. De igual manera, las herramientas principales a utilizar los las que a continuación se describen:

El manual de diseño en acero volumen 2 de la UMSNH, puesto que, en éste se encuentran todas las ayudas técnicas el Reglamento de Construcciones del Estado de Michoacán para el diseño de elementos de acero, pero sobre todo las ayudas de

análisis y diseño de cubiertas de naves industriales las cuales son el motivo de la investigación presente.

El Sap2000 es un software de última generación, pues es capaz de analizar cualquier estructura por más compleja que ésta sea, su análisis lo realiza mediante el método del elemento finito, y debido a su gran desempeño este programa hace posible que el análisis y diseño estructural sea más sencillo y rápido además de que arroja datos muy apegados a lo que en realidad sucede con las estructuras.

El AutoCAD es un programa de diseño asistido por computadora, el cual sirve para dibujar planos tanto en dos como en tres dimensiones, es utilizado por lo general por ingenieros y arquitectos para la elaboración de sus proyectos.

5.4 Descripción del proceso de investigación.

Esta investigación lleva un orden desde la historia del uso del acero, que es el material más utilizado como material estructural, también se definió la curva esfuerzo-deformación de los diferentes tipos de acero, así como los tipos de acero más comerciales dentro del área de las estructuras junto con sus ventajas y desventajas de su uso añadiendo los tipos de tratamiento que pueden ser aplicados al acero para sus diferentes usos y algo que es sumamente importante son los tipos de perfiles estructurales más comunes en diseño de naves industriales.

Posteriormente se mencionó que es el análisis estructural, así como los conceptos utilizados en el mismo, también se estableció lo que es un estructura y los tipos que existen, se definió los apoyos y los tipos de apoyos, se estableció el estado

de equilibrio y las ecuaciones de la estática, la convención de signos de las fuerzas y momentos, los tipos de análisis estructural y los métodos de análisis más comunes dentro de la ingeniería de estructuras.

Se señalaron los pasos que marca el Reglamento de Construcciones del Estado de Michoacán para analizar una cubierta de nave industrial tal y como se ha visto hasta el momento, es decir analizar y diseñar los elementos por carga muerta y por viento, sin embargo, lo más importante del tema es la carga que produce el granizo y establecer la propuesta de expresiones matemáticas con el objetivo de analizar por granizo los tipos de cubiertas más utilizados en la región de Michoacán, que son las cubiertas a una agua, a dos aguas, cubiertas circulares de medio punto, diente de sierra y cubiertas con claros múltiples.

CAPÍTULO 6

CÁLCULO, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS.

En el presente capítulo se realiza el análisis matemático por viento de la cubierta de una nave industrial ubicada en el estado de Michoacán, así mismo, se realiza la propuesta de los modelos matemáticos para el análisis por granizo de diferentes tipos de cubiertas, motivo de la presente investigación.

6.1 Análisis por viento de una cubierta de nave industrial.

6.1.1. Datos

La nave industrial tiene unas medidas de largo, ancho y alto como se muestra en la figura siguiente:

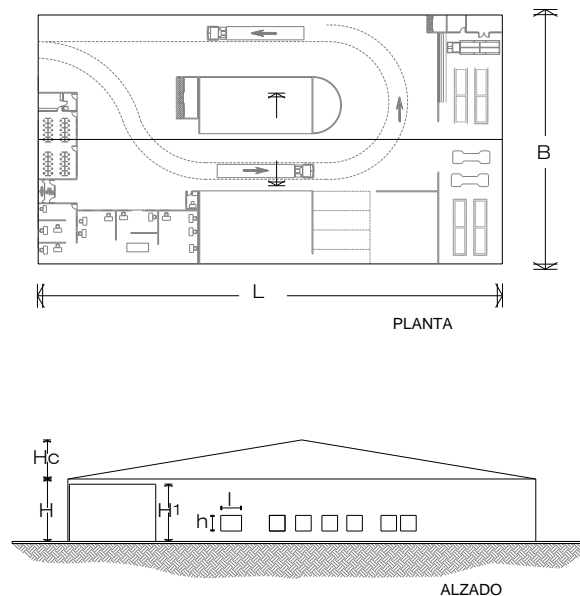


Figura 5. 1 Planta y alzado de una nave industrial

Fuente: Propia

6.1.2. Velocidades de diseño.

Las velocidades de diseño se establecen de acuerdo al Reglamento de Construcciones del Estado de Michoacán, en las cuales se indica que una nave industrial pertenece a una estructura tipo 1, por lo cual se debe considerar los efectos de empuje y succión estática, y que su clasificación respecto a la consecuencia de falla es de tipo B.

