

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO  
EN ARQUITECTURA**



**ESTRUCTURAS DE ACERO LIVIANAS Y AUTOMATIZADAS  
PARA  
LA SOLUCION DE EDIFICACIONES HABITACIONALES**

**TESIS QUE PRESENTA  
ANDRES ALBERTO GARCIA GONZALEZ**

**CIUDAD DE MÉXICO  
2005**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**ESTRUCTURAS DE ACERO LIVIANAS Y AUTOMATIZADAS  
PARA  
LA SOLUCION DE EDIFICACIONES HABITACIONALES**

**TESIS QUE PRESENTA**

**ANDRES ALBERTO GARCIA GONZALEZ**

**PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN ARQUITECTURA  
CAMPO DE CONOCIMIENTO TECNOLOGÍA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO  
EN ARQUITECTURA**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO**



**2005**

*DIRECTOR DE TESIS:*

**M. EN ARQ. FRANCISCO REYNA GOMEZ**

*SINODALES:*

**M. EN ARQ. ENRIQUE SANABRIA ATILANO**

**ARQ. ALFONSO RAMIREZ PONCE**

**M. EN ARQ. JORGE QUIJANO VALDEZ**

**M. EN ARQ. JORGE RANGEL DAVALOS**

## INDICE

	<u>Pág.</u>
<b>1.0 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 <b>Objeto de investigación.</b>	<b>3</b>
1.2 <b>Definiciones.</b>	<b>4</b>
1.3 <b>Objetivos e hipótesis.</b>	<b>6</b>
1.4 <b>Justificación del proyecto.</b>	<b>6</b>
1.5 <b>Aportes e importancia.</b>	<b>8</b>
<b>2.0 PROBLEMÁTICA DEL ACERO</b>	<b>12</b>
2.1 <b>Los mitos de la construcción metálica en Colombia.</b>	<b>13</b>
2.2 <b>Marco jurídico.</b>	<b>14</b>
2.3 <b>La llegada del acero a Colombia.</b>	<b>16</b>
2.4 <b>Costos de las estructuras de acero en Colombia.</b>	<b>32</b>
<b>3.0 TIPOLOGÍA DEL ACERO ESTRUCTURAL</b>	<b>36</b>
3.1 <b>Caracterización de las estructuras de acero.</b>	<b>38</b>
3.2 <b>Elementos tipológicos fundamentales.</b>	<b>40</b>
3.3 <b>Elementos estructurales ideales para edificaciones habitacionales: los perfiles tubulares de acero.</b>	<b>47</b>
3.4 <b>Tipologías estructurales en acero usadas en edificaciones habitacionales.</b>	<b>58</b>
3.5 <b>Potencial verde del acero.</b>	<b>62</b>
<b>4.0 ANÁLISIS DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN COLOMBIA Y PROCESOS ESTRUCTURALES EN ACERO</b>	<b>66</b>
4.1 <b>Sistemas estructurales de aplicación en Colombia.</b>	<b>67</b>
4.2 <b>Estructuras de acero y sus procesos constructivos: diseño fabricación y montaje.</b>	<b>73</b>
4.2.1 <b>Servicios administrativos previos a la ejecución de la obra.</b>	<b>74</b>
4.2.2 <b>Etapa Preliminar.</b>	<b>75</b>
4.2.3 <b>Análisis estructural.</b>	<b>76</b>
4.2.4 <b>Etapa De Diseño.</b>	<b>77</b>
4.2.5 <b>Concursos y contrataciones.</b>	<b>79</b>
4.2.6 <b>Fabricación de estructuras de acero.</b>	<b>81</b>
4.2.7 <b>Montaje y ensamble de estructuras de acero en obra.</b>	<b>85</b>
4.3 <b>Ventajas y desventajas del acero y del concreto como elementos estructurales.</b>	<b>88</b>
4.3.1 <b>Ventajas y desventajas del acero de alto desempeño.</b>	<b>95</b>
4.3.2 <b>Aportes de la construcción metálica.</b>	<b>96</b>
4.3.3 <b>Sumario de la argumentación a favor del acero:</b>	<b>96</b>

**5.0 ESTRUCTURAS DE ACERO LIVIANAS Y AUTOMATIZADAS**  
**ANALISIS SINCRETICO PARA SU CONFORMACION**

5.1	<b>Tecnología del acero estructural hoy.</b>	<b>100</b>
5.2	<b>Visión prospectiva de la construcción.</b>	<b>102</b>
5.3	<b>Sistemas y tecnologías para la automatización en la construcción.</b>	<b>105</b>
5.4	<b>Innovación Estructural Para Edificaciones Habitacionales. Sistema “Staggered Truss”</b>	<b>116</b>
5.5	<b>Software especializado para el Sistema Staggered Truss. ETABS.</b>	<b>125</b>
5.6	<b>Protección Contra el Fuego.</b>	<b>127</b>
<b>6.0</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>136</b>
6.1	<b>PROPUESTA ESTRUCTURAL</b>	<b>137</b>
6.1.1	Celosías Tubulares Alternadas, Livianas y Automatizadas.	
6.1.2	Conceptos estructurales aplicados.	
6.1.3	Análisis y diseño estructural.	<b>138</b>
6.1.4	Fabricación.	<b>140</b>
6.1.5	Herramientas y equipos empleados.	<b>142</b>
6.1.6	Transporte de la estructura al sitio de obra.	
6.1.7	Ensamble estructural automatizado.	
6.1.8	Resistencia ilimitada frente al fuego.	<b>144</b>
6.1.9	Acabados y sistemas divisorios.	<b>145</b>
6.2	<b>Corolario.</b>	<b>146</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA</b>	<b>149</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>153</b>

## 1.0 INTRODUCCIÓN

Hoy que empezamos a afrontar un nuevo milenio, con un excelente balance cognoscitivo a nuestro favor, y un porvenir que ha dejado de ser utópico para convertirse en realidades prospectivas, supremamente factibles de ser desarrolladas gracias a la alta tecnología que hemos alcanzado en todos los campos; debemos avanzar en la búsqueda de conocimiento, lanzando propuestas visionarias que generen un mejor entorno habitable y una mejor calidad de vida.

Es así, que para la materialización de los espacios, contamos con una multiplicidad de posibilidades que sumadas a la racionalización de los procesos y la industrialización de los sistemas productivos, nos permiten brindar soluciones espaciales dignas, de buena factura y con un buen rendimiento económico. En el campo de la construcción hoy podemos gozar de alta y cada vez mejor calidad en los materiales empleados, elementos más resistentes con una mejor relación peso/dimensión, y que empiezan a estar al alcance de todos al ser más económicos cada día.

Para la construcción de espacios habitacionales disponemos de muchos sistemas y técnicas constructivas desarrolladas y probadas a través de este proceso de industrialización. Históricamente, el acero se ha presentado como una opción constructiva, que ha prevalecido como la más factible en la construcción de rascacielos, y que en las edificaciones de poca altura se disputa el puesto como material óptimo con el concreto reforzado. Se busca entonces sentar precedente acerca de la evaluación de las ventajas y desventajas de un tipo de estructura, dejando en claro que esto forma parte de un proceso y que la elección de un determinado tipo es el resultado de todos los factores que intervienen en la solución arquitectónica.

Consecuentemente en nuestra labor de arquitectos y en la pormenorizada búsqueda de una solución inteligente para satisfacer las necesidades humanas, debemos abarcar y analizar varias etapas con sus múltiples exigencias, como la de adaptabilidad, que obliga a emplear estructuras y sistemas constructivos que permitan ampliar los edificios, modificarlos o desmontarlos a través del tiempo. Como respuesta a esa exigencia, se explica la progresiva tendencia a la prefabricación y a la construcción de esqueletos sustentantes en donde el concreto y el acero son los materiales predominantes, siendo este último el material que proyecta un mejor advenimiento, de ahí que planteemos las estructuras de acero livianas y automatizadas como una solución para las edificaciones habitacionales.

Al analizar en esta investigación la problemática de las edificaciones habitacionales y los antecedentes históricos del uso de estructuras de acero y su situación actual, es destacable la importancia y viabilidad de nuestra propuesta, ya que están dadas todas las condiciones

en el País para recuperar el tiempo perdido durante 4 décadas. Otros autores critican la problemática del uso del concreto por su transporte en las ciudades, la contaminación que este genera, el daño ecológico en las canteras, el desperdicio del material, el tener que fabricar la misma estructura en madera simplemente para darle forma al concreto, y a que en los últimos años el precio del concreto ha crecido relativamente más que el acero, son factores que van en contra de la utilización de este material, indicando que ha llegado la hora de recurrir a técnicas optativas, y a los últimos avances tecnológicos como el de la automatización.

Esta tendencia hace aún más viables las estructuras de acero; que por sus cualidades han sido acreditadas desde hace mucho tiempo como una excelente alternativa, y en el futuro se espera que la aplicación de la nanotecnología nos permita mejorar aun más las cualidades del acero, puesto que estamos frente a la expectativa de utilizar nano-tubos de carbón, los cuales incrementan su resistencia y reducen su peso, permitiéndonos “conquistar las alturas”. Hasta el momento el acero ha sido probado como el material idóneo, que ha permitido junto con el desarrollo de los elevadores, la verticalización de la vivienda.

La gran demanda actual de vivienda, en especial del rango de Vivienda de Interés Social, los altos costos de construcción, la calidad cuestionable de las obras destinadas a personas de escasos recursos, son razones por las cuales se hace necesario generar soluciones a corto plazo. La utilización de estructuras livianas de acero como parte del proceso constructivo de las edificaciones habitacionales puede ser el camino a seguir, gracias a las ventajas constructivas y organizacionales que brinda, las cuales se ven reflejadas en su duración y costo final.

Coincidimos en que es importante involucrarse y dominar los conocimientos acerca de las estructuras de acero, para poder transmitir y difundir las nuevas técnicas aplicadas en otros países, y de esta manera tratar de masificar el uso de este sistema en nuestro contexto, derrumbar los mitos que se han arraigado en la mentalidad tradicionalista que trata de impedir el cambio. Son paradigmas que solo con hechos y justificaciones se pueden alcanzar, de aquí el empeño de esta investigación.

Estos paradigmas nos estimulan si son positivos y nos frenan cuando son negativos y obsoletos. Tal vez nos estamos enfrentando a uno que plantea el desaferrarnos de una técnica tradicional y adaptarnos a otras muchas. Hace muchos años se aseguraba que viajar en tren sería mortal a una velocidad de 100 kilómetros por hora. Hoy en día el tren Nagler sale de Shangai y vuela a una fabulosa velocidad de 500 kilómetros horarios. Y los que saben del tema aseguran que, en un futuro, los trenes correrán a 1000 o 1600 kilómetros por hora.

El mundo del siglo XXI cambia velozmente y debemos actuar con prudencia, al empezar a forjar el paso que vamos a dar al girar en la esquina, y acierto para así saber qué conservar y qué desechar, puesto que es evidente el hecho que en todas las áreas de la vida existe la tentación de aferrarse a normas o creencias que se convierten en cadenas;

por eso debemos pedir luz a Dios, proceder con seguridad gracias al conocimiento que desarrollemos y ser osados para cambiar y reinventarnos.

## **1.1 Objeto de investigación.**

### **1.1.1 Las edificaciones de vivienda y su solución estructural en acero.**

La arquitectura vista como la respuesta a una problemática que busca la generación de espacios habitables óptimos que mejoren la calidad de vida; esta intrínsecamente relacionada con la tecnología constructiva que el hombre ha desarrollado, puesto que el objeto arquitectónico requiere de la tecnología que le provea de procesos técnico que lleven a feliz termino la construcción material de dicho objeto.

