

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DEL USO DEL ACERO EN SISTEMAS  
ESTRUCTURALES DE EDIFICIOS**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachillera en  
Ciencias con mención en Ingeniería Civil**

**AUTORA:**

Prada Conde, Grecia Chijei

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachiller en  
Ciencias con mención en Ingeniería Civil**

**AUTOR:**

Malca Valderrama, Orlando Javier

Lira Vargas, Gerardo Antonio

Olarte Bustinza, Jafet Fabricio

Díaz Cobeña, Marcelo Eduardo

**ASESOR:**

Villagómez Molero, Diego

Lima, enero, 2022

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación consiste en determinar las principales razones por las cuales, el acero debería ser una alternativa importante para el diseño y construcción de sistemas estructurales sismorresistentes de edificios en el Perú. En primera instancia, la investigación consistió en revisar el panorama actual de la construcción en el país, determinando las principales causas por las que se sigue masificando el uso del concreto armado para el diseño y construcción de sistemas estructurales de edificios, sin dar paso al uso de materiales con propiedades estructurales tan eficientes como el acero. Luego, se establecieron las principales ventajas de este material como elemento estructural sismorresistente; lo cual fue el punto de partida para el análisis de factibilidad del uso del acero en los sistemas estructurales de edificios.

Asimismo, la presente investigación tuvo una metodología cualitativa, para lo cual se revisaron numerosas fuentes bibliográficas, extrayendo apartados que resulten importantes para el desarrollo de la investigación. En ese sentido, se abordó el trabajo de investigación con los siguientes puntos principales:

- *Revisión de Literatura.* Se presenta de manera breve la historia del uso del acero como material de construcción, así como sus principales usos en la actual industria peruana, se resume de manera breve la normativa nacional e internacional para el diseño de sistemas estructurales de acero y se enumera las principales propiedades estructurales del acero.
- *Desarrollo de la investigación.* Se presenta las principales consideraciones para el diseño de estructuras de acero, donde se mencionan las consideraciones para la estructuración, cargas, métodos y verificaciones de diseño; además, los principales sistemas estructurales planteados en la normativa. Por otro lado, se identifica y desarrolla las principales ventajas del uso del acero como material de miembros estructurales y se desarrolla un análisis de factibilidad para su uso en la construcción.

La investigación desarrollada permitió obtener conclusiones y recomendaciones finales, que se detallan en el capítulo final del presente trabajo de investigación. Lo cual, pretende ser de utilidad para estudiantes y empresas del sector construcción, como una fuente inicial de información para detectar los principales problemas y soluciones ante el actual estado de estancamiento en el desarrollo de edificios de acero estructural en el país. De modo que, se brinde un impulso para el

desarrollo, especialización y masificación del acero como material en sistemas estructurales sismorresistentes de edificios.



# Índice

1.	Generalidades .....	1
1.1.	Introducción .....	1
1.2.	Justificación.....	1
1.3.	Alcances .....	2
1.4.	Objetivos.....	2
1.4.1.	Objetivo General .....	2
1.4.2.	Objetivos Específicos .....	2
1.5.	Metodología .....	3
2.	Revisión de Literatura.....	4
2.1.	Antecedentes .....	4
2.1.1.	Historia uso del acero en construcción .....	4
2.1.2.	Usos frecuentes de estructuras de acero en Perú .....	5
2.2.	Norma Técnica de Estructuras Metálicas E.090.....	6
2.3.	Normas Internacionales .....	9
2.4.	Propiedades del acero .....	11
2.4.1.	Resistencia: .....	11
2.4.2.	Uniformidad y Durabilidad:.....	11
2.4.3.	Elasticidad:.....	11
2.4.4.	Ductilidad: .....	12
3.	Desarrollo de la investigación .....	13
3.1.	Consideraciones para el diseño de estructuras de acero.....	13
3.1.1.	Consideraciones para estructuración de edificaciones metálicas .....	13
3.1.2.	Perfiles estructurales usados .....	13
3.1.3.	Cargas sobre la estructura.....	14
3.1.4.	Métodos de diseño de elementos estructurales para edificaciones metálicas .....	15
3.1.5.	Principales verificaciones de diseño en elementos estructurales para edificaciones metálicas	16
3.1.6.	Sistemas estructurales para edificaciones en acero: .....	20
3.1.7.	Conexiones.....	24
3.1.8.	Seguridad contra fuego y corrosión.....	25
3.1.9.	Sistemas compuestos .....	25
3.2.	Ventajas del uso de acero .....	27
3.2.1.	Luces .....	27
3.2.2.	Fabricación.....	28
3.2.3.	Disponibilidad .....	30

3.2.4.	Costos y plazos de ejecución.....	31
3.2.5.	Seguridad y comportamiento de edificios de acero .....	32
3.2.6.	Medio Ambiente .....	34
3.3.	Ejemplos de edificaciones de acero.....	34
3.4.	Análisis de factibilidad del uso de acero estructural en edificaciones.....	36
4.	Conclusiones y recomendaciones .....	38
4.1.	Conclusiones .....	38
4.2.	Recomendaciones.....	39
5.	Referencias.....	40



## Índice de Figuras

Figura N°1. Edificio Seagram Building.....	5
Tomado de Instituto Técnico de la Estructura en Acero (2021).....	5
Figura N°2. Gráfico tensión vs deformación.....	11
Figura N°3. Secciones de los diferentes tipos de perfiles .....	14
Figura N°4. Compresión axial presente en las barras de armadura.....	18
Figura N°5. Secciones transversales típicas de miembros en compresión axial .....	18
Figura N°6. Solicitaciones de una viga típica con carga uniforme (Flexión y cortante) .	19
Figura N°7. Secciones transversales típicas de miembros en flexión.....	19
Figura N°8. (1) Vigas de gran claro (2) Vigas laminadas IR .....	20
Figura N°9. Vista de una estructura de pórticos no arriostrados para un edificio comercial	21
Figura N°10. (1) Detalle del nudo de un pórtico arriostrado con una conexión concéntrica. (2) Configuraciones típicas para pórticos arriostrados concéntricamente (a)Riostras en X, (b) en K, (c) en diagonal, (d) en V invertida, (e) en V.....	22
Figura N°11. Vista pórtico arriostrado de acero para rehabilitación de estructura existente de concreto armado .....	23
Figura N°12. Configuraciones para pórticos arriostrados excéntricamente.....	24
Figura N°13. Distancia entre columnas de acero. Fuente: ITEA. ....	28

# **1. Generalidades**

## **1.1. Introducción**

En el Perú se puede encontrar construcciones de concreto armado, acero, madera, adobe, entre otras. Cada uno de estos materiales poseen propiedades particulares que ofrecen ventajas y desventajas relacionadas con la velocidad de construcción, la reducción del área útil de la obra, inversión inicial, disponibilidad de materiales, mano de obra y equipos, el costo de mantenimiento durante la vida útil de la estructura, constructibilidad, seguridad de las instalaciones y su impacto ambiental (Calvalcanti & Rodriguez, 2020). No obstante, la elección del sistema estructural en proyectos de edificaciones es poco versátil en el Perú; debido a que la mayor parte de edificaciones son de concreto armado o albañilería confinada.

En base a ello, surgen las siguientes interrogantes: ¿por qué existen pocas edificaciones de acero en nuestro país?, ¿por qué en los centros comerciales sí es muy utilizado este sistema estructural?, ¿es viable introducir este tipo de estructuras en el sector peruano con el fin de modernizar los métodos constructivos en uno más rápido? Más aún cuando “el Perú se ha convertido en el quinto productor de acero de Latinoamérica; cuya industria siderúrgica está conformada por dos empresas (Corporación Aceros Arequipa S.A. [Aceros Arequipa] y SIDERPERU) que en conjunto facturan más de S/ 4,203 millones de soles al año” (Calvalcanti & Rodriguez, 2020, pag.54). Y, si bien un gran porcentaje de la producción de acero es destinada al sector de la construcción (concreto armado); en los últimos años, se ha visto un incremento en la construcción de estructuras de acero. Entonces, si en primera instancia parece que se cuenta con el material necesario para la realización de edificaciones de acero ¿cuáles son las otras limitaciones? Aun cuando el acero sea un material que, en comparación con los otros tradicionales en nuestro país, pueda originar estructuras de menor rigidez no debería ser una limitante para la cristalización de proyectos de gran envergadura, pues brinda diversas ventajas, las cuales serán detalladas a lo largo del trabajo de investigación.

## **1.2. Justificación**

Según el informe nacional “Perú: Perfil Sociodemográfico” realizado por el INEI en el año 2017, la mayoría de ciudadanos peruanos residen en viviendas cuyo techo está formado por materiales tales como concreto armado (42.8%) y planchas de calamina o fibras de cemento (39.2%); así mismo, los materiales predominantes utilizados en la construcción de las paredes exteriores de dichas viviendas son de ladrillo (55.8%) y adobe (27.9%). Por lo tanto, se puede deducir que la mayoría de sistemas estructurales utilizados están formados por elementos de



concreto armado, lo cual resulta preocupante, debido a que su uso es masivo y aplastante en comparación al uso de sistemas estructurales de acero. Como consecuencia de la poca o nula demanda de este tipo de productos, la mayoría de las industrias del sector construcción no ofrece servicios relacionados a la construcción de edificios que estén formados por sistemas estructurales de acero.

Por lo tanto, en este trabajo de investigación, se quiere identificar los argumentos por los cuales no se utiliza elementos de acero para la formación de sistemas estructurales; además, de describir, y detallar el diseño y el funcionamiento de edificaciones que contengan estos tipos de sistema con la finalidad de indicar las circunstancias en las que su uso podría presentar una ventaja con respecto al uso de otros sistemas estructurales, particularmente con las de concreto armado.

### **1.3. Alcances**

El presente trabajo de investigación tiene como alcance determinar bajo qué circunstancias el uso de estructuras de acero podría ser viable en nuestro país. Mediante el estudio del comportamiento antes eventos sísmicos y las consideraciones necesarias para el diseño de este sistema estructural. De manera que, se puedan establecer ventajas ante otras estructuras convencionales, como las de concreto armado y evaluar otros aspectos que podrían resultar útiles en proyectos de edificaciones.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General**

- Indicar las circunstancias en las cuales podría ser viable o masificarse el uso de estructuras de acero para edificios en el país.

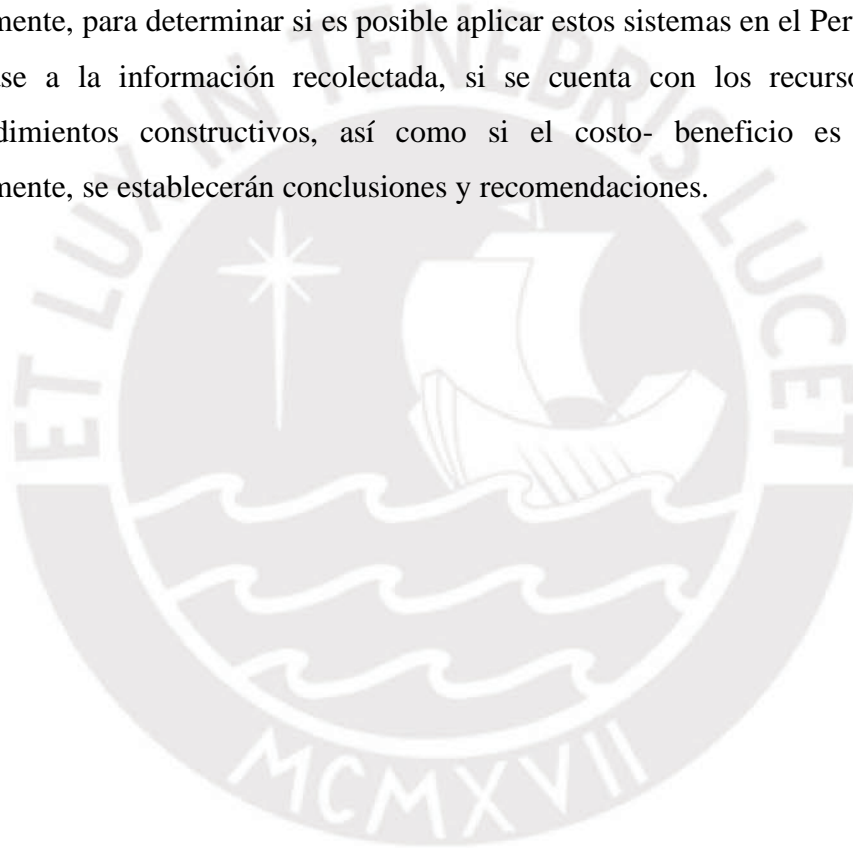
#### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Describir los sistemas sismorresistentes conformados por elementos de acero estructural.
- Explicar consideraciones para el diseño estructural de este tipo de edificaciones.
- Dar a conocer las ventajas de usar sistemas estructurales de acero.
- Mostrar y describir edificios reales que tengan este sistema estructural.