La velocidad regional (V_o) se tomará del mapa de regionalización del estado de Michoacán mostrado en el anexo 1, así mismo se usarán los factores tanto de topografía (K_1) como de recurrencia (K_2), por lo cual la ecuación de velocidad básica de diseño queda de la siguiente manera.

$$V = K_1 K_2 V_o$$

6.1.3. Empuje estático del viento.

Entonces el empuje estático de viento queda expresado como se muestra a continuación:

$$P = N * C * (K_1 K_2 V_o)^2$$

En la cual la variable N es un valor que depende de la altura sobre el nivel del mar, para lo cual se usa la expresión $N = 0.005 \left(\frac{8+a}{8+2a} \right)$

6.1.4. Coeficientes de empuje y presiones.

6.1.4.1. Viento actuando normal a las generatrices.

El coeficiente de empuje C se presenta en diversas zonas:

- Las presiones en los muros C_1 , C_2 , C_3 , C_4 y C_5 , del artículo 413 NTCM (Normas Técnicas Complementarias del Estado de Michoacán) títulos 4 y 2.
- Presiones en la cubierta C_6 (zona de barlovento), C_7 (zona central), C_8 (zona de sotavento) y C_9 (superficie de sotavento), en la cual se recomienda establecer un ángulo menor de 15° en claros mayores a 25m

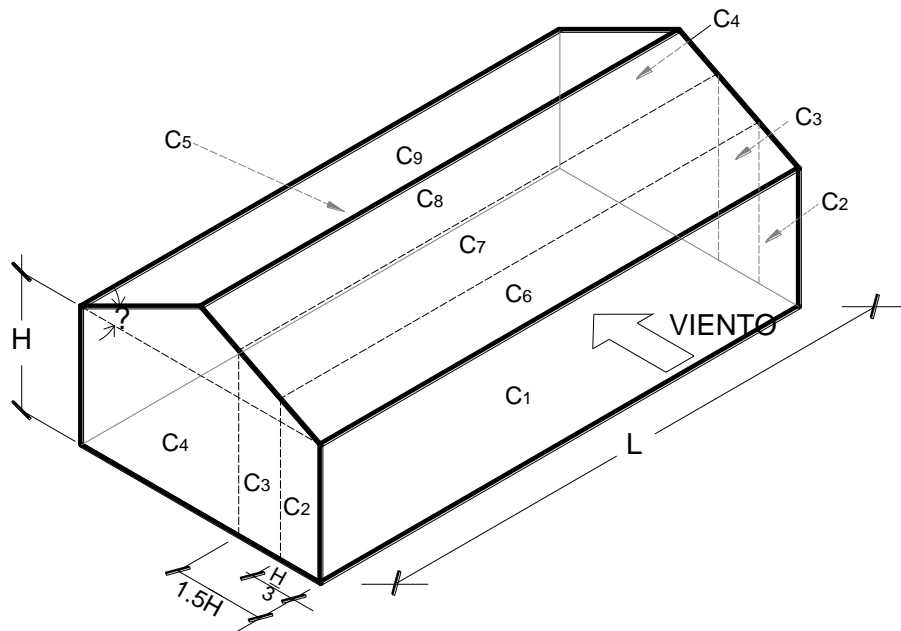


Figura 5. 2 Zonas de los coeficientes de empuje, cuando el viento actúa normal a las generatrices.

Fuente: propia

Por lo tanto la ecuación ahora queda de la siguiente forma:

$$P = 0.005 \left(\frac{8 + a}{8 + 2a} \right) * Ci * (K_1 K_2 V_o)^2$$

Donde: Ci= cada uno de los coeficientes calculados.

Para valuar las presiones interiores de la nave es necesario calcular el porcentaje de aberturas:

a) Longitudinales

$$n = \frac{\Sigma(l * h)}{L * H} * 100$$

Donde: n= porcentaje de aberturas (%)

l= longitud de la (s) abertura (s)

h= altura de la (s) abertura (s)

L= longitud del muro de la nave

H= altura del muro de la nave.

b) Transversales.

$$n = \frac{\Sigma(l * h)}{B * H} * 100$$

Donde: B= Ancho del muro de la nave

Por lo tanto resultan las siguientes expresiones:

- Para la superficie de barlovento

$$C_{1i} = 0.8 \frac{\left(\frac{\Sigma(l * h)}{L * H} x 100 \right)}{30} \pm 0.30 \left(1 - \frac{\Sigma(l * h)}{L * H} x 100 \right)$$

por lo cual resultan dos valores uno con el signo positivo y otro con el signo negativo a los cuales se les llamará C_{+1i} y C_{-1i} respectivamente.

- Para la superficie de sotavento

$$C_{2i} = -0.6 \frac{\left(\frac{\Sigma(l * h)}{L * H} x 100 \right)}{30} \pm 0.30 \left(1 - \frac{\Sigma(l * h)}{L * H} x 100 \right)$$

Resultando así C_{+2i} y C_{-2i}

- Para la zonas laterales:

$$C_{3i} = -0.6 \frac{\left(\frac{\Sigma(l * h)}{B * H} x 100 \right)}{30} \pm 0.30 \left(1 - \frac{\Sigma(l * h)}{B * H} x 100 \right)$$

Obteniéndose entonces C_{+3i} y C_{-3i}

Sumas:

$$C_{+i} = C_{+1i} + C_{+2i} + C_{+3i}$$

$$C_{-i} = C_{-1i} + C_{-2i} + C_{-3i}$$

Ahora se deberán sumar los valores de las presiones externas y las internas para obtener los coeficientes efectivos, por lo cual las ecuaciones de C son las siguientes:

$$\begin{array}{lll}
 C_{1e} = C_1 + C_{+i} & C_{2e} = C_2 + C_{-i} & C_{3e} = C_2 + C_{-i} \\
 C_{4e} = C_2 + C_{-i} & C_{5e} = C_2 + C_{-i} & C_{6e} = C_2 + C_{-i} \\
 C_{7e} = C_2 + C_{-i} & C_{8e} = C_2 + C_{-i} & C_{9e} = C_2 + C_{-i}
 \end{array}$$