La técnica permite materializar el objeto arquitectónico con las manos del hombre que se apropia de estos conocimientos. “Al habitar llegamos, así parece, solamente por medio del construir. Éste, el construir, tiene a aquél, el habitar, como meta”<sup>1</sup>.

La falta de espacio habitable es grande, el déficit habitacional en Colombia estaba estimado para el año 2000 en dos millones de unidades habitacionales; tener donde alojarse es ciertamente algo tranquilizador y reconfortante; y es nuestra labor como arquitectos asegurarnos que estas construcciones destinadas a servir de vivienda proporcionen dignamente alojamiento; incluso tener una buena distribución, facilitar la vida práctica, tener precios asequibles, y estar abiertas al aire, la luz y el sol.

“Dentro de estas soluciones de espacio habitable, encontramos una gran variedad de objetos arquitectónicos, distinguidos por una gama de características que los diferencian entre sí, y que permiten que el hombre viva y habite el espacio, es decir permiten que el hombre sea habitador”<sup>2</sup>.

Una de estas soluciones son las edificaciones habitacionales, cuya principal característica consiste en disponer dentro de un objeto vertical una serie de elementos horizontales, o pisos, que servirán para ser habitados. Desde el punto de vista estructural, estas edificaciones se subdividen en grupos, bien sea por el material con que están construidas, por su altura, por su peso, o por su resistencia al sismo.

Para fines de esta investigación, nos enfocaremos en las edificaciones habitacionales, que utilicen un sistema estructural en acero, de poca altura ya que en Colombia el promedio de estas edificaciones tiene un rango de 6 a 12 pisos, que sean estructuras livianas, lo cual permite una mayor economía y una mejor respuesta sismorresistente ya que la fuerza sísmica horizontal es proporcional al peso de la edificación.

---

1 “El habitar sería en cada caso el fin que preside todo construir. Habitar y construir están el uno con respecto al otro en la relación de fin a medio”. Construir, habitar, pensar”. MARTIN HEIDEGGER. traducción de Eustaquio Barjau, en conferencias y artículos, serbal, Barcelona, 1994.

2 “Ser hombre significa: estar en la tierra como mortal, significa: habitar. Ídem: HEIDEGGER, 1994.

## 1.2 Definiciones.

El término de estructuras encierra un potencial formal en lo estético, y la arquitectura puede potenciar su dimensión estética gracias a la estructura. La noción de lo estético sin entrar en detalles tiene que ver con asuntos de la experiencia sensorial y emotiva. De esto se puede inferir una plástica estructural y/o una arquitectura estructural. Sería una plástica en el sentido de arte y de “dar forma”, y arquitectura en el sentido de diseño de edificaciones específicamente donde la estructura es objeto de consideraciones estéticas. En ambos casos la intervención en la estructura es intencionada y hace un énfasis en la forma desde el punto de vista estético.

*“El arte de dar forma a las estructuras, el arte de hacer parte de la arquitectura a la estructura y el arte de hacer arquitectura a la obra civil convergen en lo que hemos denominado plástica estructural. La plástica es el dar forma con una intencionalidad estética. A la estructura hay manera de hacerla objeto de una plástica. La plástica estructural es amplia en procedimientos, tan amplia como es la misma arquitectura y es casi de su misma naturaleza. La plástica estructural requiere de conocimientos de ingeniería puesto que con ellos se validan las premoniciones de los comportamientos físicos. Su conocimiento de ingeniería requiere de una flexibilidad a lo distinto y una sensibilidad a lo estético. La manera como se plantea aquí implica un reconocimiento histórico de que la separación disciplinaria requiere puentes metodológicos si se quiere resolver en beneficio de la obra misma y de quienes la usan y la contemplan”<sup>3</sup>.*

La plástica estructural establece un puente entre arquitectura y los medios materiales que la hacen posible, interfiriendo en la manera como la arquitectura resuelve las funciones prácticas y como ella se enfrenta a la tensión que se establece entre dichas funciones y el valor estético en la obra. Conceptualmente las estructuras metálicas están ligadas a su carácter constructivo industrializado, y quizás una de sus innegables ventajas: la prefabricación. Desde la misma fabricación de la materia prima, o de la aleación del hierro con el carbono para producir el acero, todo esta ligado a un proceso industrial que nos permite controlar todo al detalle, conocer sus cualidades y, nos permite realizar los trabajos de fabricación fuera del sitio de obra.

El propósito o función general de las estructuras es la transmisión de todas las cargas que intervienen en el edificio al suelo. Las estructuras se constituyen en el elemento portante de la edificación. Deben ser funcionales, y mantener una relación física balanceada entre la forma con respecto al uso. Su factibilidad incluye consideraciones de costo, disponibilidad del material y lo práctico de su construcción. Estructuralmente, la seguridad es el aspecto de mayor jerarquía y, en el caso de las estructuras de acero, es el que ha incrementado su uso a nivel mundial, ya que estas permiten una perfecta conjugación entre seguridad con otros criterios de diseño con relación a su esbeltez y bajo peso, que mejora su rendimiento ante el tema de sismos.

---

<sup>3</sup>Posso Mayor, Héctor Fabio. Plástica o arquitectura estructural. Primer Encuentro Del Acero En Colombia. Enacero. Cartagena, 2001.

Calificaremos una obra de arte, construcción, o edificación con estructura metálica, a aquella cuyos elementos principales de su estructura portante sean metálicos y permanecen a la vista, no están cubiertos por materiales que disimulen sus características visibles; a excepción de aquellos requeridos para su correcto funcionamiento y protección. Por ejemplo un perfil pintado permanece como un elemento plásticamente metálico, mientras que el mismo perfil revestido por una cubierta independiente, no lo es.

Al generalizar con estructuras de acero, nos referimos a todas aquellas que están conformadas básicamente por miembros estructurales de este material, que presentan un alto grado de estandarización y que desde su fabricación se pueden clasificar como totalmente prefabricadas, puesto que se reserva la disposición final de cada elemento o grupo de estos, al montaje final en el sitio de obra.

Cuando nos referimos a estructuras livianas de acero nos referimos aquellas estructuras o elementos estructurales en que los procedimientos de ejecución y los materiales utilizados tratan de ir a formas constructivas que requieren un menor peso de acero respecto de las tradicionales; esto supone el empleo de nuevos conocimientos técnicos o experimentales. Particularmente este tipo de estructuras generalmente son:

- Estructuras de chapa delgada doblada o conformada en frío.
- Estructuras de barras de acero de sección circular.
- Estructuras de perfiles laminados pequeños.
- Estructuras de tubos de pared delgada



Fig. # 1. Estructura de acero tradicional.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
[www.supermetal.com](http://www.supermetal.com)



Fig. # 2. Estructura tubular en acero. Puente peatonal para el sistema de transporte masivo de Bogotá.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Ara. Ricardo López.

Igualmente nos referimos a las edificaciones habitacionales; como todas aquellas cuya principal característica consiste en disponer dentro de un objeto vertical una serie de sistemas, equipos y elementos horizontales, o pisos, que servirán para ser habitados. Desde el punto de vista Estructural, estas edificaciones se subdividen en grupos, bien sea por el material con que están construidas, o por su altura, o por su peso, o por su resistencia al sismo.

### **1.3 Objetivos e hipótesis.**

Se ha desarrollado y se plantea con esta investigación el uso de estructuras de acero livianas y automatizadas para la solución de edificaciones habitacionales, como una alternativa para ser evaluada dentro del proceso de diseño estructural, y que dentro de un contexto particular como el Colombiano, puede ser la solución para lograr la reactivación de la industria de la construcción y la disminución del déficit habitacional; para demostrar que con la implantación de este sistema constructivo se puede mejorar la calidad, la rentabilidad y la velocidad de construcción de las edificaciones habitacionales. Una vez comprobada esta hipótesis, y gracias al actual proceso de globalización podríamos universalizar dicho sistema.

Se busca enfocar en primer lugar esta investigación, en proponer un nuevo sistema estructural en acero, que involucre los últimos avances tecnológicos en la materia y verificar su viabilidad de aplicación en edificaciones habitacionales, buscando con este mejorar la calidad y el rendimiento económico de estos proyectos, incentivando así a las empresas a cambiar sus métodos y valorar las ventajas de este material.

En segundo lugar, divulgar y presentar nuevos métodos constructivos, como la automatización, y todos aquellos que involucren el acero estructural como elemento principal, sobretodo los que son relevantes para nuestro objeto de investigación, las edificaciones habitacionales de hasta 12 niveles; a todos los actores involucrados en esta actividad y así contribuir con el desarrollo de esta técnica que empieza a ser reconocida en nuestro contexto.

En tercer lugar, promover el uso de un material ya conocido, que fue usado ampliamente cuando se importaban estas estructuras al país desde finales del siglo XIX hasta mediados del siglo XX, fecha en la que empieza una etapa de proteccionismo del estado hacia las acerías y la producción nacional de hierro, afectando las construcciones metálicas por las restricciones aduaneras contra el acero, hasta el punto que las universidades eliminaron la materia como básica de pregrado.

*Al implementar un sistema estructural liviano y automatizado en acero, se alcanzaría solucionar la problemática de las Edificaciones Habitacionales en Colombia, mejorando su Calidad, Rentabilidad y Velocidad de Construcción.*

### **1.4 Justificación del proyecto.**

Gracias a un estudio realizado por la universidad de los Andes, de Bogotá, Colombia, del cual se hará referencia más adelante, se puede concluir que carecemos de opciones estructurales para aplicar en la construcción de edificaciones, y el acero con sus ventajas sobre otros materiales puede ser la mejor respuesta a nuestro medio. Con la aplicación de

un sistema estructural liviano y automatizado en acero, adaptado a las condiciones del mercado Colombiano, se podrán resolver constructivamente las edificaciones habitacionales.

La industrialización de la construcción en Colombia no es un tema nuevo, grandes compañías cuentan con sistemas industrializados como el “Outinor”, pero las compañías pequeñas y constructores independientes no tienen acceso a muchos de estos métodos industrializados, o bien porque no han llegado al país o por su elevado costo.

Por lo tanto las opciones se limitan a sistemas tradicionales en donde el concreto es el material más utilizado y tal vez el único con que hemos aprendido a construir; algunos desde la universidad y otros por la alta experiencia artesanal desarrolladas durante muchos años. Las opciones son pocas, y aunque contamos con una gran variedad de especies arbóreas, solo una parte de ellas puede ser utilizada como elementos estructurales, como la “guadua” de la que existen ejemplos fabulosos en otros campos, lo que hace deseable que sus propulsores indaguen su aplicación en las edificaciones en el rango de entre 6 y 12 pisos que es nuestro caso. Sin embargo la gran parte de otras especies madereras cuenta con protección por parte del estado para su explotación, debido a la tala indiscriminada y al aniquilamiento de los bosques y selvas.

El acero como opción estructural, permite la especialización de mano de obra con una clara división de labores durante la obra. La estandarización esta garantizada por el fabricante, en la cual cada elemento cuenta con características constantes definidas anticipadamente, además se logra un alto grado de coordinación modular. La mecanización es alta y actualmente con la tecnología que tenemos a disposición podemos automatizar estos procesos. Por ultimo la comercialización dentro del mercado Colombiano es favorable, no solo por los bajos costos que ha adquirido el acero por la globalización, si no por el pronto retorno de la inversión, lo cual favorece a las pequeñas empresas y al constructor independiente que tienen que recurrir a préstamos con elevados intereses.