## 1.5. Metodología

- Se presentará una breve reseña histórica sobre el uso del acero. Además, se presenta la Norma E.090 y las Normas internaciones; así como describir las propiedades del acero.
- Se presentan las consideraciones que se deben tener en cuenta en el diseño de estructuras de acero considerando el diseño sismorresistente, para ello se hará uso de normas nacionales e internacionales para definir los requisitos mínimos para un correcto desempeño ante eventos sísmicos.
- Se presentan las ventajas técnicas, económicas y constructivas de las estructuras de acero frente a estructuras convencionales de concreto armado.
- Finalmente, para determinar si es posible aplicar estos sistemas en el Perú, se analizará en base a la información recolectada, si se cuenta con los recursos necesarios, procedimientos constructivos, así como si el costo- beneficio es el adecuado. Finalmente, se establecerán conclusiones y recomendaciones.



## **2. Revisión de Literatura**

### **2.1. Antecedentes**

#### **2.1.1. Historia uso del acero en construcción**

El acero es un material que se encuentra formado por una aleación de dos elementos: hierro y carbono (Cárdenas, Pérez & Sanchez, 2012). Dichos materiales, que componen el acero, se encuentran en abundancia en la corteza terrestre; esta afirmación inicialmente haría suponer que el acero es un material fabricado en grandes proporciones; sin embargo, esta suposición es errada, ya que el proceso de fabricación, al utilizar alta tecnología en sus procesos, influye notablemente en la producción de este material y, como consecuencia, no se genera en cantidades masivas. Según la opinión del autor Cárdenas (2012), el acero, al estar formado por el hierro, conserva las características metálicas de este elemento; no obstante, cuando la estructura cristalina del hierro se empieza a transformar a causa de un cambio de temperatura, llega a una temperatura crítica donde se disuelve una gran cantidad de carbono; posteriormente, se realiza un tratamiento térmico para que este material pueda mejorar sus propiedades y se convierta en acero.

Según el autor García (2019), esta historia comienza aproximadamente en el año 3000 a.c. en Egipto cuando un grupo de arqueólogos encontró una serie de artefactos de hierro que datan de dicha época; sin embargo, no se sabe con exactitud qué métodos se emplearon para fundir dicho mineral. No obstante, el autor García (2019) también menciona que los griegos ejercían tratamientos térmicos con la finalidad de endurecer sus armas en el año 1000 a.c. aproximadamente. Así mismo, durante esas épocas, se puede afirmar que, mediante la aplicación de técnicas especiales, se crearon aleaciones particulares como la de hierro forjado, la cual se podría decir que se convirtió en una de las primeras aleaciones de acero.

Entre los años 1850 y 1900, se empleó el hierro forjado para el sector de la construcción, debido a que es un material resistente a la tracción, compresión y dúctil; no obstante, tenía cierta limitación para darle formas estructurales y de decoración. No fue hasta que, en 1880, el horno abierto de Siemens-Martin permitió que el acero se usara ampliamente en la construcción y en la industria naval (ITEA, pág. 86); debido a que, al ser una aleación de hierro-carbono, posee una mayor ductilidad, dureza, resistencia y maleabilidad que el hierro (Laminas y Aceros, 2019). Estas ventajas permitieron que el acero superará al hierro, pues permitió construir puentes con mayores luces y alturas, así como la construcción de “rascacielos” de gran altura.

Es importante resaltar que, durante el siglo XIX, en el cual predominaba el hierro, se construyeron tres obras significativas que ayudarían a impulsar a emplear el acero en la construcción de edificios: El Palacio de Cristal construida en Londres en 1851, La Galerie des Machine o La Galería de las Máquinas en París, 1889 y la torre Eiffel, 1887 (Ingenieros Asesores, 2021). Fue en Europa que apareció uno de los primeros edificios construidos con acero, este es el bloque de oficinas de Chedanne en 124 Rue Reaumur, París, 1904. Y, uno de los más distintivos en construirse en Gran Bretaña fue el Hotel Ritz, formado por pilares de acero que fueron protegidos contra el fuego con hormigón u otro material, el cual tuvo una mayor velocidad de ejecución comparada con otros sistemas constructivos. Conforme el reglamento de construcción de acero se iba mejorando, el número de edificios de acero iba en aumento, sobre todo en EEUU; en donde, se construyen edificios más altos como el Chrysler o el Empire State en Nueva York. “Después de la Segunda Guerra Mundial, se les dio un nuevo enfoque arquitectónico a las estructuras de acero, pues ahora se empleaba fachadas compuestas por unidades prefabricadas y suspendidas delante del pórtico estructural; este sistema permitía un ahorro en espacio, tiempo y peso, al tiempo que permitía dar una mejor expresión al vidrio y al acero; tal y como se aprecia en la imagen N°1”. (ITEA, pag.141).



*Figura N°1. Edificio Seagram Building.*

*Tomado de Instituto Técnico de la Estructura en Acero (2021).*

### **2.1.2. Usos frecuentes de estructuras de acero en Perú**

En cuanto a infraestructura se han desarrollado proyectos tales como puentes, donde se utiliza para la construcción de la superestructura mediante la colocación de vigas metálicas, armaduras y arriostres de los puentes. Algunas de las estructuras de acero más emblemáticas

son el puente Urubamba, el puente Calemar, el puente Baily, entre otros. Asimismo, en algunos centros comerciales se colocaron sistemas compuestos por concreto armado acompañado con una cobertura metálica tipo armaduras reticulares, columnas de acero, tijerales, viguetas y planchas de acero (Blanco, 2019). El Real Plaza Salaverry y Centro Comercial Mall del Sur son ejemplos de centros comerciales que emplearon este sistema compuesto. También, se puede observar este tipo de sistemas estructurales en el montaje de la Torre de Control del Nuevo Aeropuerto de Lima, en el cual se utilizaron pilares de acero. Otro sector en el que son empleados es el de obras portuarias, por ejemplo, en el muelle del puerto de Talara, el cual está cimentado sobre pilotes de acero.

Con lo que respecta a proyectos industriales, se empleó en su mayoría para la construcción de naves industriales. Tales como, la Planta Santa Clara, la planta Agrícola Hoja Redonda de Ica compuesto por tijerales, y estructura y empalmes empernados, la Planta Yeso Cartón de Huachipa, Planta pesquera en Lambayeque, entre otros.

Según la revista Rumbo Minero (2016), una línea de negocio altamente demandada por la industria minera es el diseño y construcción de estructuras metálicas. Debido a que su funcionalidad, rapidez, flexibilidad y ventajosos costos de producción, se han convertido en la mejor alternativa para la gestión de espacios y montaje. Además, se puede utilizar estructuras de acero de alta resistencia con muros de paneles termoaislantes, edificios prefabricados de acero, tanques, silos, entre otros (Rumbo minero, 2019).

## **2.2. Norma Técnica de Estructuras Metálicas E.090**

Al igual que la mayoría de las normas, la Norma Técnica de Estructuras Metálicas E.090 establece requerimientos mínimos para el diseño, fabricación y montaje de estructuras metálicas para edificaciones. Además, se aceptan tres tipos de construcciones:

- a) **Pórtico rígido:** Son aquellos en que las uniones entre las vigas y columnas son lo suficientemente rígidas para conservar los ángulos entre los elementos que se interceptan.
- b) **Pórtico simple:** Se asumen apoyos simples en sus extremos mediante conexiones solo por corte y que son capaces de rotar por cargas de gravedad. Los edificios que poseen este sistema deben satisfacer que las conexiones y los elementos sean capaces de resistir las cargas de gravedad como las cargas laterales; asimismo, las conexiones deben tener una capacidad de rotación inelástica adecuada para evitar sobrecargar los conectores o soldaduras.



- c) Pórtico semirrígido: Comprende a aquellos sistemas que se encuentran parcialmente restringidos y se asume que las conexiones entre los elementos tienen una determinada capacidad de rotación.

Se señalan la especificación técnicas ASTM del acero estructural, así como de los elementos de acero a emplear como piezas de acero fundido, pernos, arandelas, tuercas, pernos de anclaje, varillas roscadas, entre otros. Por otro lado, se presentan 4 bases de diseño: Resistencia Requerida, Estados Límites, Condiciones de Resistencia y Condiciones de Servicio. La primera de ellas establece que para determinar la resistencia de los elementos estructurales y sus conexiones se debe realizar un análisis estructural con ciertas combinaciones de carga establecidas tanto en la Norma E.090 como en la Norma E.020; en donde, se permite el análisis elástico o plástico (sólo para aceros con esfuerzo de fluencia no especificados y menores a 450 MPa). El segundo, se debe asegurar que las combinaciones de cargas externas aplicadas a la estructura no excedan los estados límites tanto de servicio como de resistencia. El tercero, para el Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD) la resistencia de cada elemento o sistema estructural debe ser igual o mayor a la resistencia requerida por las cargas factorizadas. Finalmente, el último señala que se debe verificar el sistema estructural en su totalidad bajo cargas de servicio.

En cuanto a los requisitos de diseño la norma se señala algunos de los requisitos expuestos en la norma:

- a) Área total: Se suman los productos del espesor por el ancho total de cada elemento de una sección y para los ángulos, se suma los anchos de todos los lados menos el espesor.
- b) Área neta: Se obtiene sumando los productos del espesor por el ancho neto para cada elemento.
- c) Área neta para elementos en tracción: Si la fuerza de tracción es transmitida directamente al elemento de la sección mediante soldadura o conectores, entonces el área efectiva neta es igual al área neta. En el caso de que la transmisión de fuerzas no se de en todos los elementos, el área neta se obtendrá multiplicando el área total, neta o de una plancha por un coeficiente de reducción; el área a elegir dependerá del elemento.
- d) Estabilidad: Se debe considerar los efectos de las cargas sobre la configuración deformada tanto de los elementos como de la estructura.
- e) Pandeo Local: Las secciones de acero se clasifican en compactas, no-compactas y esbeltas. En donde, la clasificación de una sección dependerá de si las relaciones ancho/espesor de

sus elementos en compresión superan o no los límites de las relaciones ancho/espesor que establece la Norma E.090 para elementos no rigidizados y rigidizados. Si los elementos de una sección son soportados en un solo borde paralelo a la dirección de la fuerza de compresión; entonces se considera como elementos no rigidizados y su ancho varía de acuerdo a si es para alas de perfiles en forma de I y T, lados de ángulos, alas de canales, perfiles en forma de z, para planchas y para alma de perfiles en forma de T. En cambio, si los elementos son soportados a lo largo de dos bordes paralelos a la dirección de la fuerza de compresión se considera como elementos rigidizados y el ancho varía de acuerdo a si se tienen alma de secciones laminadas o formadas, de secciones armadas, planchas de ala o de diagrama en secciones armadas, alas de las secciones estructurales rectangulares huecas. Asimismo, se permite solo un análisis plástico cuando las alas del elemento están sujetas a compresión, desarrollan rótulas plásticas y con relaciones ancho/espesores menores a lo establecido por la Norma E.090.

- f) En los puntos de apoyo de los elementos como vigas y armaduras se deben tener restricciones de rotación alrededor del eje longitudinal de la sección.
- g) Para los límites de esbeltez se establece que para los elementos con diseño basado en fuerzas de compresión la esbeltez debe ser menor a 200 y para aquellos basados en fuerzas de tracción debe ser menor a 300. Esta recomendación no se aplica a varillas en tracción.
- h) Si las vigas y armaduras se diseñan como tramos simplemente apoyados; entonces, tendrán una luz de cálculo igual a la distancia entre C.G de sus elementos de apoyo.
- i) Si las vigas, armaduras y los elementos que los conectan poseen una restricción parcial o total, entonces se deben diseñar para resistir momentos, cortante u otra fuerza. Estas no deben sobrepasar las resistencias de diseño establecidas para cada elemento.

Se establecen los requisitos básicos para analizar la estabilidad de la estructura en su totalidad. Para ello, se señala que para obtener la resistencia requerida a flexión se puede usar un análisis plástico o elástico de segundo orden según como se hayan diseñado las estructuras. De igual modo, establece requisitos para pórticos arriostrados y no arriostrados. En cuanto a los elementos que conforman las estructuras de acero se dan requisitos y consideraciones para los elementos en tracción, compresión como las columnas, flexión como las vigas, fuerzas combinadas, torsión y de las conexiones existentes entre los elementos. Finalmente, se señalan requisitos para la fabricación, pintado, montaje y control de calidad de los elementos que conformarán la estructura metálica. Cabe resaltar, que la Norma E.090 no incluye un capítulo

de análisis sismorresistente, a diferencia de las estructuras de concreto armado que tiene la Norma E.060. Dado que Perú es un país altamente sísmico, que la Norma E.090 haga omisión de un análisis sísmico representa es una clara desventaja cuando se quiere emplear la norma.