Ahora ya se tienen todos los datos disponibles para calcular las presiones efectivas, obteniendo así las expresiones que a continuación se muestran:

$$P_{1e} = 0.005 \left(\frac{8+a}{8+2a} \right) * C_{1e} * (K_1 K_2 V_o)^2$$

$$P_{2e} = 0.005 \left(\frac{8+a}{8+2a} \right) * C_{2e} * (K_1 K_2 V_o)^2$$

$$P_{3e} = 0.005 \left(\frac{8+a}{8+2a} \right) * C_{3e} * (K_1 K_2 V_o)^2$$

$$P_{4e} = 0.005 \left(\frac{8+a}{8+2a} \right) * C_{4e} * (K_1 K_2 V_o)^2$$

$$P_{5e} = 0.005 \left(\frac{8+a}{8+2a} \right) * C_{5e} * (K_1 K_2 V_o)^2$$

$$P_{6e} = 0.005 \left(\frac{8+a}{8+2a} \right) * C_{6e} * (K_1 K_2 V_o)^2$$

$$P_{7e} = 0.005 \left(\frac{8+a}{8+2a} \right) * C_{8e} * (K_1 K_2 V_o)^2$$

$$P_{9e} = 0.005 \left(\frac{8 + a}{8 + 2a} \right) * C_{9e} * (K_1 K_2 V_o)^2$$

6.1.4.2. Viento actuando paralelamente a las generatrices.

Las presiones con las siguientes variables C_{10} (superficie de barlovento), C_{11} (zona de barlovento), C_{12} (zona central), C_{13} (zona de sotavento) y C_{14} (superficie de sotavento).

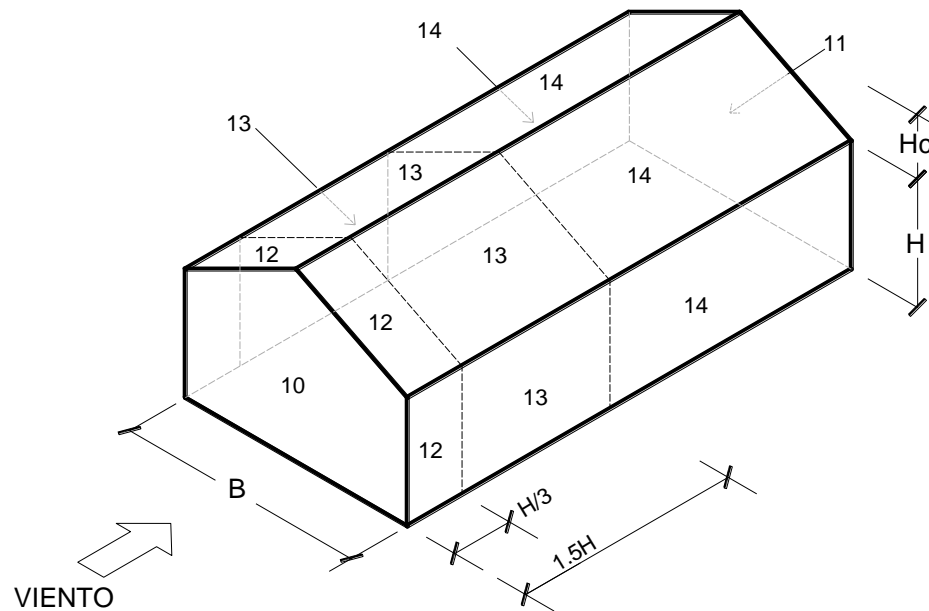


Figura 5. 3 Zonas de los coeficientes de empuje, cuando el viento actúa paralelamente a las generatrices.

Fuente: propia

Por lo que la ecuación se expresa como se muestra a continuación:

$$P = 0.005 \left(\frac{8 + a}{8 + 2a} \right) * C_j * (K_1 K_2 V_o)^2$$

Donde: C_j = cada uno de los coeficientes calculados.

Ahora como ya se tienen los porcentajes de aberturas, solo es necesario establecer a que condición pertenecen si es barlovento o sotavento.

Por lo que las expresiones resultan de la manera siguiente:

- Para la superficie de barlovento

$$C_{1j} = 0.8 \frac{\left(\frac{\Sigma(l * h)}{B * H} x 100 \right)}{30} \pm 0.30 \left(1 - \frac{\Sigma(l * h)}{B * H} x 100 \right)$$

por lo cual resultan C_{+1j} y C_{-1j} .