Precisamente la falta de inversión en Colombia se debe a que los intereses que se cobran al sector constructor son muy altos, y son el rubro más costoso dentro de un presupuesto de obra. Esto, sumado a que los sistemas tradicionales de construcción requieren de un prolongado periodo de tiempo para finalizar la obra, se convierte en la causa de fracaso para muchas empresas. Este es uno de los puntos clave, ya que nuestra propuesta puede atraer más el capital de inversión y abaratar los costos de financiación, gracias al pronto retorno de la inversión y a la velocidad con que se construye con acero.

Otro punto de vital importancia del proyecto es el impacto ecológico. El déficit de soluciones de vivienda para el año 2000 era de 2.000.000 de unidades. Para producir tal cantidad de soluciones con los métodos tradicionales requeriríamos de un elevado volumen de materiales no renovables causando un gran impacto ecológico. El acero es un material reciclable, reutilizable, que permite por el contrario beneficiar el medio ambiente al limpiarlo de desechos metálicos. Al mismo tiempo se genera empleo y nuevas oportunidades para empresas siderúrgicas al fundir estos desechos o “chatarra” para

destinarlos a la construcción, tal como sucede en los países industrializados, como en el caso de la república China que consume altos volúmenes de estos para reciclarlos.

Este proceso de transferencia de tecnología, buscaría demostrar que las estructuras de acero para la solución de edificaciones habitacionales puede ser una opción constructiva viable. Y el implementar procesos tecnológicos como la automatización, nos permitiría incrementar la velocidad y calidad de la construcción, se disminuirían costos en muchos ítems; por ejemplo al ser las estructuras de acero más livianas requieren pequeñas cimentaciones, la calidad del espacio se ve mejorada al producir espacios libres de elementos estructurales en su interior, y el impacto ecológico es menor que si se planteara construir con otros materiales. Todo esto incrementa las ganancias, y con ello se abriría el camino para nuevas empresas, inclusive extranjeras en un mercado potencialmente interesante.

### **1.5 Aportes e importancia.**

El aporte de nuestra propuesta es vital cuando en los programas arquitectónicos de diseño de edificación se busca resolver uno de los principales problemas, el de proveer una estructura portante que garantice la seguridad de sus habitantes. Es aún más importante cuando las opciones se reducen a la aplicación de un solo material, el concreto en sus distintas manifestaciones, descartando alternativas y cegando las oportunidades de actualización. Aún cuando existen muchos materiales como la mampostería estructural y la madera, prácticamente se tiende a elegir las estructuras de concreto con sus múltiples procesos y formas, despreciando los demás, como las estructuras de acero que brindan un esqueleto portante liviano como resultado de la interacción de piezas prefabricadas con anterioridad.

Además de un llamado de cambio y evolución, se plantea un sistema constructivo original, que después de analizar y retomar procedimientos y procesos de otras técnicas ya probadas, las condensa sincreticamente, dando origen y forma a un nuevo sistema constructivo que al fusionarse con nuevas tecnologías alcanza su mayor importancia, la automatización asegurando así su vigencia hacia la posteridad.

La escasa información tecnológica sobre las estructuras de acero es un argumento más que motiva la investigación en este campo. Las personas que imparten estas cátedras en distintas universidades de Colombia, han argumentado que una de las posibles causas de que no se utilicen mayormente este tipo de estructuras es precisamente la carencia de conocimiento y de la práctica requerida para su uso, debido a que en el país hubo un lapso de 40 años durante el cual se prohibió la importación de acero, y con ello la de los perfiles y demás elementos necesarios, lo cual además de crear el mito de su alto costo, propicio el auge de concreto.

Es entonces indudable que una de las causas primordiales por la poca diseminación del uso de estructuras de acero dentro de este contexto sea precisamente la poca preparación

profesional de los constructores en este tema, y que sumado a la poca actualización tecnológica e interés sobre el tema hacen que cada vez sea más difícil acceder y proponer este tipo de soluciones. Esta deficiencia es el punto de partida de esta investigación, en donde prevalece la incitación por proponer soluciones innovadoras que renueven nuestra industria permitiéndonos acceder al manejo de esta técnica y consiguiendo de esta manera llenar el vacío tecnológico del pasado.

La determinación sobre cual sea el sistema ideal, no es una tarea fácil ya que esta influenciada por múltiples factores, en donde cada uno por insignificante que parezca en un proyecto, puede ser vital al momento de la toma de decisiones para otro proyecto. Además no se trata de un proceso intuitivo como ocurre en la actualidad, donde a-priori se juzgan como únicamente viables las estructuras de concreto, sin aplicar procedimientos racionales que nos ayude a seleccionar la solución óptima para determinado proyecto. Este es el caso Colombiano, en donde la industria de la construcción no ha podido franquear una primera etapa artesanal, estancándose en el tradicionalismo sin preocuparse por actualizar sus métodos para al menos sentar precedente de su existencia.

Un estudio realizado por el Instituto Americano de la Construcción en Acero, arroja como resultado que el 60% del costo total de una estructura de acero consiste precisamente en el montaje y ensamble de la misma, cifra elevada que para un contexto latinoamericano como el nuestro se convierte en una gran limitante. Tratando de solucionar esto, se plantea un sistema automatizado que además de auto-ensamblarse permite que todo el trabajo se realice a nivel de cimentación, consiguiendo con esto la disminución de costos en maquinaria, mano de obra y tiempo.

Su importancia consiste en plantear el mejoramiento económico y la calidad de las construcciones habitacionales gracias a un nuevo sistema constructivo, además de presentar nuevas tecnologías, y de contribuir con un plan de divulgación de arquitectura y construcción metálica, inquietud ampliamente compartida por los actores de esta técnica en mi país, que concluyen que es necesario un programa de maestría en arquitectura y construcción metálica para actualizar y complementar nuestros conocimientos, identificar sus posibilidades en el medio colombiano, y aprender las técnicas de construcción y de diseño estructural en el exterior, buscando transferir toda esta tecnología al país.

Colombia cuenta con una industria de la construcción que no se ha dejado derrumbar y que por el contrario ha asimilado las catástrofes económicas que han aquejado el país, para estar hoy más que nunca reactivando sus fuerzas para conseguir con ello el fortalecimiento de su sector. La propuesta de una opción estructural plantea un paradigma para la industria de la construcción Colombiana, afectada por muchos factores que la debilitaron y de los que actualmente se esta recuperando. Todo cambio es difícil, sobre todo cuando las empresas se han aferrado a una sola técnica, la del concreto, absteniéndose del cambio y a dejar la infraestructura que a través del tiempo han acumulado.

Este es el escenario donde nuestra propuesta actuaría, donde sembraría nuestra incitación a cambiar y adoptar nuevas técnicas, una de estas, es precisamente nuestra evaluación acerca del futuro deseable del desarrollo de las estructuras livianas de acero, su posible automatización gracias a la tecnología que se ha desarrollado, y su uso y aplicación para la solución de edificaciones habitacionales. Espero que los resultados de esta investigación esparza la semilla del cambio.

## ***PROBLEMÁTICA DEL ACERO***

## 2.0 PROBLEMÁTICA DEL ACERO

Fueron 40 años de privación que culminaron gracias a la llamada “apertura económica”, oportuna acción de un gobierno progresista que en el pasado abrió nuestras puertas al mundo para que volviéramos a tener acceso al comercio internacional del acero, para que con esto disfrutáramos nuevamente de las ventajas de este material. Los actores de esta tecnología en el país concluyen que es el momento indicado para que las nuevas tecnologías lleguen, para que sus esfuerzos se multiplique y que muchos más visionarios se lancen a promover la construcción de vivienda con estructura metálica.

Al analizar los antecedentes históricos del uso del acero en las edificaciones Colombianas, se identificaron los problemas que esta tecnología tuvo a través del tiempo en el país, se verificaron los efectos de la parálisis evolutiva que sufrió el acero por más de 4 décadas, y cuyo resultado precisamente es el origen de este proyecto de investigación.

Se descubrió durante la recopilación de información, el actual interés que existe en el gremio de la construcción por utilizar el acero como material constructivo. Empresas están desarrollando estructuras a partir de los diseños que el cliente les envía, se están exportando estructuras a países vecinos como Venezuela y Republica Dominicana, grandes unidades habitacionales se están construyendo con este material, y sobre todo el público en general esta empezando a aceptar este material gracias al uso apropiado que se le dio a la solución de transporte masivo de la ciudad de Bogotá. Todo esto genera el marco ideal para la transferencia de nuevas tecnologías.

Solucionar el alto déficit habitacional en Colombia es objetivo primordial tanto del gobierno como de la industria de la construcción. “Aunque es difícil estimar con precisión el déficit actual debido a las fuertes corrientes migratorias internas y externas, se puede tomar la base del censo de 1993 y sobre ella y de acuerdo con diversos estudios, estimar en una cifra superior a 1'400.000 el déficit actual de vivienda en el país (aunque algunos señalan que puede llegar a 2'000.000). A finales del año 2.000 se estimaban en Colombia 6'180.000 hogares urbanos, y en promedio en la década 1990 – 1999 cada año se crearon en promedio 182.000 nuevos hogares, de los cuales 128.000 con ingresos inferiores a 4 salarios mínimos legales mensuales)”<sup>4</sup>.

Sin duda esta cifra del pasado se ha desbordado en la actualidad, y debemos esperar al censo programado para este año 2005 y así obtener una nueva cifra actualizada, que sin duda ratificara el gran déficit de unidades habitacionales. Melancólico escenario forjado por la parálisis a que fue sometida la construcción durante una década, en donde la

---

<sup>4</sup> Silva Zárate, Camilo. Vivienda social en Colombia, necesidades y atención: un reto estructural: CAMACOL, Presidencia Nacional, Eduardo Jaramillo Robledo. Junio, 2001.

producción anual en todo el país no sobrepasaba los 18.000 nuevos hogares. Esto generó la iniciativa empresarial por reactivar la construcción de unidades habitacionales, y exigió a la vez, la industrialización de los métodos constructivos que ancestralmente usamos, en su mayoría tradicionales, y que son la norma de todos los proyectos, un alto rendimiento económico de igual manera fue requerido. Se espera demostrar que el acero con sus ventajas sería una buena opción técnica para ser tomada en cuenta como respuesta en nuestro medio.

Los mitos creados alrededor del acero, como el de su elevado costo sin una significativa remuneración son otra de las barreras a derrumbar. Se ignora y no se analiza detalladamente el retorno de la inversión de una estructura metálica, enfatizando aun más la falta de inversión en Colombia, que se debe precisamente a los altos intereses que se cobran al sector constructor, el rubro más costoso dentro de un presupuesto de obra. Esto sumado a que los sistemas tradicionales de construcción requieren de un prolongado periodo de tiempo para finalizar la obra, se convierte en la causa de fracaso para muchas empresas. Una opción estructural en acero, atraería más el capital de inversión y abarataría los costos de financiación gracias al pronto retorno de la inversión y por la velocidad con que se construye con acero.

## **2.1 Los mitos de la construcción metálica en Colombia.**

La primordial razón que se argumenta en nuestro contexto es el supuesto mito de que las construcciones metálicas son más costosas que las alternativas de concreto. Sin lugar a duda en el pasado, en la época del proteccionismo estatal con su prohibición para importar el acero, solo se tenía acceso a este a un costo elevadísimo; situación que ha cambiado en la actualidad en donde su precio es relativamente competitivo. Sin embargo es cierto que el presupuesto final de una estructura de acero enseña cifras un poco más altas que el de una de concreto. El resultado de estudios acepta un mayor costo del orden de un 2% en el total de la obra.