### **2.3. Normas Internacionales**

Las especificaciones para construcciones de acero del American Institute of Steel Construction (ANSI/AISC 360-16), desarrolla especificaciones mínimas de los materiales, requerimientos de diseño para elementos y conexiones, además brinda lineamientos para el análisis de las estructuras de acero. Asimismo, se menciona que el diseño debe ser realizado bajo las metodologías de diseño en base a Resistencias Admisibles (ASD) y diseño en base a Factores de Carga y Resistencia (LRDF). Cabe mencionar que las combinaciones de cargas, cargas nominales y cargas se hallaran de acuerdo a la normativa de edificación aplicable. Por un lado, el diseño en base a Factores de Carga y Resistencia (LRDF), satisface los requisitos de esta especificación cuando la resistencia de diseño de cada componente estructural es mayor o igual a la resistencia requerida determinada de acuerdo con las combinaciones de carga LRFD (Asociación Latinoamericana del Acero, 2016). Por otro lado, el diseño en base a Resistencias Admisibles (ASD), satisface los requisitos de esta especificación cuando la resistencia admisible de cada componente estructural es mayor o igual a la resistencia requerida determinada de acuerdo con las combinaciones de carga ASD (Asociación Latinoamericana del Acero, 2016).

Dentro de su contenido también desarrolla el diseño de conexiones y de soporte. En las cuales, se tiene conexiones simples y conexiones de momento. En cuanto a la primera, una conexión simple es aquella que no transmite momentos, es decir, que estas conexiones permiten la rotación relativa de los miembros que se conectan en ella. Las conexiones de momento se dividen en dos tipos: completamente restringidas (FR) y parcialmente restringida (PR). En cuanto a las completamente restringidas, se transmiten momentos, pero no hay una rotación relativa entre los elementos que se conectan. Mientras que, las parcialmente restringidas transmiten momento y, además, hay una rotación relativa entre los componentes.

Además, el presente reglamento da lineamientos para el diseño de los siguientes escenarios:

- Diafragmas y colectores.
- Anclajes al Concreto.
- Por Estabilidad.



- Para Condiciones de Servicio.
- Para Integridad Estructural.
- Por Acumulación de Agua.
- Fatiga.
- Condiciones de Incendio.
- Efectos de la Corrosión.

Conjuntamente tiene un capítulo donde menciona las propiedades de los miembros de la estructura, en el cual, los clasifica según el pandeo local, además, brinda requisitos para el diseño de secciones tubulares y métodos para la determinación de área bruta y neta. También se explican los requerimientos en cuanto a fabricación, montaje, control y aseguramiento de calidad y los lineamientos para realizar una evaluación a estructuras existentes.

La normativa anteriormente presentada se puede complementar con la aplicación de otras normas. En primer lugar, el reglamento ANSI/AISC 341-16 realizado por el American Institute of Steel Construction, presenta las proporciones mínimas para elementos con responsabilidad sísmica de acuerdo al sistema estructural que presente. Además, establece requisitos mínimos para el diseño y detalle de las conexiones, brinda información en cuanto a los materiales, fabricación y montaje de elementos y conexiones de acero estructural en los sistemas de resistencia sísmica (SFRS), y empalmes y bases de columnas en sistemas de entramado por gravedad de edificios y otras estructuras con marcos de momento, marcos arriostrados y muros de corte (AISC, 2016b).

En segundo lugar, se puede aplicar el reglamento ANSI / AISC 303-16, que establece criterios para las prácticas comerciales involucradas en edificios de acero, puentes y otras estructuras, para las cuales se definen conceptos de diseño, fabricado y erigido de manera similar a los edificios. Por lo que, las prácticas comerciales que se definen en este código regirán la fabricación y montaje de acero estructural (AISC, 2016a).

Finalmente, se pueden considerar otros códigos como el ASIC 358, en el cual se puede encontrar, especificaciones acerca de las conexiones prefabricadas, conexiones en sistemas especiales e intermedios. Además, el código AWS D1.8 explica sobre las especificaciones necesarias en cuanto a soldadura sísmica.

## 2.4. Propiedades del acero

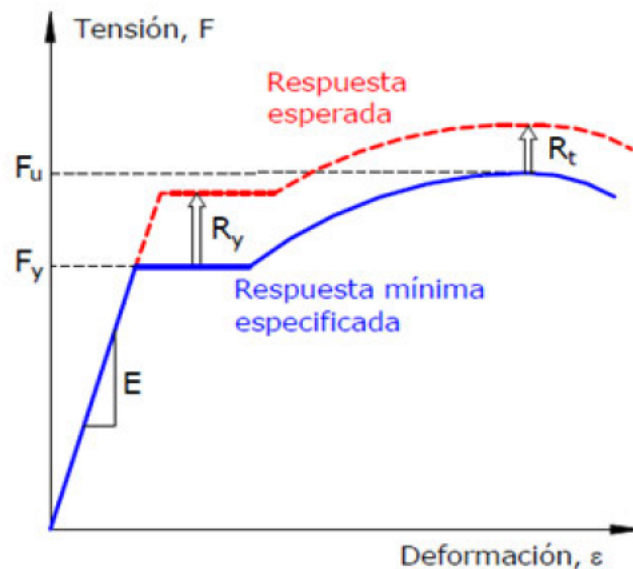


Figura N°1. Gráfico tensión vs deformación

El acero presenta propiedades que lo hacen un material práctico para construcciones sismorresistentes, entre las que se destaca su elevada resistencia, ductilidad y rigidez. A continuación, se detallará y definirán las principales propiedades del acero como material estructural:

### 2.4.1. Resistencia:

El acero presenta una alta resistencia por unidad de peso; esto acarrea algunas ventajas respecto al uso del concreto armado como: gran reducción del peso sísmico de la estructura, reducción del tamaño de las cimentaciones, etc.

### 2.4.2. Uniformidad y Durabilidad:

Las propiedades del acero son perdurables en el tiempo, a diferencia de las estructuras desarrolladas con concreto armado como material principal. Por otra parte, las estructuras de acero, bajo un adecuado sistema de mantenimiento, pueden durar indefinidamente e incluso algunas investigaciones actuales han demostrado que, si se les da un adecuado revestimiento, no necesitan mantenimiento alguno.

### 2.4.3. Elasticidad:

Es la capacidad que tiene el acero para recuperar su forma y tamaño después de sufrir alguna deformación debido a un esfuerzo de tensión. Además, la ley de Hooke se cumple hasta esfuerzos de gran magnitud, lo que permite que los momentos de inercia de las estructuras de

acero puede calcularse con mayor precisión respecto a las estructuras de concreto armado, pues en estas no se considera la inercia de la sección agrietada para efectos de diseño.

#### **2.4.4. Ductilidad:**

Capacidad del acero que le permite mantener su resistencia ante deformaciones plásticas y se define de la siguiente manera:  $\mu = \epsilon_u / \epsilon_y$

Elementos estructurales de acero sometidos a cargas normales presentan altas concentraciones de esfuerzos en ciertos puntos, de manera que su comportamiento dúctil permite la fluencia en dichos puntos para, de esta manera evitar fallas prematuras y frágiles.

### **3. Desarrollo de la investigación**

#### **3.1. Consideraciones para el diseño de estructuras de acero**

##### **3.1.1. Consideraciones para estructuración de edificaciones metálicas**

Como procedimiento previo al diseño estructural de los miembros de una estructura metálica, el primer paso consiste en su estructuración, que involucra la disposición espacial de los elementos que conforman el sistema, así como su dimensionamiento. Entre las principales consideraciones que se deben tener en cuenta, se tiene lo siguiente:

- Estudiar y evaluar distintas alternativas de estructuración que garanticen óptimas condiciones funcionales de la estructura proyectada. Por ejemplo, escoger entre diferentes espaciamientos entre pórticos típicos, largos máximos de viguetas, secciones de elementos, etc.
- Selección un adecuado sistema estructural de acuerdo al uso que se le pretende dar a la estructura, comparar entre distintos sistemas teniendo como variables principales: el peso total de la estructura, costo de los materiales y costo de mano de obra especializada.
- Verificación de los materiales y control de stocks, ya que se podrían encontrar situaciones en las que el diseño propuesto conlleva a solicitar miembros o secciones que no se encuentran disponibles en el mercado nacional. Entonces, se deberá realizar una evaluación previa del stock disponible de los distribuidores principales.
- Tomar en consideración la maniobrabilidad, para ello se debe tomar en cuenta el espaciamiento entre elementos durante el diseño para su posterior ejecución y montaje en obra, de lo contrario dificultará el proceso constructivo generando mayores gastos debido a la dificultad del trabajo.
- En relación con la transportabilidad, se debe de considerar la fragmentación de los elementos para facilitar el transporte en los trailers, considerando una longitud máxima de 12 metros de largo.
- Tipicidad, para acelerar la producción en serie de los elementos.

##### **3.1.2. Perfiles estructurales usados**

La cantidad y versatilidad de los perfiles usados para estructuras metálicas es muy variada a nivel internacional; así también, aunque en menor medida, en el mercado nacional. Sin

embargo, será necesario un minucioso estudio de factibilidad en las empresas encargadas del abastecimiento de los elementos para poder garantizar la ejecución de la obra proyectada. Entre los perfiles de mayor demanda y uso se tiene: Productos laminados en caliente, que pueden ser productos planos (plancha, que puede ser plegado o soldado) o productos no planos (canales, alas anchas, ángulos, varillas lisas, etc). Además, se pueden formar secciones combinadas uniendo los diferentes tipos de perfiles mencionados anteriormente mediante soldadura o también secciones compuestas, uniendo cualquiera de los perfiles antes mencionados con algún otro material, como por ejemplo el concreto.

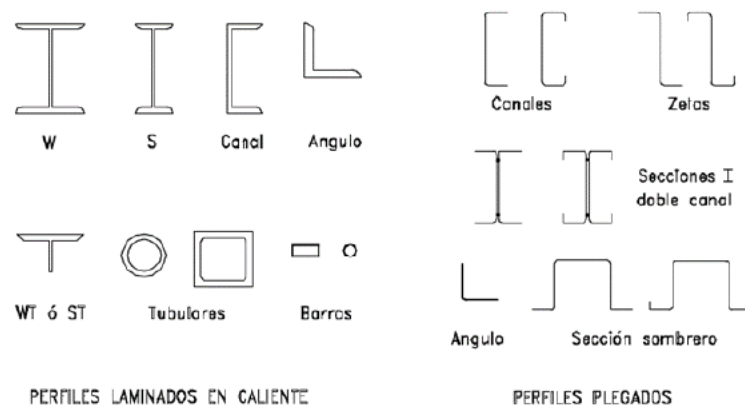


Figura N°2. Secciones de los diferentes tipos de perfiles

### 3.1.3. Cargas sobre la estructura

Las cargas a considerar sobre las estructuras metálicas se encuentran especificadas en el capítulo 1.4 de la norma E.090. Para aplicar el método LFRD, se deberá evaluar las siguientes combinaciones de cargas:

- $1.4D$
- $1.2D + 1.6L + 0.5 * (Lr \text{ ó } S \text{ ó } R)$
- $1.2D + 1.6(Lr \text{ ó } S \text{ ó } R) + (0.5L \text{ ó } 0.8W)$
- $1.2D + 1.3W + 0.5L + 0.5(Lr \text{ ó } S \text{ ó } R)$
- $1.2D \pm 1.0E + 0.5L + 0.2S$
- $0.9D \pm (1.3W \text{ ó } 1.0E)$

Por un lado, para aplicar el método de diseño ASD, las cargas mencionadas deberán combinarse con factores igual a 1.0 y un factor igual a 1/1.4 para las solicitaciones sísmicas, además; no se deberá de considerar el efecto del sismo y el viento simultáneamente. De igual modo, la norma

también considera el caso en el que la estructura soporta cargas vivas de impacto. A continuación, se definirán las principales cargas consideradas para la evaluación de un sistema estructural de acero:

**a) Carga muerta:**

Tipos de carga que considera el peso propio de los elementos estructurales y no estructurales considerado en el diseño y unidos para conformar la estructura global.