- Para la superficie de sotavento

$$C_{2j} = -0.6 \frac{\left(\frac{\Sigma(l * h)}{B * H} x 100 \right)}{30} \pm 0.30 \left(1 - \frac{\Sigma(l * h)}{B * H} x 100 \right)$$

Obteniéndose entonces C_{+2j} y C_{-2j}

- Para la zonas laterales:

$$C_{3j} = 0.8 \frac{\left(\frac{\Sigma(l * h)}{L * H} x 100 \right)}{30} \pm 0.30 \left(1 - \frac{\Sigma(l * h)}{L * H} x 100 \right)$$

Resultando así C_{+3j} y C_{-3j}

Sumas:

$$C_{+j} = C_{+1j} + C_{+2j} + C_{+3j}$$

$$C_{-j} = C_{-1j} + C_{-2j} + C_{-3j}$$

Ahora también se deberán sumar los valores de las presiones externas y las internas para obtener los coeficientes efectivos, obteniendo entonces las expresiones siguientes:

$$C_{10e} = C_{10} + C_{+j}$$

$$C_{11e} = C_{11} + C_{-j}$$

$$C_{12e} = C_{12} + C_{-j}$$

$$C_{13e} = C_{13} + C_{-j}$$

$$C_{14e} = C_{14} + C_{-j}$$

Como ya se obtuvieron todos los datos, ahora se procede a calcular las presiones efectivas, surgiendo las expresiones que se muestran o continuación:

$$P_{10e} = 0.005 \left(\frac{8+a}{8+2a} \right) * C_{10e} * (K_1 K_2 V_o)^2$$

$$P_{11e} = 0.005 \left(\frac{8+a}{8+2a} \right) * C_{11e} * (K_1 K_2 V_o)^2$$

$$P_{12e} = 0.005 \left(\frac{8+a}{8+2a} \right) * C_{12e} * (K_1 K_2 V_o)^2$$

$$P_{13e} = 0.005 \left(\frac{8+a}{8+2a} \right) * C_{13e} * (K_1 K_2 V_o)^2$$

$$P_{14e} = 0.005 \left(\frac{8+a}{8+2a} \right) * C_{14e} * (K_1 K_2 V_o)^2$$

6.2 Análisis de los largueros.

Para el análisis de los largueros es necesario conocer el tipo de materiales que se desea emplear por consiguiente se realizarán los siguientes pasos:

a) Especificaciones:

i. Materiales: Lamina y sus características como el calibre

Tipos de perfiles.

Tipos de acero y sus límites de fluencia.

Etcétera.

ii. Reglamentos: que en este caso se utilizará el Reglamento de Construcciones del Estado de Michoacán.

b) El segundo paso es el análisis de cargas.

a) Se establece el peso de la lámina " W_c " proporcionada por el fabricante en Kg/m^2 .

b) Se estima el peso que soportará el larguero " W_L " (en Kg/m) y se propone un perfil el cual se considerará es la solución

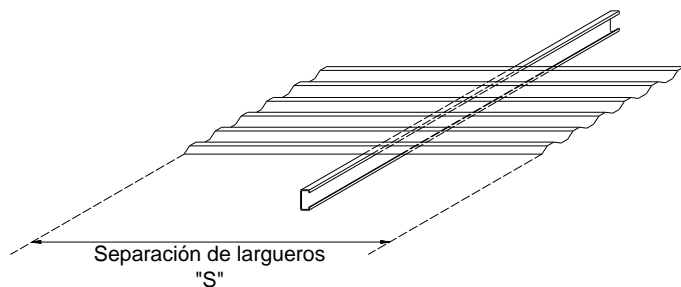


Figura 5. 4 Separación de largueros
Fuente: Propia

Ahora bien, si se utiliza algún software como el Sap2000 no es necesario considerar el peso del larguero manualmente, puesto que en el programa se propone un perfil como larguero y éste considera el peso propio del perfil al momento de correr la partida.

Por lo tanto la expresión que resulta para estimar el peso que recibirá el larguero será la siguiente:

$$W_L = W_C * S$$

Donde: W_L = Peso transmitido al larguero; en Kg/m

W_C = Peso de la lámina; en Kg/m².

S = Separación de los largueros; en m.

Así mismo, ahora se proponen la ecuación correspondiente al tema de investigación, es decir se establecen las expresiones para realizar el análisis con granizo de las cubiertas de naves industriales:

- i. Cubiertas a una sola agua y a dos aguas.

La hipótesis de cálculo numérico, se considerará que para las pendientes en estudio es válido asumir que capa acumulada tiene un espesor uniforme promedio como se muestra en la figura siguiente:

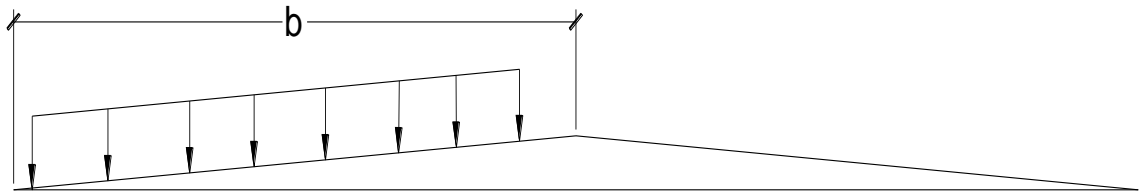


Figura 5. 5 Hipótesis para distribuir acumulación de granizo en un ancho “b” para cubiertas a una y a dos aguas.
(Fuente: propia)

Por lo tanto la expresión general que representará la carga actuante de granizo será la siguiente:

$$W_G = \gamma_G * d_m$$

Donde: W_G = carga actuante por granizo; en Kg/m².

γ_G = Peso específico del granizo (0.92 ton/m³)

d_m = Altura de la capa de granizo máxima de la región, en m.