Este porcentaje de “sobrecosto” se derrumba si se consideran, dentro de los mismos presupuestos, circunstancias favorables como son el menor tiempo de construcción, el mayor aprovechamiento de espacios, la versatilidad para hacer reformas, la agilidad de los diseños y otros aspectos colaterales, esta diferencia se ve compensada con creces.

El segundo mito en Colombia lo constituyen las dificultades que advierten la no utilización de elementos metálicos en nuestras construcciones por desinformación; lamentablemente no es una fábula sino una realidad inobjetable, que está fundada por la falta de formación tecnológica y de familiarización a nivel universitario. Nuestras facultades de ingeniería civil, de arquitectura y de diseño industrial, subvaloraron en el pasado casi completamente los cursos en estructuras metálicas y éstos actualmente están ausentes en la mayoría de los centros docentes con contadas excepciones.

Definitivamente la falta de formación tecnológica en este tipo de estructuras es donde radica la razón para la ausencia de construcciones metálicas en nuestras ciudades. A esto hay que agregar, tal vez como consecuencia lógica, una marcada indiferencia hacia el tema por parte de nuestros expertos. Aunado a la mal información acerca que el acero es costoso, que no se consiguen en Colombia, que no dan acabados presentables, cómo no pensar que se evite el tema y con él las alternativas de diseño

Los proyectistas que han optado por la alternativa metálica en nuestro medio han tenido que adaptarse a este ambiente y solucionar todos los problemas de ausencias; pero han visto su esfuerzo completamente recompensado. Hasta ahora las investigaciones en este campo han empezado a cambiar el panorama, se comienza a obtener las primeras satisfacciones y se continúa profundizando en el tema, revelando un mundo sorprendente lleno de alternativas y de retos a nuestra inventiva, técnica y conocimientos.

El siguiente mito consiste en manifestar que los edificios de acero no son favorables en zonas sísmicas. Estudios realizados sobre este tema han llevado a afirmar que el sitio más seguro para estar en caso de sismo es en el último piso de un edificio hecho con acero. Y es lógico, ya que las transmisiones de las fuerzas horizontales generadas son proporcionales al peso de la edificación, por lo tanto si contamos con una edificación liviana serán asimismo menores los efectos de estas fuerzas. Adicionalmente, en varias ciudades con elevados riesgos de sismo, el diseño de edificios de muchos pisos es mandatorio con estructura de acero.

El cuarto "mito" asegura que las estructuras metálicas no resisten el fuego. Es cierto que el acero pierde su resistencia a los 600 grados centígrados y que deben tomarse medidas, al igual que con las estructuras de concreto, para retardar su calentamiento en caso de incendio. En la construcción actual hay muchas alternativas a bajo costo para proteger el acero y demorar su calentamiento, una de ella y de la cual haremos énfasis consiste en sistemas de enfriamiento a base de agua; con lo cual se ahuyenta nuevamente la excusa del no uso de estructuras de acero por su debilitación ante el fuego.

## **2.2 Marco jurídico.**

El gobierno Colombiano con sus políticas proteccionistas del pasado, influyo en el desarrollo de la construcción metálica. Alrededor del año 1954 se inicio una era de proteccionismo, el cual se puede definir como el uso de varios mecanismos con el objetivo principal de proteger las empresas nacionales de la competencia extranjera. El mecanismo más utilizado es el de aplicar un alto nivel de impuestos a la entrada de productos hechos en otros países (estos impuestos se denominan aranceles). También existen otros mecanismos como las cuotas de importación las cuales sólo permiten la entrada al país de una cantidad específica de un determinado producto extranjero, en este caso de estudio, se le impuso altos aranceles a la importación del acero.

*“Un cambio importante se registra en 1954 con la inauguración de Acerías Paz del Río, afectando las construcciones metálicas por las restricciones aduaneras, que no permitieron la importación de materia prima para proteger la siderúrgica nacional en detrimento de la utilización de las estructuras metálicas, por su limitada gama de materiales en cantidad y tipos. Hasta las universidades suprimieron la materia como básica de pregrado. Estas restricciones han sido eliminadas en las últimas dos décadas, con la apertura económica y el funcionamiento de nuevas siderúrgicas nacionales, con las cuales se ha obtenido precios competitivos internacionalmente, lo que ha incrementado el uso de las estructuras metálicas en múltiples proyectos como edificios de oficinas, vivienda”<sup>5</sup>.*

Colombia fue un país tradicionalmente proteccionista, sin embargo, a partir de 1991, durante el gobierno del Presidente Cesar Gaviria Trujillo, y fundamentado en la nueva Constitución Política de Colombia, el país entró en un esquema de apertura económica. Con la constitución de 1991 se crearon el Ministerio de Comercio Exterior, el Ministerio de Relaciones Internacionales, el Ministerio de Desarrollo, el Banco de Comercio Exterior y el Consejo Superior de Comercio Exterior, instituciones que tienen funciones de promoción, control y financiación, entre otras, del comercio exterior.

El gobierno Colombiano ha facilitado la reciente tendencia sobre el uso del acero gracias a su política de comercio exterior y a su necesidad de facilitar el resurgimiento de la construcción, al ser este el sector que más empleo puede brindar. La apertura económica, por el contrario, busca estimular el intercambio de productos entre los países, eliminando la mayor cantidad posible de barreras con las que las empresas se puedan encontrarse al momento de mercadear. La globalización de nuestra economía permitió la importación de productos aunque se fabricaran nacionalmente, como resultado hoy contamos con empresas que se fortalecieron a punto de poder exportar acero.

*“La consecuencia inmediata fue un gran aumento de las importaciones de acero y una baja muy acentuada de sus precios en el mercado. Así nuestras empresas se enfrentaron simultáneamente a una competencia externa que desconocían y a una gran disminución en los precios de venta de sus productos, que desde luego les causaron muchos problemas, que pudieron superar y hoy son compañías en su mayoría competitivas gracias a su conversión tecnológica. En la actualidad, se observa una disminución en la tendencia importadora y, como ya se dijo, un repunte de las exportaciones”<sup>6</sup>.*

La etapa de auge de las estructuras de acero, que como ya anotamos eran importadas al país, encontró en el estado un gran enemigo, que sin proponérselo frenaría el desarrollo de esta tecnología. Todo empezó cuando “en 1954 se crearon barreras aduaneras proteccionistas que frenaron abruptamente la utilización de estructuras metálicas con este fin pues la producción de perfiles estructurales por dicha acería era extremadamente limitada. Se inició así un círculo vicioso en que al eliminarse la obligatoriedad de los cursos de diseño de estructuras metálicas en los programas universitarios, dejándolos en el mejor de los casos como materias electivas, condujo paulatinamente a su desaparición

---

5 Asociación Nacional de Constructores, Revista Construye No. 65. Impresión Grupo OP Gráficas. Bogotá. 2001. Pág.5.

6 North American Steel Journal, Revista STEEL No. 33, Ad Litteram S.A. de C.V, México, Diciembre 2000, Pág. 27

y al resultado final de un desconocimiento generalizado de las bondades de dicho material entre los arquitectos y calculistas”<sup>7</sup>.

“Hace menos de un lustro se inició la apertura económica en Colombia con la cual se eliminaron las barreras arancelarias impuestas al acero. Este hecho, unido a la favorable evolución de los precios de dicho metal en los últimos años al compararla con la del cemento y agregados pétreos en nuestro país, hizo que las estructuras metálicas fueran nuevamente competitivas en el campo de edificios para oficinas o apartamentos”<sup>8</sup>.

### **2.3 La llegada del acero a Colombia.**

El descubrimiento del acero fue algo ocasional al igual que lo fue el del hierro que hemos usado por mas de 5000 años, desde que fue descubierto en el occidente de Asia y Egipto (aprox. 1000 a.c.). Ocasional por que se produjo gracias a las partículas de desecho o impurezas que caían de los moldes que daban forma al hierro y se mezclaban con el carbón que producía el fuego. El resultado es acero puro que ha permitido innumerables adelantos gracias a nuestra habilidad de transformar este material en un producto muy útil, desde las famosas espadas Japonesas en sus comienzos, hasta las mega-estructuras de acero que literalmente nos han hecho tocar el cielo.

En la colonia, al igual que otros elementos, materiales y hasta usanzas nos llegó el hierro y los distintos objetos que con él se fabricaban. “Nuestra época colonial tuvo una ínfima metalurgia, y solamente una tardía aparición de fundiciones (México, 1809). El trabajo se orientaba a fabricaciones especiales, como las puntas de pilotes que hincara Arévalo en Cartagena, como los cañones y rejas para balcones”<sup>9</sup>. Luego, en la época de la Independencia aparecen compañías metalúrgicas en la Nueva Granada (1824) y fueron los ferrocarriles con la infraestructura que necesitaban los que incrementaron la producción de este material.

La creación de una nueva era arquitectónica, se produjo gracias a la producción masiva del acero y su introducción como elemento resistente. Es bien cierto que el hierro siempre ha desempeñado un papel importante en la historia de la humanidad y en la evolución de la cultura artesana.

“En 1720 Abraham Derby logra (en Coalbrookdale), obtener el hierro por fundición con coque en lugar de carbón vegetal y con ello consigue el requisito para la obtención del hierro de primera fusión en grandes masas. En 1784, por el perfeccionamiento del horno de pudelar se hace posible emplear también el coque para convertir el hierro de primera fusión en hierro forjable y empieza este material a alcanzar la ventaja que le había ganado la fundición. Con la invención por Henry Bessemer en 1855, del convertidor de su

---

7 Uribe, Jairo: Recorrido Histórico por la construcción metálica en el mundo y su desarrollo en Colombia. ENACERO, Cartagena, 2001, Pág. 35.

8 Vide

9 Vargas Caicedo, Hernando: La construcción metálica en Colombia en época reciente: apuntes para una agenda de investigación. ENACERO, Cartagena, septiembre de 2001, Pág. 5.

nombre y la introducción del horno Siemens-Martín, en 1864, empieza la era del acero Siemens-Martín”<sup>10</sup>.

Según el Arquitecto Hernando Vargas, en su reciente intervención dentro del primer encuentro del acero en Colombia, realizado en septiembre de 2001 en la ciudad de Cartagena, y dentro de sus investigaciones realizadas acerca del inicio de las estructuras de acero en Colombia, señala la navegación a vapor como la industria que introdujo el acero y con el su técnica a nuestro país, lo cual resulta lógico pues la mayoría de estos barcos requerían cierto manejo del material para su fabricación y mantenimiento, lo que hicieron inevitable la profesionalización de nuestra mano de obra.

“Antes del ferrocarril, fue la navegación a vapor un motor de la modernización metalmeccánica. Se ha señalado que esta época preparó ingenieros, paileros, fundidores, dibujantes, caldereros y posibilitó la introducción del sistema inglés de medidas, de nuevas herramientas, de aserríos, a parte de avances en las formas de gestión y organización. Iniciada en 1825 con cascos de madera, y con barcos traídos de Nueva York, establece en 1834 los primeros talleres de fragua y forja en Barranquilla. En 1839 llega de Glasgow el primer barco con casco de hierro, parte de una serie fracasada por los obstáculos físicos del río Magdalena hasta que, en 1877 Cisneros introduce el primer barco con casco de acero traído de Inglaterra. El mismo Cisneros facilita la prospección para la navegación del río Cauca para el cual Carl Simmons trae a lomo de mula el primer barco desde Buenaventura. Las esclusas de “Totten” en 1848 en el canal del Dique, presumiblemente metálicas, anteceden a la obra heroica del canal de Panamá designado como la más importante obra de ingeniería del siglo XIX, y en la que no intervino sino un ingeniero colombiano. No tendrá el país una edad de los canales, con tantos impactos sobre su desarrollo. Debilitada la fuerza motriz de vapor, que tuvo su auge entre 1860 y 1890, desaparece la navegación a vapor en 1962 con el incendio del último barco a vapor”<sup>11</sup>.