**b) Carga viva:**

Relacionado con las cargas provenientes de la construcción, ocupación, uso y mantenimiento de la estructura durante su ejecución y puesta en marcha. Tenemos:

- ✓ *Carga viva de impacto:* Carga viva aplicada de forma repentina, como resultado de: detención súbita de ascensores en movimiento, puentes grúa, equipos de arranque o detención inmediatos. Estas cargas vivas deberán de afectarse por un factor de mayoración al ser considerados para el diseño.
- ✓ *Carga viva de viento:* Toman importancia en las estructuras de acero por su peso propio relativamente bajo y grandes superficies expuestas al viento.
- ✓ *Carga de nieve:* Depende básicamente de la ubicación de la estructura proyectada. Se toma en consideración en el diseño de las superficies de cubierta expuestas a la acumulación de nieve.

### **3.1.4. Métodos de diseño de elementos estructurales para edificaciones metálicas**

Los métodos de diseño para los elementos estructurales que conforma una edificación metálica son los siguientes:

**a) Método de tensiones admisibles (ASD)**

Método que consiste en verificar que las tensiones inducidas en los elementos estructurales no excedan una tensión admisible, definida como el cociente entre la resistencia del material (Tensión de fluencia,  $F_y$ ) y un factor de seguridad.

**b) Método de factores de carga y resistencia (LFRD)**

Método que se basa en las evaluaciones de estados límites, que pueden definirse como una condición que se aplica a toda la estructura o alguno de sus componentes, más allá de la cual no se satisface el comportamiento requerido o esperado. Entre los estados límites se pueden mencionar los siguientes:



- *Estado límite de resistencia*, relacionado con la capacidad resistente ante cargas últimas (combinaciones mayoradas), que se vinculan con la seguridad estructural para la prevención de daños y colapso. Entre los estados límites de resistencia, se pueden encontrar los siguientes: fluencia, rotura, inestabilidad global, pandeo local, pandeo lateral torsional, entre otros.
- *Estados límites de servicio*, Relacionados a condiciones de funcionamiento y su no cumplimiento puede afectar el uso normal del proyecto durante su ciclo de vida. Como ejemplo tenemos: Control de deformaciones excesivas, vibraciones de entrepiso bajo cargas de servicio y control de desplazamientos de entrepisos. Este método de diseño era aplicado para la verificación de ciertos elementos en la ingeniería de los años 90's, sin embargo; en la actualidad solo se incluyen verificaciones como "recomendaciones", más no como una obligatoriedad de la norma.

### **3.1.5. Principales verificaciones de diseño en elementos estructurales para edificaciones metálicas**

#### **a) Diseño de miembros a tracción**

Son elementos a tracción aquellos perfiles estructurales laminados, barras placas sometidos a cargas que actúan a lo largo de sus ejes centroidales y generan esfuerzos de tracción. Estos elementos no presentan problemas de pandeo, por lo que pueden ser mucho más esbeltos que los miembros en compresión axial.

Es de suma importancia tener en cuenta la posibilidad de falla por fatiga, ya que los elementos pueden estar sometidos a ciclos de carga y descarga durante su ciclo de vida útil, debido a las acciones del viento, vibraciones por equipo, etc.

Un elemento sometido a tracción es el más simple de todos en cuanto a sus consideraciones de diseño en un sistema estructural de acero, por lo que sería ideal la propuesta de una estructura en donde la mayor parte de sus elementos estén sometidos a esfuerzos de tracción.

Dentro de los principales y más utilizados elementos para trabajar en tracción, se tienen los siguientes:

- Barras de armadura, exceptuando cuando sus conexiones excéntricas permitan esfuerzos que generen flexiones que no pueden subestimarse para el diseño del elemento.
- Puntuales o tirantes
- Tirantes o contraflambeos
- Tensores





*Figura N° 3. Contravento para edificio*

Ya que los miembros sometidos a tensión deberán unirse en sus extremos con los otros miembros de la estructura, el diseño y detalle de las conexiones resulta fundamental para evitar fallas locales que pudiesen tener gran efecto a nivel global de la estructura, entonces las conexiones deben diseñarse más resistentes, incluso, que el miembro analizado. Las conexiones más frecuentes para unir miembros solicitados en tracción son: Conexiones remachadas o atornilladas y las conexiones soldadas.

Entre los principales modos de falla de los miembros en tracción, se tiene:

- Flujo plástico en la sección total
- Fractura de la sección neta
- Fractura en bloque de cortante y tensión combinados.

#### **b) Diseño de miembros a compresión**

Los elementos diseñados por compresión son aquellos sometidos a esfuerzos de compresión axial debido a fuerzas actuantes en sus ejes centroidales. Dichas cargas axiales ocasionan deflexiones fuera del plano de aplicación de la carga, además; a diferencia de los elementos sometidos a tensión, no hay reducción de área bruta.

Entre los principales elementos que trabajan sometidos a fuerzas a compresión se tiene:

- Barras de armaduras y estructuras espaciales
- Celosías de columnas armadas

- Diagonales en tijerales
- Patines en compresión de las vigas prefabricadas
- Columnas sometidas a flexo compresión

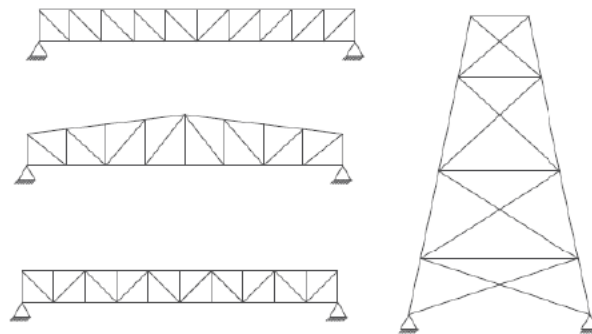


Figura N°2. Compresión axial presente en las barras de armadura

Por otro lado, para un adecuado diseño de los elementos se tiene en cuenta algunas secciones de perfiles con mejor comportamiento frente a estas solicitaciones, entre las que se puede mencionar: Sección H, IR ó W, sección de 2C compuesta, Sección cruciforme 2 IR, Sección 2 LI compuesta, columnas de LI, entre otras.

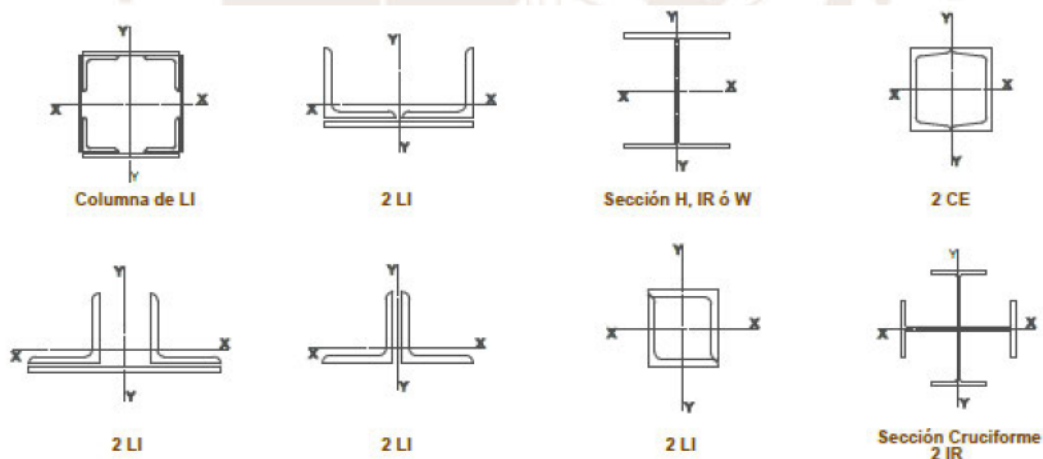


Figura N°3. Secciones transversales típicas de miembros en compresión axial

Uno de los principales problemas causado en los miembros de las estructuras metálicas es el pandeo, especialmente en elementos esbeltos, por lo que la tendencia que presenta un elemento metálico a sufrir por pandeo se puede medir de acuerdo a su relación de esbeltez (definido como el cociente entre su longitud libre no arriostrada y el radio de giro,  $L/r$ ) y se verifica en la dirección de análisis del elemento en la que se disponga de un menor radio de giro y momento de inercia.

### c) Diseño de miembros a flexión y corte

Generalmente en elementos que pueden definirse como compactos o no compactos sujetos a flexión y cortante, dispuestos normalmente en posición horizontal y soportando cargas distribuidas o puntuales en sentido perpendicular a su eje longitudinal, generalmente las vigas de conexión, viguetas, etc.

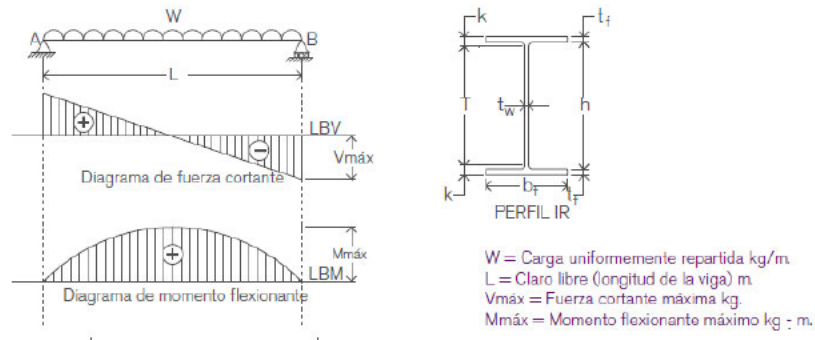


Figura N°4. Solicitaciones de una viga típica con carga uniforme (Flexión y cortante)

Entre las secciones de mayor uso para poder resistir demandas de flexión y corte por cargas distribuidas son las secciones “I” laminadas, mientras que para soportar demandas de momentos flexionantes de gran magnitud; placas soldadas, travesaños armados provistos de atiesadores. Por otro lado, también se pueden utilizar secciones de alma abierta (armaduras) cuando se requiera espacio para poder canalizar las instalaciones eléctricas, hidrosanitarias o aire acondicionado a través del alma de la viga.

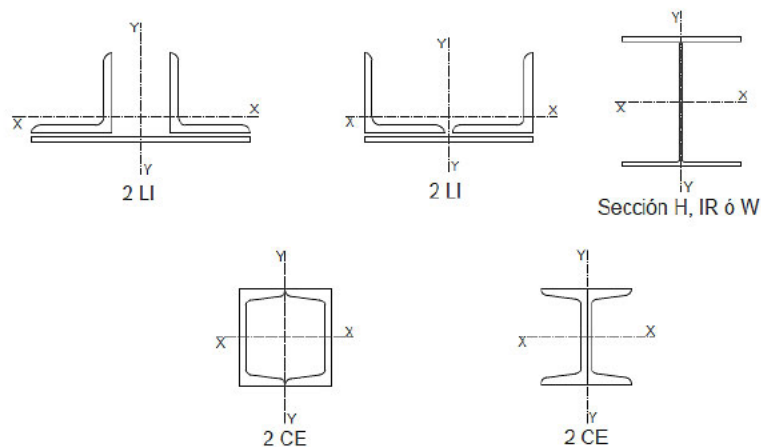


Figura N°5. Secciones transversales típicas de miembros en flexión

Para el análisis de las secciones a flexión (generalmente vigas) se considera la clasificación de las secciones de acuerdo a su relación ancho/grueso máximo de la parte sometida a compresión por flexión, como se muestra a continuación:

- Tipo 1 (Compactas): Puede alcanzar el momento plástico, pero puede o no tener una capacidad de rotación inelástica limitada (ductilidad).
- Tipo 2 (No compactas): No tienen capacidad de rotación inelástica y presenta fallas por pandeo inelástico de alguno de sus elementos.
- Tipo 3 (Esbeltas): Estas secciones no son capaces de desarrollar momento plástico de la sección y no presenta capacidad de rotación inelástica tras el pandeo.

Por otro lado, los principales problemas ocasionados por las demandas de flexión en los elementos de acero se dan por pandeo por flexo-torsión ocasionado por la baja esbeltez de las secciones "T" y la generación de grandes esfuerzos locales de compresión en alguno de las alas de la sección, ocasionado problemas de inestabilidad local en estos. Una medida de solución antes estos problemas es la rigidización de la sección transversal del miembro mediante el uso de tensadores. Así también, se pueden presentar otros modos de fallas en los miembros por flexión, como: Fluencia o plastificación, pandeo local en los patines o el alma, pandeo lateral, entre otros.