La expresión mostrada anteriormente se propone únicamente cuando la pendiente de la cubierta no sea mayor del 10%, puesto que, con pendientes iguales o menores el granizo pudiera acumularse en capas prácticamente uniformes en toda la superficie.

Entonces la expresión que representa la carga que deberá soportar el larguero en cubiertas a una y a dos aguas queda de la manera siguiente:

$$W_L = (W_C + W_G)S$$

De igual manera para estimar el peso ocasionado por el granizo en cubiertas circulares de medio punto, se propone la siguiente hipótesis:

Se considerará una capa uniforme de granizo en el área donde la curva tienda a ser horizontal, como se muestra en la figura siguiente:

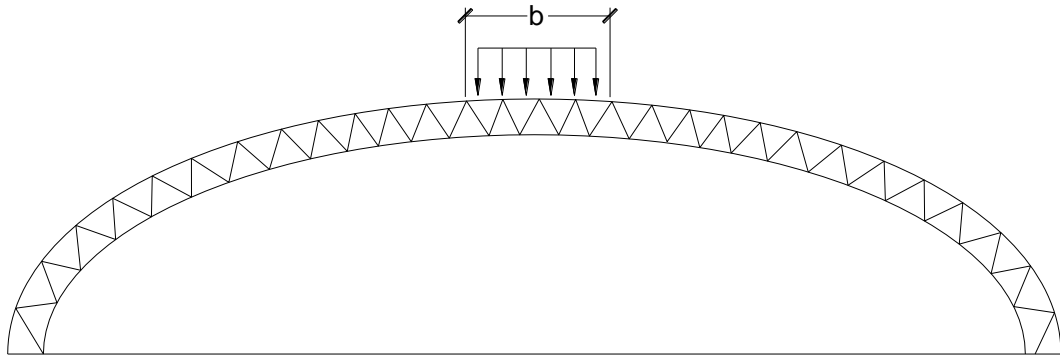


Figura 5. 6 Hipótesis para distribuir acumulación de granizo en un ancho “b” cubiertas circulares de medio punto
(Fuente: propia)

Por lo tanto solo aquellos largueros que se encuentren en la zona donde la pendiente tiende a ser cero se considerará la carga provocada por el granizo con la misma expresión anterior.

Así mismo, para cubiertas con claros múltiples la carga provocada por el granizo se propone analizarse de la siguiente manera:

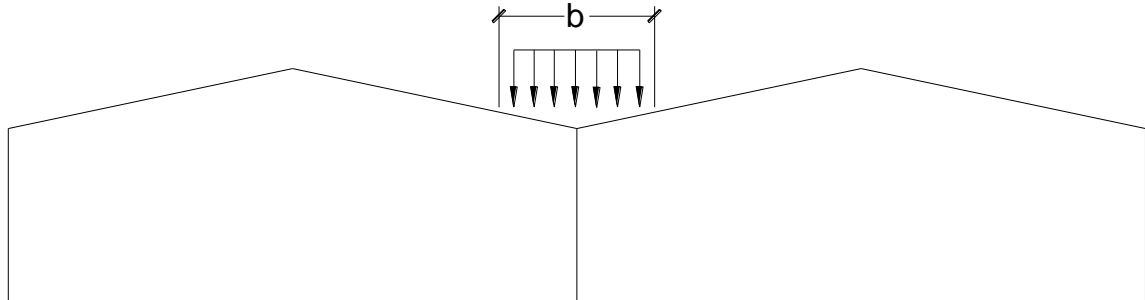


Figura 5. 7 Hipótesis de distribución de carga en un ancho “b” en cubiertas con claros múltiples
(Fuente: propia)

Para este tipo de cubiertas se propone que la carga producida por el granizo se estimará de la siguiente manera:

$$A_G = L * d_m \quad . \quad . \quad . \quad Ec. 1$$

Donde: A_G = Área de la sección transversal de la capa de granizo; en m^2 .

L = Distancia entre cubiertas; en m.

d_m = Altura de la capa de granizo máxima de la región, en m.

ahora para transformar esa área hipotética rectangular a una área triangular primero se parte de la ecuación del área del triángulo:

$$A_G = \frac{bh}{2} \quad . \quad . \quad . \quad Ec. 2$$

Entonces se obtiene una ecuación con dos incógnitas, por lo que se recurre a la trigonometría para resolver el problema, como se forma un triángulo, éste se puede dividir en triángulos rectángulos haciendo más sencillo el problema y mediante el uso de la tangente de un ángulo se obtiene la siguiente expresión:

$$h = \frac{b}{2} \tan \theta \quad \text{ Ec. 3}$$

sustituyendo la ecuación 3 en 2

$$2A_G = \frac{b^2}{2} \tan \theta$$

Despejando b

$$b = \sqrt{\frac{4A_G}{\tan \theta}}$$

Sustituyendo AG de la ecuación 1

$$b = \sqrt{\frac{4(L * d_m)}{\tan \theta}}$$

Ahora ya se tienen las dos dimensiones de la acumulación de granizo se puede estimar la carga unitaria ocasionada por éste, por lo tanto se propone la siguiente expresión:

$$W_G = \gamma_G * b * h * S$$

Donde: W_G = carga unitaria producida por el granizo; en ton/m.