Sin embargo Vargas y otros investigadores como Saldariaga, convergen en la gran importancia que tuvo el ferrocarril, ya que reconocen la excelencia de los puentes metálicos para la red de ferrocarriles, conectada finalmente en 1961, puesto que constituyeron una escuela fenomenal de ingeniería civil, mecánica y administrativa, en cuanto al profesionalismo a nivel local que se empezó a conseguir a raíz de la construcción de estos por extranjeros, y su posterior efecto diseminador dentro de las primeras edificaciones en Colombia.

De esta manera podemos concluir que desde la llegada del hierro a nuestro continente, fuera de los elementos artesanales como balcones y la técnica del hierro forjado, la práctica constructiva por medio de las estructuras de acero fue gracias a la apropiación de tecnología, la cual empezó a forjar una técnica propia de la región hasta ya entrado el siglo XX. Por lo tanto el patrón en su origen fue la importación de estas estructuras procedentes en su totalidad de otros países. Estas estructuras eran solicitadas por

---

10 F. Hart, W. Henn, H. Sontag. El Atlas de la construcción metálica. Editorial Gustavo Gill, S. A. Barcelona, 1976. Pág. 9

11 Vargas Caicedo, Hernando: La construcción metálica en Colombia en época reciente: apuntes para una agenda de investigación. ENACERO, Cartagena, septiembre de 2001, Pág. 8.

catálogo, lo cual hace entender que eran prototipos de estructuras, recibidas de Estados Unidos, y otros países Europeos.

“Aunque predominaban los ingleses a partir de catálogos, también se dieron casos de suministros Franceses y Belgas y, muy raramente Alemanes..... La escasísima producción de tesis sobre armaduras metálicas entre 1910 y 1940 en la escuela de Minas de Medellín ejemplifica no solamente la dependencia de prototipos importados en los que los nacionales intervenían marginalmente sino la insensibilidad escolástica a las determinantes seculares del cambio técnico”<sup>12</sup>.

### **2.3.1 El inicio de las estructuras metálicas y su llegada a Colombia**

Sus orígenes en Colombia tuvieron el mismo hilo conductor al de todo el contexto Latinoamericano, y su uso estuvo en sus orígenes a la par con otros países, no obstante su masificación alcanzó diversos resultados de acuerdo a los escenarios locales. Todos estos procesos convergen en una norma común, que consistía en la importación de estructuras de acero de países como Estados Unidos, Inglaterra, y Francia.

En la colonia el empleo del hierro ocupó un papel secundario, se empleó en ornamentación y, en algunos casos como refuerzo estructural, siendo esta su primera aplicación como material de construcción. “Posiblemente el refuerzo en hierro forjado del templo de San José en Popayán, por el jesuita Schender, alrededor de 1740, para enfrentar la sismicidad local, sea el primer caso de uso de este metal en la construcción en nuestro País”<sup>13</sup>.

Con la revolución industrial tuvieron lugar las primeras aplicaciones del hierro en estructuras, ya que esta impuso a los materiales requerimientos de resistencia sin precedente en la construcción, lo que condujo a su vez al desarrollo de procesos siderúrgicos que permitieron producirlo económicamente.

“El desarrollo de los edificios metálicos tuvo su origen en la afición de los ingleses por los invernaderos. La primera bóveda metálica con este fin se construyó en 1817 para cubrir 30 mts de luz y 18 mts de altura. A ésta siguió en 1822 un invernadero en Paris, diseñado por Rohault para el *Jardín des Plantes*. De la misma época vale la pena destacar la casa de las palmas, de los Jardines Kew en Londres (1848), obra conjunta del arquitecto Burton y el ingeniero Turner”<sup>14</sup>.

---

12 Vide.

13 Ídem, Vargas 2001, Pág. 7

14 Uribe, Jairo: Recorrido Histórico por la construcción metálica en el mundo y su desarrollo en Colombia. ENACERO, Cartagena, 2001.

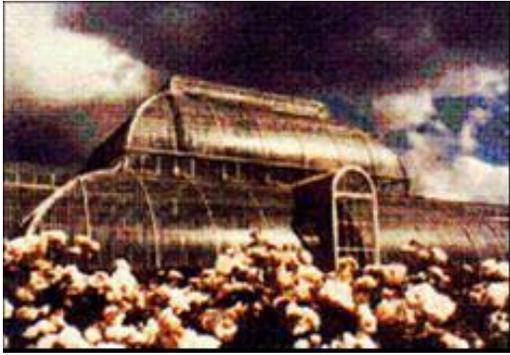


Fig. # 3. Casa de las Palmeras en los Kew Garden.  
R. Turner y D. Burton, 1845-47  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Uribe. Enacero.2001



Fig. # 4. Palacio de Cristal.  
Joseph Paxton, 1851.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Uribe. Enacero.2001

La eficacia y expansión del acero requirió el desarrollo de una tecnología que pudiera científicamente pronosticar el comportamiento del acero en el medio ambiente y cuando es sometido a cargas. Como respuesta a esta necesidad, dos físicos matemáticos en los siglos XVII Robert Hooke y Leonhard Euler ya en el siglo XIX, desarrollaron relaciones básicas que fueron usadas para crear grandiosas estructuras en acero como la famosa torre Eiffel en Paris. Sir Joseph Paxton construyó en 1837 el gran invernadero de Chatsworth posteriormente en 1851 el Palacio de Cristal, para la Gran Exposición de dicho año. Obra esencial que señala el comienzo de la construcción industrializada. Gustave Eiffel construyó años más tarde la estructura de la Galería de las Máquinas, para la exposición de Paris de 1867. Su obra más conocida la famosa torre de 300 mts de altura, levantada como símbolo de la innovación tecnológica de Francia para la exposición universal de París de 1889 es un monumento a su persistencia para no dejarse amilanar por la crítica y a su dominio de una cuidadosa planificación de las técnicas constructivas.

Se generaron, al mismo tiempo de su expansión, especificaciones para definir como diseñar, fabricar, y construir estructuras hechas con este material. El acero se mostró como un material de construcción de primer orden, debido a sus propiedades resistentes se impuso a tal punto, que reemplazó a la madera en numerosas aplicaciones. Una de las principales ventajas fue la de permitir la construcción de entramados, cuyas reducidas secciones ocupaban mucho menos espacio que los materiales empleados hasta entonces, dando al conjunto de la estructura un aspecto de gran ligereza.

El primer ejemplo de edificio con estructura de acero fue construido en 1872 por el arquitecto Jules Saulnier quien construyó una estructura vertical que albergaría las instalaciones para una Chocolatería en Noisel (Francia). Este gran salto, desde los monumentos y palacios de exposición a las edificaciones se dio gracias a la invención de un sistema de transporte vertical que revolucionaría este tipo de construcción. El invento del ascensor de seguridad por Otis en 1856, permitió el crecimiento en altura de las edificaciones hasta llegar a los modernos rascacielos.

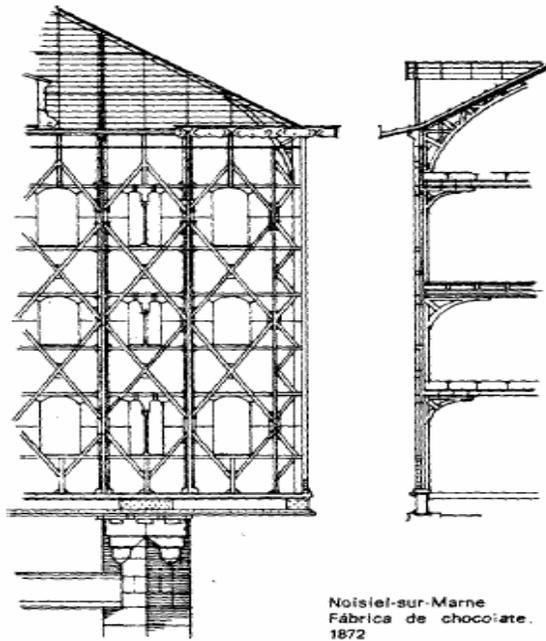


Fig. # 5. Fabrica de Chocolates, Noisel.  
Jules Saulnier. 1872.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Atlas de la construcción metálica. Pág.11



Fig. # 6. Torre Eiffel.  
Gustave Eiffel 1889.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
[www.structurae.de](http://www.structurae.de)

Los progresos de la siderurgia permitieron también poner a disposición de los constructores aceros estructurales que respondían perfectamente a las nuevas necesidades, algunas cualidades que el hierro no proporcionaba; se crearon materiales de propiedades mecánicas bien definidas, por otra parte con ayuda de nuevos medios de investigación, se establecieron los requerimientos y manuales de diseño, para calcular con mucha más precisión los esfuerzos que solicitan las piezas de una construcción.

Otros progresos se consiguieron para no solo producir aceros de propiedades mecánicas determinadas, sino que fue preciso mejorar sus propiedades químicas otorgando a las piezas otras propiedades como una mayor resistencia y bajo peso, resistencia a agentes atmosféricos como la corrosión y humedad.

El apogeo y posterior consolidación de las edificaciones con este tipo de estructura comenzó en Chicago a raíz del incendio de 1871 que agobio esta ciudad, impulsado además en 1907, por el desarrollo de los perfiles laminados de acero los cuales presentaban propiedades estándar, semejantes a los que actualmente encontramos. “En esta ciudad son célebres, entre otros, el de la compañía *Home Insurance*, construido en 1885 por William Le Baron Jenney, considerado el primer *rascacielos*, por sus 10 pisos y 55 m de altura y los edificios John Hanckok, y Sears, obra maestra de Fazlur Khan, con su sistema de tubos dentro de tubos que le permite elevarse 443 mts. en 109 pisos”<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> Uribe, Jairo: Recorrido Histórico por la construcción metálica en el mundo y su desarrollo en Colombia. ENACERO, Cartagena, 2001.



Fig. # 7. Home Insurance Bldg. William Le Baron Jenney. 1885  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Uribe. Enacero.2001



Fig. # 8. Edificio Jonh Hancock. Fazlur Khan.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Uribe. Enacero.2001

Ya desde mediados del siglo XIX en América Latina se empezó a importar estructuras de acero, actividad que sería la constante en muchos países, inclusive en Colombia. La importación de estructuras fue el hilo conductor de toda América Latina, hasta ya entrado el siglo XX. Parece que se disfrutaba por esta época de cierta bonanza económica por la exportación de productos agrícolas pero con escasos recursos profesionales y de mano de obra, como resultado importar estructuras metálicas de fácil montaje fue un recurso reincidentemente utilizado.

“Con acceso marítimo, algunos sitios reciben tempranamente edificios de hierro, como la bodega galvanizada con muros ventilados de Paita (1854) enviada desde Manchester, el edificio de gas en Buenos Aires (1855)”..., en Brasil “los prototipos importados en su País de 1875 a 1930 abarcan estaciones completas de ferrocarril, con baños públicos prefabricados (1865)... En Perú se levantaron, enviadas por Eiffel, como las grandes compuertas remachadas del canal de Panamá, las iglesias de Tacna y Arica”<sup>16</sup>.