(1)



(2)

*Figura N°6. (1) Vigas de gran claro (2) Vigas laminadas IR*

### **3.1.6. Sistemas estructurales para edificaciones en acero:**

La norma peruana de diseño sismorresistente E.030 en su artículo 16 define los siguientes sistemas estructurales de acero:

#### **a) Pórticos resistentes a momento o Pórticos no arriostrados:**

Sistema conformado por ensambles de columnas y vigas conectadas entre sí mediante soldaduras o pernos, cometidos principalmente a momentos flectores y esfuerzos de corte que



controlan su diseño. Este tipo de sistema estructural puede presentar gran capacidad de disipación de energía, cuando es diseñado y construido para tal fin.

La Norma de diseño sismorresistente E.030 (2018) considera su clasificación de acuerdo a 3 niveles considerados de diseño, que se presentan a continuación:

**b) Pórticos especiales resistente a momentos (SMF)**

Sistemas de gran ductilidad debido a la gran resistencia de las columnas en comparación con las vigas, que permite que estos últimos tengan gran capacidad de deformación inelástica a través de su fluencia.

**c) Pórticos intermedios resistentes a momentos (IMF)**

Presentan limitada capacidad de deformación inelástica (ductilidad) en sus elementos y conexiones.

**d) Pórticos ordinarios resistentes a momentos (OMF)**

Presentan mínima capacidad de deformaciones inelásticas en sus elementos y conexiones



*Figura N°7. Vista de una estructura de pórticos no arriostrados para un edificio comercial*

Un aspecto fundamental en el diseño de los pórticos resistentes a momentos son las conexiones viga-columna, ya que es el eslabón que propiciará la capacidad de las vigas para poder alcanzar o no el comportamiento inelástico sin fallas en las columnas. Los pórticos no arriostrados son estructuras relativamente flexibles y tienen un diseño controlado generalmente por las limitaciones de distorsiones de entrepiso.

### e) Pórticos arriostrados concéntricamente:

Este tipo de sistema estructural surgió como una alternativa estructural para edificaciones de mediana y baja altura, construcciones industriales, etc. La presencia de riostras modifica el comportamiento del pórtico, formando una estructura reticulada mediante triangulaciones.

Las riostras son diseñadas de tal modo de buscar evitar excentricidades para evitar la generación de esfuerzos de flexión y corte en las barras que lo componen. Además, pueden disponerse en diferentes configuraciones atendiendo a distintas consideraciones estructurales funcionales y estéticas.

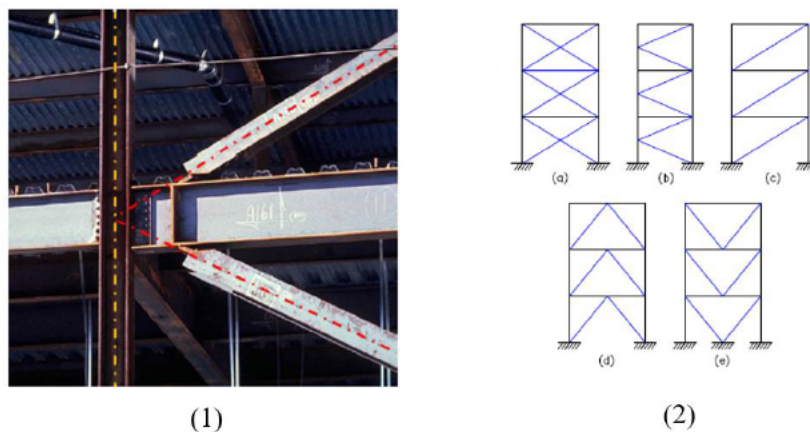


Figura N°10. (1) Detalle del nudo de un pórtico arriostrado con una conexión concéntrica. (2) Configuraciones típicas para pórticos arriostrados concéntricamente (a) Riostras en X, (b) en K, (c) en diagonal, (d) en V invertida, (e) en V

La Norma de diseño sismorresistente E.030 (2018) considera su clasificación de acuerdo a 2 niveles considerados de diseño, que se presentan a continuación:

### f) Pórticos especiales concéntricamente arriostrados (SCBF)

Presentan significativa capacidad de deformación inelástica mediante la resistencia post-pandeo de los arriostres en compresión y la fluencia en los arriostres en tracción.

### g) Pórticos ordinarios concéntricamente arriostrados (OCBF)

Presentan limitada capacidad de deformación inelástica (ductilidad) en sus elementos y conexiones.

Este sistema estructural presenta múltiples ventajas, tanto estructurales como constructivas, y se ha establecido como una de las principales alternativas para la rehabilitación sísmica de estructuras existentes. Finalmente, se concluye que este sistema se caracteriza por su elevada

rigidez, pero su comportamiento puede verse afectado por el pandeo de las riostras comprimidas.



*Figura N°8. Vista pórtico arriostrado de acero para rehabilitación de estructura existente de concreto armado*

#### **h) Pórticos arriostrados excéntricamente**

Sistemas en el que la riostra se dispone de forma excéntrica a la viga, generando de esta manera fuerzas de corte y momentos flectores elevados en estas. Dichas conexiones son diseñadas para tener la capacidad de disipar energía, mientras el resto de elementos para responder en el rango elástico.

Este tipo de estructuras representan una excelente solución para diseños sismorresistente debido a que combinan una elevada rigidez lateral debido a las riostras y una buena capacidad de disipación de energía.

La norma de diseño sismorresistente E.030 (2018) define el siguiente tipo de sistema estructural:

#### **i) Pórticos excéntricamente arriostrados (EBF)**

Presentan significativa capacidad de deformación inelástica mediante la fluencia en flexión o corte en la zona entre arriostres.



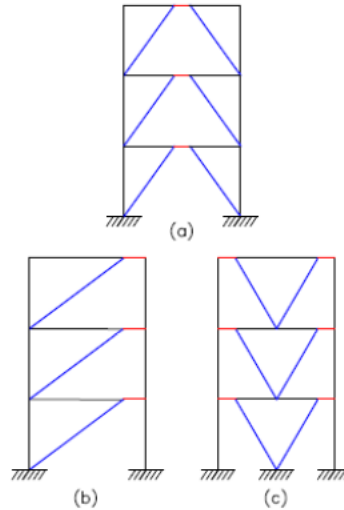


Figura N°12. Configuraciones para pórticos arriostrados excéntricamente.

Entre otros tipos de sistemas utilizados en la configuración de construcciones de acero, tenemos:

- Sistemas de columnas en voladizo
- Pórticos con riostras de pandeo restringido
- Muros de corte con placas de acero
- Sistemas duales
- Pórticos a momento con riostras de esquina
- Pórticos arriostrados con enlace de esquina
- Pórticos arriostrados con estabilizadores
- Estructuras con miembros compuestos

### 3.1.7. Conexiones

El diseño de las conexiones, así como su detallado, representan un punto clave en el proceso de diseño de una estructura metálica, puesto que podría representar uno de los eslabones más débiles de toda la estructura en caso no sea incidido de manera minuciosa en sus consideraciones para diseño. Se indican muchas especificaciones para su diseño sismorresistente en la norma ANSI/AISC 341-10, entre los que tenemos:

- a) Conexiones apernadas: Importante considerar el diseño a corte de este tipo de conexiones, además, se recomienda no combinar pernos con secciones soldadas.

b) Conexiones soldadas: Se tienen distintas consideraciones para los distintos tipos de estructuras metálicas, teniendo especial consideraciones en las estructuras metálicas con ductilidad elevada. Se pueden considerar 3 tipos de soldaduras:

- Soldaduras no-sísmicas: Corresponden a estructuras sin requerimientos sismorresistentes ( $R=3$ ).
- Soldaduras sísmicas: Incluye las soldaduras de sistemas sismorresistentes ( $R>3$ )
- Soldaduras de demanda crítica: Son las soldaduras de diseño sismorresistentes que pueden alcanzar el grado de fluencia, generando degradación de rigidez a la estructura global.

### **3.1.8. Seguridad contra fuego y corrosión**

Una de las ventajas que presente el uso de concreto sobre el acero es la gran resistencia al fuego que tiene, sin embargo, las estructuras de acero también presentan consideraciones, como la indicada en el Anexo 4 de la Norma AISC-360-16, para poder garantizar el adecuado comportamiento del acero estructural frente a condiciones de elevadas temperaturas. Estos criterios permitirán obtener factores importantes, como el calor de entrada, expansión térmica y degradación de las propiedades mecánicas como la rigidez, resistencia y ductilidad frente a las elevadas temperaturas que involucraría un incendio dentro de la estructura. Dicha norma menciona como objetivo de desempeño que los componentes estructurales de la estructura de acero deben de tener un diseño que garantice su función resistente frente a un incendio de diseño, así como también, requisitos de servicio. Dicho incendio de diseño debe de ser clasificado según la intensidad o localización según como sigue: Fuego localizado, Incendio en sector Post-Ignición, Incendio en sector Post.ignición, Incendios exteriores.

### **3.1.9. Sistemas compuestos**

Los materiales compuestos son aquellos que están conformados por varios materiales y cuyo comportamiento en conjunto resulta ser mejor que si estos estuvieran trabajando por separado. Actualmente en el Perú, los materiales más usados en la construcción son el acero y el concreto armado, por ello, plantear sistemas compuestos por estos dos materiales resulta beneficioso en muchos aspectos.

En primer lugar, al juntar estos dos materiales en un sistema compuesto pueden mejorar sus propiedades; tal es el caso del concreto, al no tener una buena capacidad ante el esfuerzo de tracción puede mejorar esta propiedad al trabajar en conjunto con el acero. En cuanto al acero el concreto permite mejorar su resistencia ante la exposición al fuego. En segundo lugar, se

pueden proyectar sistemas más rígidos y requerir losas de menor espesor o vigas de menor peralte para luces más amplias. Según Víctor Fernández & Edison Moscoso (2020) en su investigación sobre elementos compuestos señalan que, los pisos compuestos aprovechan la alta resistencia del concreto a la compresión, haciendo que la losa trabaje a compresión, al mismo tiempo que un mayor porcentaje de las vigas de acero trabaje a tracción, comportamiento idóneo para las estructuras de acero. Finalmente, resulta beneficioso en cuanto a tiempos de ejecución y menor costo de construcción, ya que su instalación es más rápida en comparación a los sistemas constituidos por concreto armado y, además, se pueden proyectar secciones de menores dimensiones y las cimentaciones recibirán menos carga por parte de la estructura, por lo que tendrán un menor costo.

Dentro de este marco, existen diferentes tipos de elementos compuestos por acero y concreto, dentro de ellos se pueden encontrar los siguientes:

- Miembros compuestos embebidos: Son aquellos elementos que están compuestos por perfiles de acero en su interior y concreto armado en el exterior. La principal función de este sistema es proteger al acero del fuego y es aplicado mayormente en columnas.
- Miembros rellenos: Son sistemas compuestos por concreto armado en el interior y acero en el exterior. La ventaja es que el acero mejora la resistencia a la compresión de concreto y permite controlar los efectos pandeo en el acero.
- Vigas compuestas: Son vigas de acero que usualmente son de sección I o U, que se unen a una losa de concreto armado mediante pernos soldados. Se utilizan usualmente para tener secciones de vigas menores y tener un ahorro en la construcción.
- Losas compuestas: Están compuestas por una plancha de acero que tiene encima una losa de concreto armado, la capa de acero puede servir como encofrado. Asimismo, se puede tener losas compuestas con losa colaborante que resulta beneficiosa en varios aspectos técnicos y económicos. Este sistema es ideal acompañarlo de vigas de acero debido a que, el sistema trabajando en conjunto permite reducir la sección de las vigas.

Es importante mencionar que las conexiones en sistemas mixtos deben tener resistencia, ductilidad y tenacidad comparable a la de conexiones similares en estructuras sismorresistentes de acero o de concreto armado (Herrera, 2002). Asimismo, existen diferentes sistemas estructurales mixtos que dependen del tipo de unión que presenten y las consideraciones según la normativa AISC. Los tipos de sistema estructurales mixtos se mencionan a continuación.

- Marco Mixto semirrígido (C-PRMF)
- Marco Especial Mixto rígido (C-SMF)

- Marco Intermedio Mixto rígido (C-IMF)
- Marco Corriente Mixto rígido (C-OMF)
- Marcos Mixtos Especiales Arriostrados Concéntricamente (C-CBF)
- Marcos Mixtos Corrientes Arriostrados Concéntricamente (C-OBF)
- Marcos Mixtos Arriostrados Excéntricamente (C-EBF)
- Muros Corrientes de hormigón armado con elementos de acero estructural (C-ORCW)
- Muros Especiales de hormigón armado con elementos de acero estructural (C-SRCW)
- Muros de Corte de Placas de Acero embebidas en hormigón (CSPW)

En relación a este tema, para determinar la resistencia nominal de las secciones compuestas el ANSI/AISC 360-16, establece dos procedimientos: el método de las tensiones plásticas y el método de la compatibilidad de deformaciones.