γ_G = Peso específico del granizo (0.92 ton/m^3)

b = longitud de la base del triángulo que forma el granizo entre las cubiertas; en m.

h = espesor de granizo máximo o altura del triángulo que forma el granizo entre las cubiertas; en m.

S = separación entre los largueros; en m.

Ahora como ya se tienen las expresiones correspondientes para cada caso de cubierta se procede a determinar las cargas sobre el larguero, esto se propone que se realice de la misma manera que se ha hecho, solo que, la diferencia radica en la carga que ocasiona el granizo con las expresiones establecidas anteriormente; es decir que existirá el peso de la lámina, la carga de montaje que se propone y la carga por granizo,

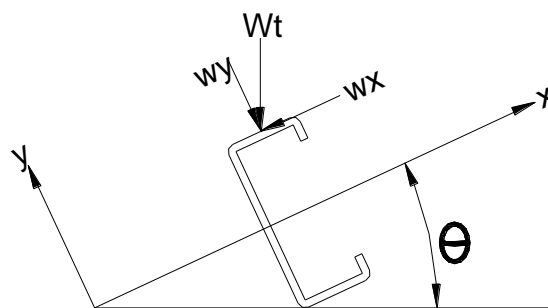


Figura 5. 8 Representación de las cargas actuantes sobre el larguero

(Fuente: propia)

Como ya se sabe se considera una carga de montaje P_m al centro del larguero con un ángulo “ θ ” por lo cual se obtienen cargas en la dirección “x” y “y” del eje del larguero, por consiguiente se tienen las siguientes ecuaciones:

$$w_x = W_L \sin \theta$$

$$w_y = W_L \cos \theta$$

$$P_{mx} = P_m \sin \theta$$

$$P_{my} = P_m \cos \theta$$

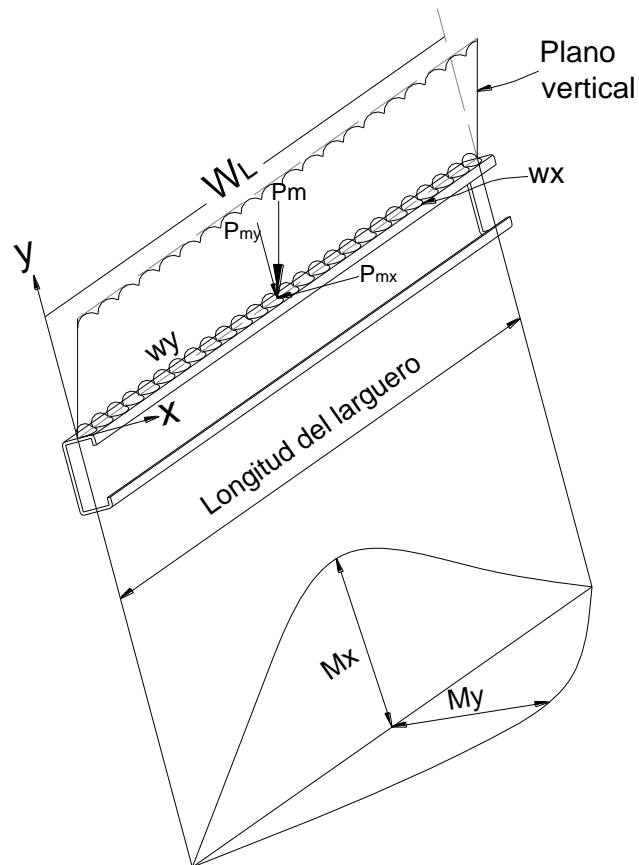


Figura 5. 9 Cargas actuantes y momentos que se generan en el larguero

(Fuente: propia)

Los momentos se valuarán con las expresiones que establece el Reglamento de Construcciones del Estado de Michoacán, las cuales son las siguientes:

$$M_x = \frac{w_y L^2}{8} + \frac{P_{my} L}{4}$$

$$M_y = \frac{w_x L^2}{8} + \frac{P_{mx} L}{4}$$

Una vez valuado los momentos se realiza la fórmula de interacción:

$$\frac{\frac{M_x}{S_x}}{F_{bx}} + \frac{\frac{M_y}{S_y}}{F_{by}} \leq 1.0$$

Y cuando se trate de perfiles formados en frio se utiliza la ecuación:

$$f_{bx} + f_{by} \leq F_b$$

Ahora se revisa el perfil bajo los efectos del viento con el valor más desfavorable de presión o succión según sea el caso, de acuerdo con lo establecido al Reglamento de Construcciones del Estado de Michoacán.

Una vez analizados todos los largueros se procede a diseñar la armadura y para esto hay dos opciones para realizarlo:

a) Mediante métodos manuales: se estima el peso de la armadura por

$$\text{medio de la fórmula de Fleming } W = 0.985 \sqrt{\frac{w a}{s}} (43.055 L^2 + 196.85 L)$$

Donde: W = peso total de la armadura; en Kg

w = carga vertical total (peso de la cubierta); en Kg/m^2 .

a = distancia centro a centro de armaduras; en m.

s = esfuerzo de fluencia del acero; Kg/cm^2 .

L = Claro de la armadura; en m.

Además se puede analizar la armadura por el método de los nodos, rigideces, flexibilidades, etc.