El caso de México es igualmente importante. Una obra de gran importancia, que hoy mantiene sus puertas abiertas al público, marcando un hito para la posteridad lo constituye la Iglesia de Santa Bárbara, en la ciudad de Santa Rosalía, Baja California Sur. Convirtiéndose en una de las atracciones turísticas principales de esta localidad mexicana. Consiste en una estructura totalmente construida con acero galvanizado que fue diseñada por Gustave Eiffel, en 1884. Inicialmente construida para la exposición Mundial de París de 1889, luego se transportó aquí sección por sección, según la usanza de la época, y se volvió a montar en 1897. Su gris oscuro exterior contradice la belleza de sus vitrales que ofrecen un espacio interior contrastante.

<sup>16</sup> Ídem, Vargas 2001. Pág. 6



Fig. # 9. Iglesia de Santa Bárbara. Gustave Eiffel, 1884. Imagen tomada con fines académicos de: [www. Guide to Baja California / Portal San Miguel.com](http://www.Guide to Baja California / Portal San Miguel.com)



Fig. # 10. Iglesia de Santa Bárbara. Imagen exterior.

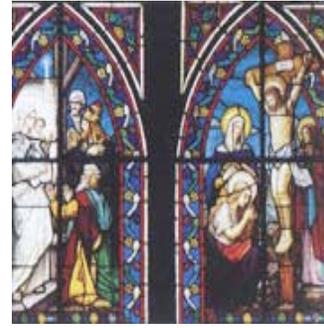


Fig. # 11. Vitrales, Iglesia de Santa Bárbara.

Entre otros también se destaca el originalmente Museo de Historia Natural, restaurado y que hoy es el edificio que alberga bajo la protección de la Universidad Nacional Autónoma de México el actual museo Universitario del Chopo. Construido con hierro, tabique prensado y cristal, y de estilo "Art Nouveau", llegó a México procedente de Alemania para ser armado entre 1903 y 1905; sus torres inconfundibles son hoy el emblema de este recinto que también cuenta con inmensos vitrales que dotan de luz natural a sus tres naves. En 1973, la UNAM promueve su rescate después de nueve años de abandono, lo restaura para convertirlo en un centro de difusión del arte y la cultura universitaria, nace así, en 1975 el actual museo. “El mercado de la ciudad de Guanajuato; la aduana de Tampico ó el edificio de Orizaba muestran ejemplos mexicanos.”<sup>17</sup>.

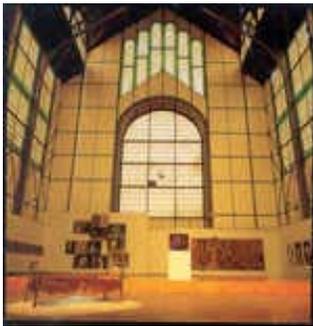


Fig. # 12. Interior Museo Universitario del Chopo. Imagen tomada con fines académicos de: <http://www.chopo.unam.mx/>



Fig. # 13. Entrada Principal, Museo Universitario del Chopo.



Fig. # 14. Torres, Museo Universitario del Chopo.

Lamentablemente no tuvimos los mismos ejemplos que otros países de la región que gozaron las exuberantes estructuras metálicas, como pabellones, estaciones, y mercados, los cuales eran prototipos de los más importantes de Europa por aquel tiempo, como si se dio en los países del caribe y del cono sur, que después de ser encargados eran

<sup>17</sup> Ídem, Vargas 2001. Pág. 8

importados y ensamblados nuevamente. Ejemplos de esto los encontramos en la investigación realizada por la arquitecta Silvia Arango, demostrando que en América Latina “la mayor parte de los ejemplos provienen de Venezuela, Brasil o Argentina, países donde, al parecer, se empieza una experimentación formal con un ánimo tecnológicamente creativo. En Brasil, subsisten dos ejemplos magníficos: el Mercado de Carnes en Belem y el Teatro José de Alencar en Fortaleza..... De hierro se construyeron la mayor parte de las estaciones, los puentes y otras estructuras relacionadas con los ferrocarriles (la estación de Montevideo y la estación Alameda en Santiago están entre las más hermosas). Capítulo especial merecerían los pabellones de exposición, que son, por lo general, construcciones más ambiciosas arquitectónicamente: el pabellón de Italia, diseñado por Mario Palanti para la Exposición Internacional de Ferrocarriles y Transportes, realizada en Buenos Aires en 1910 y el Pabellón Chileno para la Exposición Internacional en París de 1889 (desmontado y rearmado luego en Chile) son dos verdaderas obras maestras.

*El ejemplo más imaginativo a partir de una estructura metálica que conozco en América Latina.... la cafetería del Club Táchira, diseñada por Fruto Vivas en 1956, en Caracas..... En este proyecto fue determinante el lugar: sobre un terreno inclinado se buscó hacer un espacio abierto, socializador, donde se pudiera disfrutar plenamente de un paisaje privilegiado sobre la ciudad... Y la decisión no pudo ser más grácil y adecuada: un conoide de estructura metálica forrada en madera sobre un arco de 33 m de luz apoyado sólo en dos puntos, cubre una serie de plataformas en cemento y piedra cuya disposición a distintos niveles les permite establecer conexiones con los demás edificios del Club. La volátil forma de la estructura la convierte en un "evento cubierto" integrado a su contexto arquitectónico y natural y esto, lo sabemos ya, es muy difícil de lograr..... El caso de Fruto Vivas ilustra que es posible combinar el talento innovador del diseñador con el ingenio constructivo para ponerlo al servicio de las necesidades apremiantes de gran parte de la población en este continente”<sup>18</sup>.*

Vargas después de su interesante apunte sobre la llegada del acero con la navegación a vapor en Colombia, agrega la importancia del ferrocarril, y su infraestructura, especialmente los puentes construidos con estructuras metálicas. “Algunos de los puentes son especialmente atractivos, como el de arco inferior en Golondrinas, el de arco superior en La Grita, el de arco inferior triangular sobre el Coello, el gran puente de Girardot traído de Inglaterra, el giratorio sobre el Cauca, aparte de viaductos únicos como el de Teatinos en mampostería. El primer riel se había producido en La Pradera (Siderúrgica), en 1884, llevado a Bogotá en procesión como un obelisco egipcio, con pobre resultado de resistencia, y que llevó, a pesar de las influencias políticas y económicas, a estas empresas a su gradual parálisis. Sin embargo, se vivía la era del optimismo. En 1872 en la exposición industrial de Bogotá, las producciones de La Pradera se exhibieron con orgullo patrio”<sup>19</sup>.

Y Saldariaga apunta que “El inicio de las estructuras metálicas en Colombia se remonta a finales del siglo XIX con la construcción del puente sobre el río Cauca, en 1887; el

---

18 Arango, Silvia. El metal en la arquitectura latinoamericana. Revista Proa # 400, Bogotá, febrero de 1991, Pág. 49.

19 Ídem, Vargas 2001. Pág. 8.

edificio de la aduana de Cúcuta, en 1870's, la estructura del teatro Colón de Bogotá, en 1892, y el puente Navarro de Honda, en 1895<sup>20</sup>.

La naciente república Colombiana se encontraba entonces construyendo la infraestructura de vías para el ferrocarril, es entonces cuando el proceso de importación de estructuras empezó en el país. “Combinando recursos y limitaciones, las obras como los puentes, expresan los compromisos de la época... puentes rígidos de hierro con armadura Pratt norteamericana, con entablado, como el de Rionegro en 1871, el puente de Occidente sobre el río Cauca, obra de José María Villa inaugurado en 1887<sup>21</sup>”.

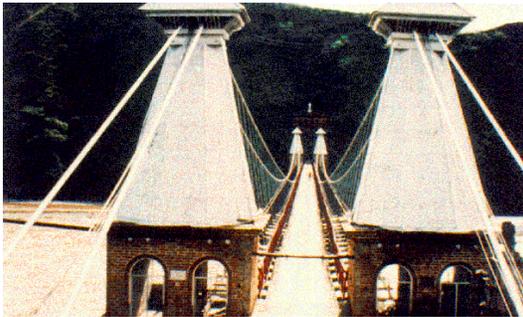


Fig. # 15. Puente de Occidente. José María Villa inaugurado en 1887.  
Imagen tomada con fines académicos de: Uribe. Enacero. 2001

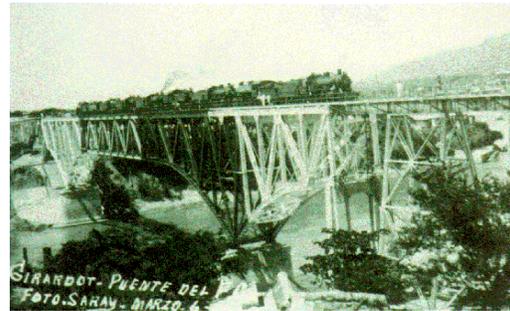


Fig. # 16. Puente ferroviario de Girardot  
Imagen tomada con fines académicos de: Uribe. Enacero. 2001

Fue por estos años que en Colombia empezamos paulatinamente a conocer nuevos materiales y a cambiar las técnicas de construcción, dejamos atrás la Colonia para empezar a recibir nuevas tecnologías. “En medio de guerras civiles y de discusiones ideológicas exacerbadas, la arquitectura urbana apenas comenzaba a desprenderse de su tradición colonial y a descubrir materiales como el ladrillo, el concreto y el metal. A pequeña escala y casi siempre escondido de la vista del ciudadano, este material ya se había empleado en la estructura del teatro Colón de Bogotá, del arquitecto italiano Pietro Cantini, preinaugurado en 1892<sup>22</sup>”.

Retornando al objeto de nuestra investigación, la primera edificación construida totalmente con estructura metálica, que para objeto de esta investigación es el punto de partida, ya que marco el inicio de la utilización de este material en edificaciones, lo constituye una estructura importada a finales del siglo XIX, alrededor de los años 1870's, que se convirtió en el primer edificio en contar totalmente con una estructura de estas características y sirvió de marco para el empleo de esta tecnología en Colombia.

20 Saldariaga Roa, Alberto: *El metal, una presencia oculta en la Arquitectura Colombiana*. Revista Proa # 400, Bogotá, febrero de 1991, Pág. 50.

21 Vargas Caicedo, Hernando: *Cambio técnico en la edificación Colombiana en el siglo XX*. Sociedad Colombiana de Arquitectos: Cien años de Arquitectura en Colombia. Bogotá, 2000. Pág. 362.

22 Saldariaga Roa, Alberto: *El metal, una presencia oculta en la Arquitectura Colombiana*. Revista Proa # 400, Bogotá, febrero de 1991, Pág. 50.

“El precursor foráneo de la arquitectura metálica en Colombia. Se trata del edificio que alojó durante años la aduana de la capital del departamento de Norte de Santander, Cúcuta, y que hoy yace en esa condición dolorosa del patrimonio histórico que espera una intención renovadora o destructora para definir su destino..... Exótico en sus formas, construido totalmente en metal, ese edificio fue en su momento una muestra de algo que en Europa ya se había extendido notoriamente, una edificación industrializada, desarmable y transportable, descendiente directa del "Palacio de Cristal" que Joseph Paxton había erigido en Londres a mediados del siglo con un despliegue de técnica y racionalidad antes no vistos”<sup>23</sup>.



Fig. # 17. Edificio Aduana de Cúcuta.

Importador: Felipe Zapata.  
Fecha: finales 1870's  
Apuntes: Primera edificación con estructura metálica en Colombia.