- El método de tensiones plásticas: Asume que los componentes de acero que integran la sección alcanzan la resistencia de fluencia  $F_y$  y el concreto alcanza la tensión  $0.85 f'_c$  y en el caso de secciones circulares a  $0.95 f'_c$  (Jaramillo, 2018).
- El método de la compatibilidad de deformaciones asume una distribución lineal de deformaciones en la sección, con una deformación máxima del concreto de 0.003. Las curvas tensión-deformación deben obtenerse de ensayos o de información disponible en la literatura técnica (Jaramillo, 2018).

## 3.2. Ventajas del uso de acero

### 3.2.1. Luces

La distancia o extensión que existe entre dos elementos estructurales, columnas y/o placas, sometidos en gran parte a flexión, se denomina luz. La longitud de las luces influye en el pre-dimensionamiento de los elementos estructurales presentes en un edificio de concreto armado, sobre todo en las vigas; pues, tal y como lo plantea Blanco, estas se dimensionan considerando, usualmente, un peralte que va del 1/10 a 1/12 de la luz libre. Entonces, a mayores luces libres se tendrán mayores dimensiones en vigas y en columnas, lo cual tiene influencia en el análisis del edificio, así como en su costo. Por ello, cuando se requiere de edificios de grandes luces con el fin de tener espacios libres de columnas o elementos estructurales, los edificios de concreto armado presentan una clara desventaja. En cambio, el acero resulta ser el material idóneo debido a sus características como una mejor relación de resistencia y peso, la posibilidad de fabricar perfiles a medida (por soldadura o atornillados) y su rápido montaje (AlcelorMital, n.d.)

Ahora, en una estructura típica de edificio rectangular y de varias plantas, la relación normal entre la luz y el peralte de las vigas son del orden de 15 a 30 con el fin de conseguir un proyecto eficiente. Las cuales, deben tener una flecha máxima en su centro del orden de  $1/400 - 1/500$  (Instituto Técnico de la Estructura en Acero, n.d.). Cabe resaltar, que los perfiles más comunes para las vigas son en I o en H con altura que van desde 80 a 600 mm, pero si se necesita un mayor peralte se pueden optar por otras formas. Por otro lado, la separación entre las columnas de acero puede variar de 3 a 20 m, pero normalmente van de 6 a 10 m, tal y como se observa en la imagen N°13. Cabe resaltar que esta distancia depende de la resistencia y luces de las vigas.

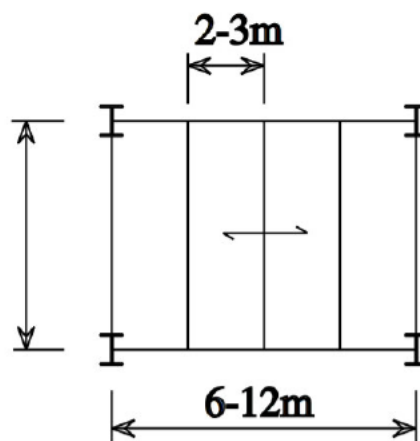


Figura N°13. Distancia entre columnas de acero. Fuente: ITEA.

### 3.2.2. Fabricación

En cuanto a los elementos estructurales de acero, estos se fabrican en pequeñas a grandes fábricas especializadas en estos; en donde la capacidad del taller influenciara en la cantidad de uniones a realizar en obra. Ahora, si bien se tienen elementos de concreto armado prefabricados que pueden ir desde viguetas, vigas, placas, placas, e incluso zapatas; las que se usan en Perú, comúnmente, son viguetas o vigas prefabricadas con el fin de acelerar el vaciado de las losas; no obstante, en la mayoría de edificios se vacían todos los elementos estructurales in-situ ya sea con concreto premezclado o con concreto hecho en obra. En este aspecto, el acero presenta una clara ventaja, puesto que todos los elementos que conforman el edificio son prefabricados. No obstante, una desventaja es que se requiere un mayor detalle en los elementos de acero, para que las piezas puedan ser transportadas y armadas con facilidad en la obra; es decir, requiere más mano de obra especializada.



Por otro lado, al igual que sucede con los edificios de concreto armado, para la disposición de los materiales necesarios para la obra, en este caso los elementos de acero se deben tener en cuenta el tamaño de la obra, el tamaño de las calles, una zona lo suficientemente grande y libre de todos elementos para poder descargar todo el acero, entre otros. Entonces, se ve que el tamaño de los elementos de acero y su peso se ve afectado por el espacio libre en obra. Ahora, en cuanto al montaje se sigue el siguiente método.

- a) Izado
- b) Uniones provisionales
- c) Aplomado, nivelación y alineación
- d) Uniones permanentes.

Además, se debe considerar que las uniones en obra se realicen con pernos, que se tengan todas las dimensiones para poder montarlos, que el programa de montaje sea adecuado. Así mismo, se necesita que todos los trabajadores conozcan las normas y los reglamentos sobre el armado de estas estructuras y que se dispongan de equipos de elevación como grúas para izar los elementos prearmados, así como andamios, escaleras y plataformas para armar y soldar los elementos, equipos de montaje, de soldadura, de tornillería, entre otros. Un ejemplo del procedimiento anteriormente mencionado es el siguiente “los extremos y los anclajes de las bases se unen al principio sólo provisionalmente; después de aplomar, nivelar y alinear, todas las uniones se hacen definitivas apretando las tuercas o incluyendo los pernos que se omitieron” (Instituto Técnico de la Estructura en Acero, n.d.). Al terminar esta fase, se continúa montando piso por piso con ayuda de la grúa. Cabe resaltar, que, si bien se prioriza que las uniones sean atornilladas, también se pueden realizar mediante soldadura; en este se necesita un control mucho y planeamiento mucho mayor. Por último, se realiza debe incluir un sistema de protección contra el fuego ya sea para mediante pinturas intumescentes, morteros ignífugos o placas rígidas de revestimiento el cual crea un alojamiento para los perfiles de acero ( (Instituto Técnico de la Estructura en Acero, n.d.)

En cuanto al procedimiento de montaje se presenta una enorme diferencia con las obras de concreto armada, pues estas necesitan encofrado para todos los elementos estructurales del edificio, así como la habilitación y colocación manual del acero en cada uno de ellos, luego se realiza el vaciado ya sea con concreto premezclado en obra o in-situ, luego vibrado y finalmente se desencofrado; por otro lado, estos elementos necesitan ser curados para poder alcanzar una

resistencia determinada. No obstante, en edificios de gran altura también se necesita el empleo de grúa para facilitar el transporte de materiales al igual que en los edificios de acero.

Una de las ventajas que presenta el acero en su proceso constructivo es que las instalaciones mecánicas, sanitarias, eléctricas van colgadas y se fijan al entrepiso siendo cubiertas por un cielorraso. A diferencia de las de concreto armado que deben ir embutidas en la losa.

### **3.2.3. Disponibilidad**

Los materiales más utilizados para la fabricación de concreto, en el sector de la construcción y en el Perú, son los siguientes: agua, cemento, y agregados finos y gruesos. Dicho procedimiento de mezcla de componentes es irreversible, ya que es técnicamente imposible separar sus componentes de manera que retornen a su estado inicial. Por lo tanto, se podría afirmar que es difícil realizar un proceso de reciclaje de sus componentes; a pesar de que uno de los principales usos del concreto como mezcla es el “agregado reciclado”, no presenta esta característica de disgregación de sus componentes. Como consecuencia, en cada proyecto de construcción que involucre el uso de concreto (tales como construcciones de presas, puentes, edificios, entre otros más), se debe suministrar de insumos nuevos (agregados, agua, cemento) al proyecto para la preparación de la mezcla. Afortunadamente, la disposición de estos materiales en América Latina y en el resto del mundo es abundante. Sin embargo, surge la incertidumbre de saber si el acero (como material de construcción) presenta una disponibilidad abundante con respecto a los materiales que conforman el concreto.

El autor George Power (Power, 2007) señala que los metales como el acero se pueden reciclar continuamente de manera que sus propiedades iniciales sean recuperadas; sin embargo, es un proceso difícil. Además, el autor Power sustenta que el reciclaje de metales impacta notablemente en el cuidado del medio ambiente y en la conservación de los recursos primarios, ya que los metales como el acero son reutilizados y se evita la extracción de materia prima para su fabricación. En ese entender, el reciclaje de acero es importante, ya que permite la disponibilidad del material en términos de materia prima y que pueda ser utilizado, posteriormente, como material de construcción. Así mismo, el autor Cházaro (Chazaro, n.d.) menciona que los elementos de acero pueden presentar una disponibilidad, en el mercado mundial, muy variada de acuerdo al tipo de elemento. Por ejemplo, los perfiles soldados o electrosoldados son elementos importados que exigen solicitud de envío de productos y que presentan entregas demoradas; en cambio, existen demasiados proveedores de perfiles conformados en frío como los “tubulares de acero” en cualquier parte del mundo, como México.

Entonces, aparentemente, existe una paradoja con respecto a la disponibilidad del acero: por un lado, el acero como materia prima está disponible por el hecho de ser un material reciclado, con lo cual se evitan pérdidas; por otro lado, en algunos países como México, según el autor Cházaro algunos elementos no están disponibles de manera directa. La razón es la falta de tecnología necesaria para fabricar dichos elementos en algunos países como México y Perú; a pesar de que se adquiriera la materia prima, es difícil fabricar acero en cantidades industriales sin la ayuda de la tecnología. Como conclusión, se puede analizar que, a pesar de que, en nuestro país, el acero no presente disponibilidad directa con respecto al concreto, se pueden construir obras que contengan como material estructural dicho metal; siempre y cuando, se realicen las gestiones necesarias para suministrar de acero a la obra de manera oportuna.

#### **3.2.4. Costos y plazos de ejecución**

el Instituto Tecnológico de la Estructura de Acero (Instituto Técnico de la Estructura de acero, n.d.), el coste típico de una estructura de un edificio con múltiples plantas de acero, depende principalmente de los siguientes aspectos: Acero (47%), protección contra la corrosión (5%), fabricación (22%), montaje (8%) y protección contra incendios (18%).

No obstante, hay otros componentes que influyen en el costo total de un proyecto con sistema estructural de acero. En ese sentido uno de los costos que se debe de considerar es el de planificación y diseño del proyecto; además, se debe incluir los costos del material de los miembros estructurales como vigas, columnas y arriostramientos, en función de la oferta y la demanda del mercado. En cuanto al costo de fabricación, se deben analizar los relacionados al material de los elementos de conexión, los pernos y el electrodo; así como, los planos de taller y la mano de obra. Asimismo, se debe tomar en cuenta los costos de transporte, recepción, manipulación y almacenamiento de las secciones laminadas y piezas fabricadas. Con relación a la colocación en obra se considera el costo de montaje, de herramientas, maquinaria y mano de obra; en el caso de este último, muchas veces se debe contratar mano de obra especializada, que tenga una formación técnica para la colocación de los elementos (Sarma et al., 2000). Finalmente, se debe proyectar el mantenimiento, ya que el acero es un material susceptible al medio ambiente y puede tener problemas como la corrosión, para lo cual, se debe aplicar recubrimientos especiales como anticorrosivo, galvanizado y pintura.

En relación con este tema, la elección del acero como material del sistema estructural puede resultar beneficioso en cuanto a costos y plazos de ejecución en comparación a otros materiales. En primer lugar, la calidad de este material permite tener menores longitudes y secciones,

también, se puede disminuir el espesor de la tabiquería y aprovechar mejor los espacios. Además, la reducción de cargas debido al menor peso de la estructura permitirá que haya una reducción de la carga transmitida a la cimentación, por lo tanto, hay una disminución de costos en la ejecución de la cimentación. Se dice que hay una reducción de las cargas verticales transmitidas de un 20 % en comparación a otros sistemas constructivos (Alvarez & Chazaro, n.d.). Es importante mencionar que las estructuras de acero se pueden modificar o ampliar sin gran dificultad. Debido a que permiten realizar uniones a la estructura existente, y se puede determinar el refuerzo de la estructura y cualquier nueva ampliación con facilidad (Instituto Técnico de la Estructura de acero, n.d.)