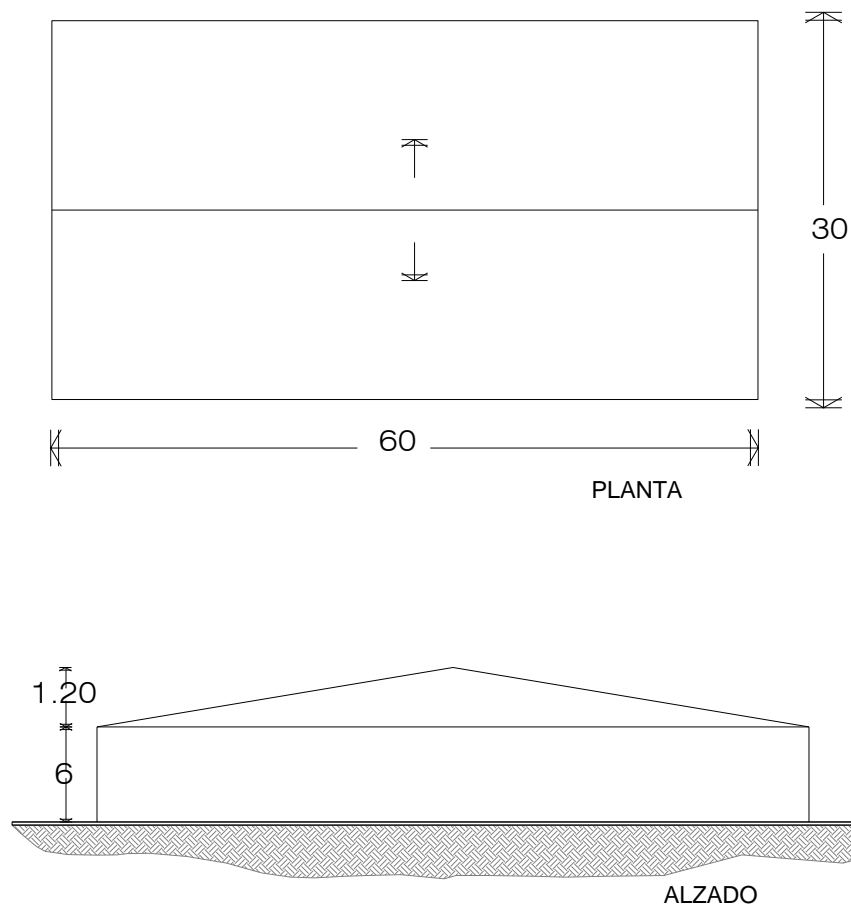
- b) Mediante el uso de software: si se utilizan programas de computadora en la mayoría de las ocasiones no es necesario estimar el peso de la armadura, puesto que el programa lo contempla en su análisis.

Por último se diseñan los elementos de la armadura, mediante cualquier método de diseño vigente en el Reglamento de Construcciones del Estado de Michoacán, aunque se recomienda que sea mediante el método de esfuerzos permisibles, ya que este método es uno de los métodos elásticos.

Luego de presentar las propuestas anteriores se puede apreciar que es necesario e importante, incluir en el Reglamento de Construcciones del Estado de Michoacán un apartado de normas para el diseño de cubiertas de naves industriales por granizo, debido a que éste presenta un peso específico similar al del agua en estado líquido, así mismo, se requieren los estudios correspondientes de este fenómeno meteorológico, puesto que hasta ahora no se tiene la información necesaria para realizar un diseño óptimo y sobre todo económico, que la seguridad necesaria para el buen funcionamiento de la misma.

6.3 Comparación de cargas

A partir de las hipótesis antes planteadas se hará una comparación únicamente por cargas muertas, es decir se despreciará el efecto del viento, en una cubierta a dos aguas, la cual tendrá 30m de ancho, 60m de largo, la pendiente de la cubierta del 8%, la separación entre armaduras de 6m y la separación entre largueros (CP2 6" x 2 1/2" calibre 14) es 1.25 m.



Como no se cuenta con datos de granizo, se supondrá que la cantidad de granizo máxima registrada en la región es de 20 mm de espesor por lo tanto el análisis se realizará de la manera como se muestra a continuación:

a) Análisis de la carga permanente:

- El peso de la lámina se estimará que es de 5.0 Kg/m².
- El peso del larguero es de 4.5 Kg/m.

Analizando la carga actuante en uno de los largueros con la expresión que se muestra enseguida:

$$W_L = (\text{Separación de largueros})(W_{\text{lamina}})$$

Sustituyendo valores:

$$W_L = (1.25)(5.0)$$

Al realizar las operaciones resulta que la carga actuante sobre el larguero es de 6.25 Kg/m

Ahora como se analizará en dos dimensiones se deberá considerar el peso propio de los largueros, por lo que resulta lo siguiente:

$$W_T = (6.25 + 4.5)(6)$$

El peso actuante sobre el nodo de la armadura es de $W_T = 64.5$ Kg

b) Análisis de la carga producida por del granizo.