Existe una leyenda que reza que dicha estructura llegó por equivocación a nuestro país, ya que se dice que había sido despachada para la ciudad de Calcuta, en la India, y que por un error, ocasionado tal vez por la similitud del nombre de la ciudad de destino, llegó a la ciudad de Cúcuta, en Colombia. Esta creencia quedó anulada una vez que en nuestra investigación, hallamos que el arquitecto Hernando Vargas dentro de su fabulosa investigación y aportes para la construcción en acero, encontró que por el contrario, esta edificación fue solicitada expresamente según la práctica de ese tiempo.

“En contra de la fábula, hemos verificado que la construcción para la Aduana de Cúcuta, instalada a finales de los 70's, época del auge de café y del ferrocarril, su edificio no era destinado a Calcuta sino encargado juiciosamente en Inglaterra, sobre catálogo, incluidas herrerías exteriores y mecanismos de ventilación y tejados por Felipe Zapata, prohombre del período de los Estados Unidos de Colombia”<sup>24</sup>.

A comienzos del siglo XX, fueron agentes de expansión metálica las compañías extranjeras que operaron en el país comisionadas para construir la infraestructura del país, y que aprovecharon para construir algunas obras como plazas de mercado, estaciones ferroviarias y edificios públicos.

“La Plaza de Mercado de Tunja, obra de la compañía “Ullen” de amplia trayectoria en Colombia, ostentó una gran cúpula metálica central, hoy desmantelada, como parte del

<sup>23</sup> Ídem, Saldariaga, 1991.

<sup>24</sup> Vargas, ENACERO 2001.

olvido en que permanece esta notable construcción. En el teatro Heredia de Cartagena, (Felipe Jaspe, 1911) también desmantelado, se empleó una esbelta estructura que, afortunadamente, permaneció a la vista hasta el momento de ser desmontada”<sup>25</sup>.

Se podría afirmar que en Colombia dichas estructuras tuvieron un origen cronológico aceptable al compararlo con el resto del mundo, inclusive las grandes empresas americanas como *Skidmore, Owings and Merrill*, la misma firma que diseñó la torre Sears de Chicago; construía alrededor de 1952 el edificio del banco Bogota, que hasta hoy día es rotulado por el reconocimiento de ser la edificación mas alta con 18 pisos en estructura de acero. Aunque dicha tecnología era totalmente importada al País, estábamos recibiendo todo el estilo internacional de esos años.

Esta evolución se vio truncada y un periodo también de parálisis en el uso de las estructuras metálicas frustra su auge, debido a reglamentaciones para el comercio exterior de productos, entre ellos el acero, para proteger la industria del país. Satisfactoriamente hoy esto ha cambiado, gracias a nuevas políticas de comercio exterior, de ahí que actualmente se este abogando por el resurgimiento de estas estructuras.

### **2.3.2 Reseña histórica de las estructuras de acero en edificaciones Colombianas.**

Desde inicios del siglo XIX, el hierro participo en la arquitectura metálica con múltiples usos, además del papel de elemento estructural como en el edificio de la Aduana de Cúcuta; se empezó a utilizar en cúpulas metálicas igualmente importadas como la del Capitolio Nacional, tejados metálicos en las cubiertas era la novedad y empezaron a aparecer; debido a los grandes claros a vencer en los teatros y por moda también, celosías de acero fueron utilizadas en las cubiertas de teatros y de cinematógrafos que causaron furor por su novedad en el País.

El primer edificio con estructura metálica en Colombia fue el Banco López, en Bogota. Construido por Pedro A. López y Cía.; “posiblemente por su vínculo con casas extranjeras, Pedro A. López y Cía., encargado del ferrocarril del Espinal al Guamo en 1919, emprende la construcción del primer edificio de varios pisos metálicos en Bogotá.”<sup>26</sup>. Con una altura de 5 pisos, marca nuevamente el inicio de una serie de edificaciones con estructura metálica una vez que como procer, este ejemplo cambio la mentalidad hacia este técnica constructiva. Gracias a que se habia sentado precedente Alberto Manrique organiza el montaje del edificio Cubillos en 1926, rascacielos para la época en acero. De la misma época son dos edificios gemelos, uno de ellos demolido para construir la plazoleta del Rosario.

---

25 Ídem, Saldariaga, 1991

26 Ídem, Vargas 2001.



Fig. # 18. Edificio Banco López. 1924.  
 Constructor: Pedro A. López y Cía.  
 Descripción: Edificio del Banco López, hoy Bancafé.  
 Reproducción fotográfica con fines académicos tomada de: ENACERO. Cartagena



Fig. # 19. Edificios Gemelos. 1935-45  
 Descripción: Actual Edificio cafetería La Romana.  
 Reproducción fotográfica con fines académicos tomada de: ENACERO. Cartagena

Posiblemente debido a la decadencia económica de los años 20's y 30's, no hay registro de nuevos edificios metálicos de varios pisos. "A finales de los 30's surge la primera reglamentación que exige cálculos estructurales para obtención de licencias de construcción, y a principios de los 40's se establece el laboratorio de materiales de la Universidad Nacional"<sup>27</sup>. Este es el periodo de auge con las importaciones de estructuras de acero a Colombia. "Las paginas de anuncios avisan sobre los modelos norteamericanos de esqueletos en acero, las fabricas de perfiles de ese país y las nuevas empresas Colombianas del ramo"<sup>28</sup>.



Fig. # 20. Edificio Caja Colombiana de Ahorros. 1948  
 Reproducción fotográfica con fines académicos tomada de ENACERO. Cartagena 2001.



Fig. # 21. Edificio Banco de Colombia. 1952  
 Reproducción fotográfica con fines académicos tomada de ENACERO. Cartagena 2001.

<sup>27</sup> Vide.

<sup>28</sup> Ídem Vargas Enacero 2001.

Dos grandes edificios norteamericanos se montan por esos días: el de la Caja Colombiana de Ahorros, por “Cusego” y “American Bridge”, en 1948 y el del Banco de Colombia en 1952. Las primeras fábricas importantes de estructuras se establecen en Bogotá, Medellín y Cali. En la revista Proa (ref. 10) se registran algunos de los proyectos producidos localmente, como el edificio de apartamentos Pombo de 1951 o el edificio para apartamentos por Martínez Cárdenas de 1952.

Hacia finales de la década de los 50's, y con proyectos arquitectónicos y estructurales norteamericanos se montan los edificios para el banco de Bogotá (SOM-Lanzetta), aún nuestro más alto rascacielos de acero con 18 pisos, y para la Esso (Martínez Cárdenas). “Con anterioridad al renacimiento del último lustro, los edificios más recientes construidos en Bogotá para oficinas o apartamentos fueron el del Banco de Bogotá, de 18 pisos y 70 m de altura, el más alto del país en ese entonces, diseñado por *Skidmore, Owings and Merrill*, la misma firma que diseñó la Torre Sears de Chicago; el edificio de la Esso Colombiana y el de Residencias Colón”<sup>29</sup>.



Fig. # 22. Edificio Banco de Bogotá.1959  
 Constructor: Skidmore Owings and Merrill  
 Descripción: Edificio más alto con estructura metálica  
 Reproducción fotográfica con fines académicos tomada de: Villegas Editores.



Fig. # 23. Edificio ESSO de Colombia.  
 Constructor: Martínez Cárdenas  
 Reproducción fotográfica con fines académicos tomada de: Memorias del Primer encuentro del acero en Colombia. ENACERO. Cartagena 2001.

“Con el edificio del Banco de Bogotá, diseñado por Skidmore Owings and Merrill y construido a mediados de la década de los años 50”s, se alcanzo lo que para entonces era la culminación de la imagen del progreso tecnológico: “Un rascacielos” de 18 pisos de altura, construido en acero y recubierto en metal y vidrio, en el más puro “estilo

<sup>29</sup> Uribe, Jairo: Recorrido Histórico por la construcción metálica en el mundo y su desarrollo en Colombia. ENACERO, Cartagena, 2001, Pág. 33.

internacional” de la época. Con este ejemplo puede decirse, la arquitectura metálica en Colombia alcanzó su segundo gran exponente, después de la consabida aduana de Cúcuta<sup>30</sup>.

De nuevo este edificio marca entonces precedente dentro del desarrollo de las estructuras de acero en Colombia, a continuación anexamos algunos apartes del libro Banco de Bogotá, 114 años en la historia de Colombia, publicado por Villegas Editores, en donde se evidencian los cambios tecnológicos a los que ellos se veían influenciados y a la vez atraídos; y por los que finalmente optaron en cabeza del presidente de la entidad en aquel tiempo.

*“Por los años 53 y 54, el Dr. del Corral comunicó a algunos de sus inmediatos colaboradores en el banco la clara intención de trasladar la sede a otro lugar, en busca de mayor espacio y mejores comodidades para empleados y clientes. Los cuatro pisos ocupados por el banco en la calle 13 con carrera 8a. ya eran estrechos para el personal y nada favorables para el aprovechamiento de los avances tecnológicos dentro de sus instalaciones. Una renovación de los servicios eléctricos y de intercomunicación resultaba antieconómica; la instalación de un equipo actualizado y similar a los ofrecidos por las casas alemanas y norteamericanas, con la garantía de una máxima eficiencia, también requería un espacio más amplio y una estructura arquitectónica diferente. Sobre todas esas razones sustentó el gerente su decisión de traslado. Es posible que el sitio escogido, la carrera 10a. entre calles 14 y 15, hubiera sido explorado con bastante anticipación. Divulgado el proyecto, algunas opiniones eran contrarias al mismo, por razones culturales, por afectos santafereños o simplemente por la fuerza del hábito y de la costumbre. Un traslado del sitio que se conocía como el centro bancario de la ciudad parecía inconveniente. Contra dichas opiniones prevaleció el concepto progresista y avanzado, al que no le faltaron, tampoco, decididos partidarios. El proyecto siguió su marcha hacia la realización.*

*En estos tiempos que vivimos, aquellas razones que movieron al promotor de la idea contarían también con toda la fuerza de convicción que tuvieron. Las ciudades cambian de fisonomía con los años, como cambian los hombres con la edad. Cambian los hábitos y las costumbres; los conglomerados se desplazan y los sitios que en un tiempo tuvieron el encanto de lo señorial y lo apacible, se transforman y pierden tales atractivos. La necesidad del cambio, como la que impuso el traslado de la vieja sede, se impone igualmente de tiempo en tiempo.*

*El gerente del Corral expresaba estos conceptos:*

*Los modernos edificios bancarios se juzgan diseñados para el boato y la ostentación por la abundancia del dinero ocioso. En realidad ninguna arquitectura es tan técnica y tan exigente como la arquitectura bancaria que necesariamente debe someter la presentación estética a los requerimientos mecánicos y de comunicaciones de sus múltiples servicios. Y debe conciliar sus restricciones legales y económicas, en cuanto a*

---

30 Ídem Saldariaga, 1991.

*inversiones en activos fijos se relaciona, con su dinamismo y crecimiento permanentes, así como la estabilidad de sus instalaciones, colocadas siempre en los puntos neurálgicos de los centros comerciales, cercados y sin posibilidad de futuras expansiones, con las posibilidades del momento en que se construyen”<sup>31</sup>.*

Con la apertura económica en 1991, los precios del acero se hicieron más favorables comparados con el concreto, lo que propicio de nuevo la construcción de edificios para oficinas, hoteles y apartamentos. El primero de ellos en esta nueva época, el edificio Lugano terminado en 1993, se trata de una edificación importada desde Ecuador destinada a vivienda con un área de 4300 m<sup>2</sup>, 9 pisos y 2 sótanos. Desde ahí se han construido aproximadamente 25 edificaciones con este tipo de estructura, entre ellas el centro comercial Iserra 100, y el hotel Andes Plaza, Nuevamente un magnifico ejemplo de la aplicación de las estructuras metálicas en edificaciones habitacionales, con 12 pisos de altura, diseñado y construido por el Arquitecto e Ingeniero Hernando Vargas Caicedo, anteriormente citado por ser uno de los agentes mas activos de esta tecnología en Colombia.