En segundo lugar, hay una reducción en el tiempo de ejecución, debido a que el montaje de los elementos requiere un menor tiempo en comparación a construcciones con concreto armado. Asimismo, una alternativa es ejecutar los cimientos mientras las piezas están siendo fabricadas y con un cronograma bien elaborado, se puede tener una reducción en el tiempo de hasta un 40% (Alvarez & Chazaro, n.d.) En base a lo anterior, si se tiene un menor tiempo de ejecución, entonces, el costo de mano de obra disminuye. Además, se puede tener una reducción de costos de inversión inicial; debido a que se tiene un menor tiempo de ejecución, así como, equipos de construcción y gastos generales asociados al periodo de edificación (Calizaya-Vera, 2017)

Por otro lado, se sabe que para la instalación de los elementos de acero se debe tener mano de obra especializada, no obstante, el uso de elementos prefabricados de acero, no requieren mucha especialización y facilita el trabajo para la mano de obra. Dentro de este marco, la producción y pre fabricación del acero es en masa; los elementos son precortados, pretaladrados y preperforados, lo que garantiza calidad y precisión. Por consiguiente, se tienen menores errores en obra, se evitan sobrecostos, desperdicios y mejoran la calidad del sistema. En relación con este tema, es importante mencionar que el material de acero puede ser reutilizado después de su demolición y el ingreso por la venta de estos materiales durante su demolición puede compensar el costo de esta actividad. Además, los costos de mantenimiento son menores, ya que es un material duradero y su reparación es rápida y fácil.

### **3.2.5. Seguridad y comportamiento de edificios de acero**

Por lo general, los edificios, cuyo material de construcción principal es concreto armado (u hormigón como también es conocido en otros países), presentan un comportamiento satisfactorio ante frente al fuego y al viento. Según lo señalado por la entidad “Plataforma Europea del Hormigón”(2008) el concreto como material de construcción de elementos

estructurales presenta determinadas ventajas: el concreto no arde (es resistente a altas temperaturas), evita la propagación del fuego en otros ambientes (presenta una velocidad de aumento de temperatura relativamente baja) y el proceso de reparación de dicha mezcla es mucho más rápido y económico (no necesita una reparación profunda y sustancial). Según indica el autor Bonett (2003), con respecto al comportamiento sísmico que han desempeñado algunos edificios conformados por elementos estructurales de concreto armado en zonas de alta sismicidad (en el caso de edificios aperticados), sismos severos han demostrado las limitaciones del uso de este tipo sistemas estructurales; los problemas más sustanciales que se han podido identificar son la pérdida de rigidez a medida que los elementos estructurales incursionan profundamente en el rango inelástico, así como la pérdida de resistencia de dichos elementos como consecuencia de las fisuras que se experimentan en el concreto y la pérdida de adherencia en las barras de refuerzo.

Por otro lado, el autor Pignatta (2006) sustenta que el acero puede reducir su capacidad de resistencia y módulo de elasticidad a causa de las elevadas temperaturas que experimentan en la ocurrencia de incendios. Sin embargo, según la opinión de Pignatta (2006), es posible reducir estos efectos a través de la aplicación de algunas medidas antitérmicas con la finalidad de proteger las estructuras de acero: tales como la autoprotección (otorga dimensiones suficientes al elemento estructural para soportar temperaturas elevadas ocasionadas en un incendio), uso de barreras térmicas (los elementos estructurales de acero son revestidos con materiales caracterizados por su baja conductividad térmica tales como la mampostería) y el uso de estructuras mixtas (el acero y un material complementario, como el concreto, soportan conjuntamente este efecto de incremento de temperatura de los incendios). Adicionalmente, Pignatta (2006) investigó el comportamiento de 2 edificios conformados por sistemas estructurales de acero frente al desarrollo de un incendio: Golden Plaza Tower (Taiwán), la Torre Este del Parque Central de Caracas (Venezuela) y la Torre Windsor (Madrid). Tanto el edificio de Taiwán como el de Venezuela desempeñaron un buen comportamiento ante los incendios suscitados, puesto que presentaron daños menores en vigas estructurales secundarias y los TRRF (Tiempo Requerido de Resistencia al Fuego) empleados para proteger las estructuras fueron óptimos; cabe resaltar que estas consecuencias fueron posibles por el uso de revestimiento del acero. Sin embargo, el edificio de Madrid no presentó un comportamiento óptimo frente al incendio desarrollado en el piso 21 de la mencionada torre, debido a que recién se estaba instalando los revestimientos de acero, con lo cual los daños adquiridos por la estructura de acero fueron, prácticamente, irreparables. Por otra parte, el autor Cházaro



(n.d.)manifiesta que el desempeño sísmico de los sistemas estructurales de acero es contante, ya que presenta un comportamiento elástico frente a acciones dinámicas, a pesar de las deformaciones mayores que se puedan presentar. De manera complementaria, los autores Tapia y García (2019) concluyeron en su investigación “Comportamiento de Estructuras de Acero durante los Sismos de septiembre de 2017” que los edificios de acero ubicados en las ciudades donde se suscitó el sismo (Ciudad de México, Puebla y Morelos) brindaron un comportamiento sísmico adecuado como respuesta a los sismos del 2017 en México, puesto que no se reportaron colapsos ni tampoco la presencia muchos edificios con daños estructurales severos (solo una cantidad muy mínima). Por ende, del análisis realizado en este inciso, se podría afirmar que el acero presenta mayores ventajas tanto en comportamiento sísmico como en incendios; esto es posible, siempre y cuando, se consideren los requerimientos necesarios para que cumplan con dichos objetivos.

### **3.2.6. Medio Ambiente**

Los aspectos medioambientales pueden considerarse en términos de efectos locales y globales que incluyen temas como estética, seguridad, economía puntual, utilización de recursos naturales y consumo de energía (Instituto Técnico de la Estructura de acero, n.d.). Uno de los beneficios más relevantes del acero es que es un material reciclable; cabe mencionar que no pierde ninguno de sus componentes, es decir, es un material que se puede reciclar las veces que se quiera y aun así seguirá trabajando igual a que si es sacado de su materia prima principal que es el hierro (Ortiz & Meza, 2018). Por ello, una vez terminado su ciclo de vida, el acero de las demoliciones se vende como chatarra, luego se funde en las siderúrgicas y con una adición de algunos componentes se consigue de nuevo acero estructural (David et al., 2008). En este sentido, una alternativa de construcción es utilizar acero reciclado, lo cual será más beneficioso tanto económica como medioambiental.

### **3.3. Ejemplos de edificaciones de acero**

El Perú desde hace muchos años, se ha masificado el uso del concreto reforzado como material para el diseño y ejecución de grandes edificaciones, sin tomar en consideración el uso de otros materiales como el acero, según las grandes ventajas que acarrea este material, tal como se ha venido explicando a lo largo del presente informe. De esta manera, se ha logrado investigar sobre el gran avance que se ha tenido en cuanto al uso del acero estructural dentro un sistema mixto en el que se combinan las grandes ventajas del concreto y el acero estructural. En vista a ello, a continuación, se presentan algunos ejemplos que amplían las oportunidades de éxito que

podría llegar a tener el uso del acero estructural en un futuro no muy lejano del sector construcción en el país:

## Centro de Convenciones de Lima: Núcleos de concreto y estructuras de acero

por **Construcción y Vivienda** — 8 de noviembre de 2015 in Ingeniería

0



**Centro de Convenciones de Lima**, es una edificación ubicada en el distrito de San Borja (Lima) culminado en Setiembre del 2015. Con casi 3500 toneladas de acero de refuerzo, 8000 toneladas de acero estructural y 36000 m<sup>2</sup> de placa colaborante, el Centro de Convenciones de Lima se desarrolló bajo modalidad “Fast Track”, es decir, se iba ejecutando el proyecto conforme se culminaba el desarrollo de algunas especialidades.

A nivel estructural, se proyectó una estructura mixta con concreto armado prefabricado para los sótanos y estructuras de acero rellena de concreto en los elementos verticales. La estructuración final consistió en cinco núcleos de acero con muros de gran espesor que nacen en el sótano y se ubican en el perímetro del edificio para dotar de mayor rigidez torsional a la estructura, además, debido a las grandes luces propuestas en el interior a nivel arquitectónico, se decidió usar a conveniencia perfiles de acero como vigas, evitando de esta manera vigas de gran peralte en caso se hubiera utilizado elementos de concreto reforzado. Esta estructura representa un gran ejemplo de lo que se puede llegar a conseguir a nivel ingenieril para el sector construcción si abrimos paso a un sector más industrializado que permita el uso de acero a grandes escalas en proyectos de gran envergadura.

Por otro lado, en una investigación realizada por los autores Tapia y García (2019) “Comportamiento de Estructuras de Acero durante los Sismos de Setiembre de 2017”, se detalla el comportamiento de algunas estructuras metálicas frente al sismo ocurrido en el país de México, en base a ello, y considerando lo importante que resulta conocer el verdadero

comportamiento de este tipo de estructuras frente a sismos, se detallan algunos principales hallazgos:

- **Edificio en la Colonia Ex Hacienda Coapa:**

Se trataba de un edificio con tres pisos, estructurado con marcos de acero que presentaban trabes de alma abierta con ángulos que se conectaban a las placas de las columnas de sección cajón conformadas por cuatro placas soldadas. Tras el sismo se presentaron daños graves, tales como: Rango inelástico al que llegaron las articulaciones de las columnas en el primer piso, incluyendo pandeo local de las placas y fracturas en la soldadura.

- **Infraestructura Educativa:**

Se trata de una infraestructura educativa que fue diseñada bajo parámetros normativos que no iban acorde a las solicitaciones sísmicas de diseño de la ciudad de México, a partir de donde se presumen iniciaron los problemas en la estructura. El sistema estructural, tal como lo indica la investigación de Tapia y García (2019), está conformado por marcos de acero estructural resistentes a momentos, además, cuenta con columnas, vigas y puntales compuestos por placas de acero dobladas, unidos a través de soldadura vertical. También presentaba una cubierta de concreto armado de dos aguas con pendiente de 15% aproximadamente. Los principales daños encontrados en la estructura son: Gran cantidad de pandeos locales en columnas debido al uso de secciones no compactas en su diseño y, en consecuencia, gran cantidad de fracturas en soldaduras durante el sismo. Además de lo mencionado, se presentaron grandes pérdidas en fallas de elementos no estructurales.

### **3.4. Análisis de factibilidad del uso de acero estructural en edificaciones**

Como se ha mencionado a lo largo del presente informe, existe gran cantidad de ventajas en el uso de acero frente al concreto reforzado como materiales para la conformación de sistemas estructurales, tales como: Costo, tiempo, constructibilidad, entre otros; no obstante, las estructuras de acero presentan una serie de dificultades en el sector peruano, que deberán ser atendidas para poder masificar el uso de este material como una importante alternativa de construcción en el Perú:

- **Mano de obra:** El diseño y la ejecución de las estructuras de acero requieren de trabajo especializado para su elaboración y en el Perú se cuenta con un porcentaje mínimo de personas que tengan el conocimiento y habilidades constructivas para este tipo de estructuras.

- Fabricación: Si bien se cuentan con empresas que fabrican acero estructural de refuerzo, estas no se encuentran especializadas en la producción y/o fabricación a grandes escalas de elementos de acero tipo perfiles o con determinadas y minuciosas especificaciones. En consecuencia, el hecho de tener gran cantidad de elementos generaría que en obra se tengan que realizar mayores uniones o soldaduras influyendo en el plazo de obra. Por lo que, al no contar con el abastecimiento necesario para la obtención de todos los elementos planteados en la estructuración de la edificación, tendría que solicitarse la importación de dichos elementos de mercados extranjeros que sí cuentan con producción a mayor escala y especializada.
- Análisis Sísmico: Las estructuras de acero pueden presentar un buen comportamiento ante sismo; no obstante, estos requieren un análisis, en muchos casos, mayor a las de concreto armado.

A continuación, se presentan algunas consideraciones, que pretenden dar un atisbo como posibles soluciones a los principales problemas planteado en el fragmento anterior:

- En vista a que muchas veces la cantidad de elementos estructurales fabricados a nivel nacional es limitada, los diseñadores especializados en acero se ven muy limitados y no pueden elaborar diseños más sofisticados que generen un valor adicional a la construcción de una estructura de acero. En vista de ello, se requiere iniciativa por parte de las empresas productoras de este material en el País, para poder expandir su mercado y hacer frente, incluso, a grandes productoras internacionales.
- En vista del gran peligro sísmico al que está condicionado el Perú, será necesario mucha más investigación por parte de las universidades o empresas privadas acerca del comportamiento sísmico de una estructura de acero, de acuerdo a nuestras normas y condiciones geotécnicas presentes. En el Perú, se cuentan ejemplos de estructuras de acero utilizados que abarcan: Estructuras de soporte, tiendas de almacén comercial, naves industriales, sistemas mixtos de concreto reforzado y acero, además de usarse para métodos de reforzamiento estructural, como arriostamiento, etc. Sin embargo, los ejemplos en el que se ha usado este material como principal materia para el diseño y ejecución de una edificación de gran altura son nulas, en gran medida, por la falta de investigación sobre el comportamiento de este tipo de edificaciones frente a un sismo en territorio nacional.
- Debido a que la normativa peruana para acero estructural (Norma Diseño de Acero E.090) se encuentra desarrollada fundamentalmente como un resumen de normas internacionales,



mencionadas en la sección 2.3 del presente informe, es obligatorio el poder desarrollar una norma que se adecúe a las solicitaciones sísmicas del país y nuestra realidad, tanto económica, geográfica, ambiental, etc.