Se hará uso de la expresión general para estimar la carga por granizo:

$$W_G=(920)(0.02)$$

Realizando operaciones:

La carga por granizo es de 18.4 Kg/m²

Ahora se calculará la carga actuante sobre el mismo larguero de la misma manera que por carga muerta.

$$W_L=(5.0+18.4)1.25$$

Por lo tanto la carga actuante sobre el larguero es 29.2 Kg/m

entonces el peso total transmitido al nodo es el siguiente:

$$W_T=(29.2+4.5)(6)$$

$$W_T=202.2 \text{ Kg}$$

Haciendo la comparación de los dos casos:

Carga muerta = 64.5 Kg

Carga muerta + granizo = 202.2 Kg

Como se puede observar el análisis con granizo resulta un valor de más de 3 veces mayor que el análisis por carga muerta, por lo que se puede establecer que el granizo al acumularse provoca mayor carga que el peso propio de la cubierta.

CONCLUSIONES

Como conclusión de la presente investigación se puede establecer que el campo de la ingeniería estructural no ha sido en su totalidad definitiva, esto debido a que, cada vez surgen nuevas ideas, necesidades y fenómenos naturales que obligan a esta ciencia a establecer criterios e investigaciones con el fin de obtener un conocimiento más allá de lo que se tenía pensado.

El objetivo de la presente investigación fue proponer un análisis por granizo en las cubiertas de naves industriales, ya que hasta la fecha no se tiene contemplado ese fenómeno natural en análisis de dichas construcciones, dicho objetivo se cumplió satisfactoriamente pues se propusieron las expresiones que pueden ser útiles para una modificación futura al Reglamento de Construcciones del Estado de Michoacán.

Con respecto a los objetivos particulares la investigación consistió en conocer la historia del acero, así como, caracterizar a éste como material estructural analizando la curva esfuerzo –deformación, teniendo en cuenta que existen diversos tipos de acero, estableciendo sus ventajas para resolver los distintos problemas que se tengan al momento del diseño estructural, pero también las desventajas que este material presenta.

Así mismo, se mencionaron los perfiles estructurales más comunes en el diseño y construcción de naves industriales, de igual manera se señalaron los puntos críticos donde el granizo se acumula en las cubiertas de naves industriales,

ahora bien, los tipos de cubiertas más utilizados son los de una y dos aguas, circulares de medio punto, diente de sierra y cubiertas con claros múltiples.

Por otra parte, también se mencionaron las normas correspondientes al análisis y diseño de cubiertas, tanto por cargas muertas como para efecto del viento, además, se mencionó el criterio de diseño que marca el Reglamento de Construcciones del Estado de Michoacán.

De igual manera, se establecieron las ecuaciones correspondientes al tema de investigación, de una manera satisfactoria, y se estableció la ventaja de analizar y diseñar por granizo una cubierta de nave industrial, para que ésta se encuentre dentro de los niveles de seguridad que indica el Reglamento.

Por otro lado, la pregunta de investigación fue ¿Por qué se debe analizar por granizo las cubiertas de naves industriales en el estado de Michoacán? y la respuesta a la que se llegó, es que, el granizo provoca una gran sobrecarga que de no considerarse en el análisis y diseño de las cubiertas, llegan a colapsarse, causando grandes pérdidas económicas y daños a la seguridad de las personas que se encuentren en el interior de la nave.

Así mismo, los principales hallazgos teóricos encontrados en la presente investigación se plantean a continuación:

- a) Conocer la historia del acero.
- b) Las desventajas que tiene el acero y sus componentes como el hierro que representa el 98% y pequeñas cantidades de carbono, manganeso,

azufre, silicio, fósforo, y algunos otros elementos, algunos de los tratamientos que se le puede dar al acero, así como diferentes tipos de aceros más comunes en las construcciones.

- c) El descubrimiento de la existencia de diferentes tipos de armaduras como las simples, compuestas y complejas.
- d) Y lo más importante fue que, el granizo tiende a ser igual de denso que el agua en estado líquido pero con la diferencia que éste se puede acumular muy fácilmente en cualquier superficie causando graves daños a las estructuras.

BIBLIOGRFIA

Beaufait, Fred W. (1997)

Análisis Estructural.

Ed. Precentice-Hall, Colombia.

Bowles, Joseph E. (1989)

Diseño de acero estructural

Ed. Limusa, México, D.F.

C. McCormac, Jack. (1983)

Análisis estructural

Ed. Harla, México, tercera edición.

C. McCormac, Jack. (1999)

Diseño de estructuras de acero

Ed. Alfaomega, México, D.F.

Camba C., José Luis, Chácon G., Francisco, Pérez A., Francisco. (1982)

Apuntes de análisis estructural I

Facultad de ingeniería UNAM.

Castillo, Humberto (1998)

Análisis y diseño de estructuras, tomo 1.

Ed. Alfaomega, México, D.F.

Hernández Sampieri, Roberto y Cols. (2004)

Metodología de la investigación

Ed. Mc Graw Hill, México.

Jurado Reyes, Yolanda (2005)

Técnicas de investigación documental

Ed. Thomson, México.

M. Leet, Kenneth (2006)

Fundamentos de análisis estructural.

Ed. Mc Graw-Hill, México, D.F.

Piralla Meli (2008)

Diseño estructural

Ed. Limusa, México, D.F.

S. Merritt, Frederick (2000)

Manual del ingeniero civil, tomo II.

Ed. McGRAW-Hill, México.

Tavera y Moreno (1990)

Manual de diseño, Volumen 2

Ed. Universitaria, Michoacan.

ANEXO 1

(MAPA DE REGIONALIZACION DE VIENTO)