#### **4. Conclusiones y recomendaciones**

##### **4.1. Conclusiones**

- Se ha podido evidenciar que el uso de acero como material del sistema estructural trae muchas ventajas con respecto a costos, plazos de ejecución y constructibilidad. Sin embargo, al igual que los edificios de concreto armado, se debe tener una correcta planificación tanto para la colocación de los elementos que conforman el sistema como para la fabricación de estos.
- Una ventaja importante del acero es que es un material reciclable, debido a que se puede reutilizar varias veces sin que pierda sus propiedades lo que resulta beneficioso tanto en el ámbito económico como medioambiental.
- Se concluye que existen muchas ventajas del uso del acero estructural por sobre el concreto reforzado para masificar su uso a gran escala en el sector constructivo del país, sin embargo, la falta de información (a través de mayor cantidad de estudios de investigación y experimentación) y la falta de iniciativa, por parte del sector público y privado, ha permitido que este tipo de estructuras queden estancados y limitados a usos específicos, como refuerzo en sistemas de concreto armado o como elementos para sistemas estructurales de baja altura, dentro del territorio nacional.
- Se puede concluir que tanto el acero presenta comportamientos adecuados ante efectos sísmicos y ante temperaturas elevadas en incendios, ya que ello se ha podido evidenciar a través de los ejemplos de comportamientos ante incendios de los edificios ubicados en Madrid, Venezuela y Taiwán. Sin embargo, estas requieren revestimiento para cumplir con dicho objetivo. Así mismo, los edificios con sistemas estructurales de acero presentan un desempeño sísmico adecuado, puesto que se comportan de manera elástica frente a acciones dinámicas.
- Pese a que existe una disponibilidad de acero como materia prima, algunos países en vías de desarrollo como México y Perú no cuentan con la tecnología necesaria para transformar dicha materia prima en productos como perfiles, pernos, entre otros productos comerciales. Entonces, a pesar de que estos productos metálicos no presentan disponibilidad casi inmediata en algunos países, es posible suministrar de acero a través



de la importación; sin embargo, se debe considerar algunas variables y criterios para que el abastecimiento de los productos de acero se pueda realizar de manera oportuna.

- A nivel normativo, se concluye la importancia de los profesionales nacionales cuenten con una norma de diseño en acero que se adecúe a la realidad peruana, dado que existen casos, como el ocurrido en la infraestructura educativa de la Ciudad de México, en la que las demandas sísmicas que produjo el sismo fueron mucho mayores a las de diseño debido a que el proyecto se realizó bajo especificaciones exteriores. Por otro lado, esto involucra también un mayor desarrollo en la normativa para las especificaciones de diseño en las conexiones de acero, representando estos uno de los eslabones más débiles de una edificación estructurada en acero.
- Se concluye que el uso de sistemas compuestos (concreto y acero estructural) como alternativa para el diseño y ejecución de edificaciones de gran envergadura resulta muy atractivo, pues de esta manera se busca optimizar las ventajas de cada material por separado para poder obtener las mejores propiedades de cada uno, tal como se realizó en la ejecución del Centro de Convenciones de Lima.
- Se concluye que existen pocos profesionales a nivel nacional que cuenten con especialización para la estructuración y diseño de sistemas estructurales de acero.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Si bien se presentan ciertas desventajas, el ahorro en costo y tiempo son factores que se valoran en la ejecución de una obra; entonces, si en el sector peruano se logra reducir estos retos, las estructuras de acero serían completamente viables.
- A modo de recomendación, se indica un mayor involucramiento por parte de los profesionales de la construcción acerca de este tipo de sistemas estructurales, puesto que permitirían dar un gran paso en el proceso de la industrialización del sector construcción en el país.
- Como recomendación para las mayores empresas productoras de acero en el mercado nacional, se propone una mayor toma de iniciativa para poder aportar en el desarrollo de los profesionales y así, en conjunto, buscar hacer crecer el sector siderúrgico en la construcción del país.
- Se debe promover la investigación sobre el comportamiento de sistemas estructurales constituidos por acero en edificaciones frente a un sismo en territorio nacional. Además,

se debería implementar un acápite en la norma peruana de acero estructural que mencione los requisitos mínimos ante las solicitaciones sísmicas del Perú y su contexto.

- Es importante comparar el comportamiento estructural de las edificaciones compuestas por acero estructural en su totalidad y sistemas compuestos (concreto y acero estructural), ya que, ambas alternativas tienen similares ventajas constructivas y económicas, por lo cual, establecer sus diferencias podría ser útil para la elección de un adecuado sistema estructural según sea el beneficio.
- El diseño de los elementos que conforman los edificios de acero no solo debe tener un gran nivel de detalle, sino que su diseño debe tener en consideración la disponibilidad en el mercado, así como la capacidad de los talleres; pues existe la posibilidad de que elementos de grandes dimensiones no puedan ser fabricados. Así mismo, se debe tener en consideración que en el lugar de la obra se tenga el suficiente espacio para poder situar e izar los elementos de acero.

## 5. Referencias

AISC. (2016a). *Code of Standard Practice for Steel Buildings and Bridges*. Estados Unidos. Recuperado de [www.aisc.org](http://www.aisc.org)

AISC. (2016b). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Estados Unidos. Recuperado de [www.aisc.org](http://www.aisc.org)

AlcelorMital. (n.d.). *Estructuras de grandes luces*. Estructuras de Grandes Luces. Disponible el 17 de noviembre de 2021, de [https://constructalia.arcelormittal.com/es/soluciones\\_por\\_aplicacion/estructuras\\_de\\_grandes\\_luces](https://constructalia.arcelormittal.com/es/soluciones_por_aplicacion/estructuras_de_grandes_luces)

ANTONIO BLANCO BLASCO Ingenieros E.I.R.L. (2019). *Las estructuras de los centros comerciales*. *Las Estructuras de Los Centros Comerciales*. Disponible octubre 29 de 2021, de <https://docplayer.es/68896438-Las-estructuras-de-los-centros-comerciales-antonio-blanco-blasco-ingenieros-e-i-r-l.html>

Álvarez, O., & Cházaro, C. (n.d.). Cuando Construir en Acero. *El Acero Hoy*. Asociación Latinoamericana del Acero. (2016). *Especificación para construcciones de acero*. American Institute of Steel Construction (AISC).

Bonett, R. (2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios, Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado de <https://www.tdx.cat/handle/10803/6230;jsessionid=D8726E9ADDB43805A11AFCD6DFDEC8C3#page=1>

Calvalcanti, R., & Rodríguez, I. (2020). *Análisis sectorial de la industria de la construcción con acero y la oportunidad para estructuras galvanizadas*. Tesis de maestría. Universidad de Piura. Recuperado de <http://purl.org/pe-repo/renati/type#trabajoDeInvestigacion>

Calizaya-Vera, R. (2017). *Análisis de costo-tiempo entre edificación a porticada de concreto y en acero A36, Pabellón 3A C.E. 14753*. Tesis para optar el título de ingeniero civil. Universidad de Piura.

Cárdenas, L., Pérez, J., & Sánchez, X. (2012). *Caracterización del acero utilizado para la construcción de paneles tipo Mabey compacto 100*. Proyecto para optar el título de ingeniero civil. Escuela Politécnica del Ejército.

Cházaro, C. (n.d.). *¿Cuándo construir en acero?* El acero de Hoy. México. Recuperado de [https://www.gerdaucorsa.com.mx/sites/mx\\_gerdau/files/PDF/Cuando-contruir-en-acero-min.pdf](https://www.gerdaucorsa.com.mx/sites/mx_gerdau/files/PDF/Cuando-contruir-en-acero-min.pdf)

David, M., López, R., Jairo, J., & Giraldo, A. (2008). *Comparación técnico-financiera del acero estructural y el hormigón armado técnica and financiera en concreto y acero*. Año, 75, 47–56.

DIPAC Productos de Acero. (n.d.). *Historia de las estructuras metálicas*. Disponible 30 de octubre de 2021, de <https://blog.dipacmanta.com/estructuras-metalicas/>

Fernández, V., & Moscoso, E. (2020). *Elementos compuestos: una alternativa viable para edificaciones de gran envergadura*. ResearchGate. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/340609656>

García, P. (2019). *Historia del acero como elemento estructural*. In CCU. *Ingenieros Asesores*. (2021, April). *¿Cómo han evolucionado las estructuras de acero?* *Arquitectura y Edificación*. Disponible 30 de octubre de 2021, de <https://ingenierosasesores.com/actualidad/como-han-evolucionado-estructuras-acero/>

Herrera, R. (2002). “*Diseño sísmico de estructuras mixtas*.”

Instituto Técnico de la Estructura de acero. (n.d.). *Construcción en acero Factoreseconómicos y comerciales* (Vol. 1). ITEA. Disponible noviembre 11 de 2021, de [http://www.webaero.net/ingenieria/estructuras/metaliana/bibliografia\\_documentacion/itea/TO MO1.pdf](http://www.webaero.net/ingenieria/estructuras/metaliana/bibliografia_documentacion/itea/TO MO1.pdf)

Instituto Técnico de la Estructura en Acero. (n.d.). *Construcción en acero. Introducción al diseño* (Vol. 2). ITEA. Disponible octubre 29 de 2021, de [http://www.webaero.net/ingenieria/estructuras/metaliana/bibliografia\\_documentacion/itea/TO MO2.pdf](http://www.webaero.net/ingenieria/estructuras/metaliana/bibliografia_documentacion/itea/TO MO2.pdf)

Instituto Técnico de la Estructura en Acero. (n.d.). *Construcción* (Vol. 4). Disponible noviembre 11 de 2021, de [http://www.webaero.net/ingenieria/estructuras/metaliana/bibliografia\\_documentacion/itea/TO MO4.pdf](http://www.webaero.net/ingenieria/estructuras/metaliana/bibliografia_documentacion/itea/TO MO4.pdf)

Jaramillo, A. (2018). *Diseño sismorresistente de construcciones de acero* (5th ed.).

Mendoza, Carlos (2007). *Análisis y diseño estructural en acero de una nave industrial con las especificaciones A.I.S.C. Método L.R.F.D 1993*. Tesis para obtener el título de ingeniero civil. Instituto Politécnico Nacional.



Ortiz, K., & Meza, M. (2018). *Análisis del impacto producido por la utilización del acero reciclado en la construcción de edificaciones en la ciudad de barranquilla*. Tesis para obtener el título de ingeniero civil. Universidad de la Costa. Barranquilla.

Pignatta, V. (2006). *Estructuras de acero en situación de incendio*. 26-42.

Plataforma Europea del hormigón. (2008). Resistencia al fuego. *Hormigón*, 28–56.

Power, G. (2007). Materiales metálicos y reciclaje. *Ingeniería Industrial*, 205–222.

Rumbo Minero. (2016). *Estructuras Metálicas: Eficiencia de acero*. Disponible octubre 29 de 2021, de <https://www.rumbominero.com/revista/informes/estructuras-metalicas/>

Rumbo Minero. (2019, noviembre). *Construcción con Estructuras Metálicas*. Disponible octubre 29 de 2021, de [https://www.rumbominero.com/revista/informes/construccion-con-estructuras metalicas/](https://www.rumbominero.com/revista/informes/construccion-con-estructuras-metalicas/)

Sarma, K., Adeli, H., Fellow, & ASCE. (2000). Fuzzy discrete multicriteria cost optimization of steel structures. *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*.

Tapia Hernández, E., Salvador, J., & Carrera, G. (2019). Comportamiento de estructuras de acero durante los sismos de septiembre de 2017. In *Revista de Ingeniería Sísmica* (Vol. 101).

Trejo, L. (2019, septiembre 5). *¿Cuál es la diferencia entre el hierro y el acero? Láminas y Aceros*. Disponible octubre 29 de 2021, de <https://blog.laminasyaceros.com/blog/cu%C3%A1l-es-la-diferencia-entre-el-hierro-y-el-acero>