Fig. # 24. Hotel Andes Plaza  
Constructor: Hernando Vargas Caicedo  
Reproducción fotográfica con fines académicos tomada de: [www.andesplaza.com.co](http://www.andesplaza.com.co)



Fig. # 25. Edificio de oficinas con estructura metálicas en Bogotá.  
Reproducción fotográfica con fines académicos tomada de: Revista Construye 65.

Actualmente la tendencia del uso de estructuras de acero en edificaciones habitacionales se ha mantenido, lo que hace prever que sí son económicamente atractivas, y que ha permitido emprender proyectos de gran envergadura, no solo en las grandes capitales como Bogotá, Cali o Medellín, sino en ciudades intermedias, como el que actualmente se esta concluyendo en el municipio de “la Mesa”, que consta de 18 edificios de 4 pisos de

<sup>31</sup> Mejía Salazar, Jorge. El Banco de Bogotá; 114 en La Historia de Colombia. Villegas Editores. Bogotá. 1985

altura, de las cuales hay terminados y habitados 16, y en proceso de terminación los dos restantes, construidos con tubos estructurales y materiales tradicionales. El proyecto continua luego con 50 casas más también en estructura de acero, con el sistema que desarrollo la empresa “corpacero”, llamado Corpacasa.



Fig. # 26. Proyecto Habitacional en la Mesa, Cundinamarca, Colombia. 2002  
Constructor: Tubos Colmena.  
Descripción: Estructura Liviana con Perfiles Estructurales.  
Reproducción fotográfica con fines académicos tomada de: Andrés García



Fig. # 27. Proyecto Habitacional en la Mesa, Cundinamarca, Colombia. 2002.  
Acabados tradicionales.  
Reproducción fotográfica con fines académicos tomada de: Andrés García

Es importante también recalcar que se ha alcanzado un gran desarrollo tecnológico, por ejemplo la anterior empresa citada, ya ha exportado a Republica Dominicana y a Venezuela, estructuras para edificaciones en su totalidad, revirtiendo la norma con que empezó esta tecnología en Colombia donde teníamos que importarlas en su totalidad.

“Cabe señalar que las firmas colombianas dedicadas a la construcción metálica han logrado exportar ingeniería a otros países de la región con base en la calidad de sus productos que, en este campo al menos, puede equipararse con la de otros de reconocida trayectoria técnica”<sup>32</sup>.

Se inicio entonces un proceso de reconversión y modernización, estimulando grandes esfuerzos económicos para la actualización tecnológica de todas las empresas involucradas en la manufacturación, comercialización, y fabricación, hasta el punto en que hoy son competitivas, han podido enfrentar exitosamente la competencia extranjera tanto en el país como en el exterior, pues ya se consolidan las exportaciones de acero desde Colombia. Gracias a esto la industria de la construcción, ha visto abastecidas sus necesidades, pues la capacidad de producción instalada es suficiente, pero de todas formas en los últimos años se han importado algunos insumos.

Colombia ha sido tradicionalmente un país importador de acero, por lo que a raíz de la apertura y la globalización de nuestra economía se permitió la importación de productos,

---

32 Uribe, Jairo: Recorrido Histórico por la construcción metálica en el mundo y su desarrollo en Colombia. ENACERO, Cartagena, 2001, Pág. 37.

aunque se fabricaran nacionalmente. La consecuencia inmediata fue un gran aumento de las importaciones de acero y una baja muy acentuada de sus precios en el mercado. En la actualidad, se observa una disminución en la tendencia importadora, un repunte de las exportaciones, y lo más importante para las estructuras metálicas, su remembranza que induce una nueva propagación en el país.

## 2.4 Costos de las estructuras de acero en Colombia.

Es difícil generalizar acerca de los costos en un presupuesto de obra, debido a que en cada una de ellos encontraremos especificaciones, requerimientos e imprevistos que los hacen disímiles y muchas veces desbordar. Sin embargo como ya hemos anotado, si podemos analizar y comparar las estructuras de concreto con las de acero, es interesante investigar qué tanto más y en qué casos son diferentes sus presupuestos, descubrir las relaciones costo beneficio y así definirnos por la adecuada a nuestras circunstancias. Finalmente el proceso se sintetiza en considerar y valorar las ventajas que pueden a veces compensar el mayor valor que llegue a tener una estructura.

En la revista proa 400, de la que ya hemos hecho referencia, aparece un artículo que buscó precisamente resolver ese interrogante, titulado ¿Es realmente costosa la estructura de acero?<sup>33</sup>; demuestran que si son una opción factible económicamente en el contexto Colombiano, ellos compararon las variables para edificios de 5 pisos con luces variables, obteniendo pruebas concretas al respecto, y de las cuales a continuación resumiremos.

Que las estructuras de acero no se usan en nuestro medio por ser más costosas que las de concreto, es un argumento simple que se usa en contra de las estructuras de acero para edificaciones urbanas. Su uso se ha visto limitado casi exclusivamente a las cubiertas livianas para bodegas, teatros, hangares y construcciones similares o a puentes ya sea de grandes luces o en sitios especialmente difíciles.

Esta es precisamente nuestra realidad en el caso de las edificaciones habitacionales; consiste en que no estamos acostumbrados ni siquiera a pensar en la solución metálica; nuestros arquitectos no tienen el ejercicio del manejo del material y siendo nuestros ingenieros mucho más expertos en el manejo del concreto, la solución que producimos es de concreto en el cien por ciento de los casos.

Comparar sistemas estructurales es difícil si se trata de sacar conclusiones generales; es corriente que para determinadas disposiciones arquitectónicas sea más conveniente una estructura de muros que una de vigas y columnas o viceversa, o que sean necesarias combinaciones de pantallas y pórticos o que convenga disponer vigas de gran rigidez en determinadas zonas, o en fin, que sea más conveniente una estructura metálica. Hay ciertamente proyectos a los cuales se pueden adaptar varias soluciones estructurales, para otros son válidas unas pocas de ellas y todo se origina con la propia concepción del proyecto arquitectónico.

---

33 Aycardi, Luis Guillermo. ¿Es realmente costosa la estructura de acero?. Revista Proa # 400, Bogotá, febrero de 1991, Pág. 56.

Nuestros arquitectos piensan en estructuras de concreto y este es el primer factor para que éstas primen; es difícil que se usen estructuras de acero y se aprovechen sus ventajas, si desde el proyecto arquitectónico no se ha contemplado esta alternativa, y mucho menos si se desconocen sus características y sus necesidades.

A pesar de todo esto, se han efectuado los cálculos estructurales y se ha hecho una comparación económica con precios de hoy en día (febrero de 1991) para pórticos de concreto reforzado y de acero, en igualdad de condiciones de luces, separaciones, ubicación y destinación.

Las cargas de cálculo han sido las correspondientes a vivienda y se han seleccionado en diversos casos con dimensiones de secciones y armaduras como corresponden típicamente con cada sistema estructural, buscando la solución cercana a la más económica; el siguiente es un gran resumen de los resultados obtenidos.

En cuanto a los precios de estructuras de concreto y acero en las condiciones nombradas para pórticos todos de 5 pisos y luces variables entre 4 y 12 metros, pueden hacerse los siguientes comentarios:

- a. En estos casos la estructura de acero es más costosa que la de concreto.
- b. Pero se están comparando estructuras con dimensiones muy distintas, ya que cuando las vigas de la estructura de acero son de 35 centímetros de altura las de la estructura de concreto son hasta de 60 centímetros o cuando las de acero son de 52 centímetros las de concreto son de 85 centímetros. Además, cuando las columnas de acero son de 12 y 15 centímetros de dimensión transversal las de concreto son de 30 y 35 centímetros y en casos de columnas de acero de 25 centímetros las de concreto son de 60 centímetros. En los casos comparados las columnas de concreto resultaron ocupando áreas 5 a 6 veces mayores que las de acero.
- c. Estas variaciones implican menor altura de la edificación con menores cantidades de acabados y más área útil de los interiores, mayor área vendible y menores obstáculos en la disposición arquitectónica. Comparaciones variando el número de pisos de los edificios

Dejando ahora constantes las luces de 5.50 metros se calcularon diversos edificios variando el número de pisos entre 2 y 12 y en los resultados se aprecia, que hay gran sensibilidad en los resultados y en consecuencia en las conclusiones que se obtengan en este caso para estructuras de altura inferior a 9 pisos son de mayor costo las estructuras de acero, llegando a ser hasta 2.0% más costosas y para edificios de más de 9 pisos son de mayor valor las de concreto, llegando a ser también hasta 20% más costosas que las de acero.

No puede ciertamente generalizarse esta conclusión diciendo que en todos los casos la altura de 9 pisos es un límite, pero sí es ésta una indicación de que en muchos casos los valores entre las dos estructuras no solamente son comparables sino que puede ser inferior el costo de la estructura metálica.

De nuevo comparando las dimensiones de las columnas resultantes en uno y otro caso, de las cuales se ha calculado el valor de la mayor área útil al usar columnas de acero, según el número de pisos y por cada mil metros cuadrados de construcción. En un edificio de 8 pisos por ejemplo, considerando precio de venta de \$300.000/M<sup>2</sup>, la mayor área vendible vale \$2.500.000, por cada mil metros cuadrados de construcción si el edificio tuviera pues 4.000 M<sup>2</sup> la mayor área vendible por el tamaño de las columnas vale \$10.000.000.

Los autores del anterior estudio terminan por concluir y enfatizar que no puede generalizarse diciendo, que la estructura metálica sea más costosa que la de concreto, hay muchos casos en los cuales la metálica es más económica y por otro lado hay economías en otros aspectos cuando el caso es el inverso. Adicionalmente la estructura es más liviana y los entrepisos que corrientemente se usan con ella también lo son, lo cual implica una construcción de menor peso con una cimentación más económica. Los plazos de ejecución de obra son mas predecibles ya que no influyen variantes como el clima, adicionalmente los tiempos de construcción son menores reduciendo así los costos de financiación que tan gran influencia tienen hoy en día en el valor total de la obra.

Encontramos también en este artículo que uno de los puntos en contra de la construcción metálica aseguraba que el valor de la protección frente al incendio es exagerado, coincidimos con ellos en cuanto a que ese argumento ha desaparecido ya con los numerosos avances logrados en este campo, nosotros nos propusimos adelantar nuestra investigación también en ese detalle, y encontramos grandes avances al respecto, especialmente una técnica que utiliza la circulación natural del agua consiguiendo grandes resultados a los que nos referiremos más tarde .

En suma si bien como se planteó inicialmente no puede haber conclusiones de generalidad absoluta, los cálculos que se han realizado y de los cuales se ha presentado un resumen, muestran que los costos son al menos comparables y que los arquitectos bien pueden explotar más el uso del metal en la construcción aprovechando sus numerosas ventajas inclusive estéticas, con la seguridad de que no necesariamente se está hablando de una construcción más costosa.

# ***TIPOLOGÍA DEL ACERO ESTRUCTURAL***

### 3.0 TIPOLOGÍA DEL ACERO ESTRUCTURAL

El empleo de acero en la construcción ha registrado una gran evolución en las últimas dos décadas, utilizándose cada vez más por las ventajas y beneficios que reporta su diseño sobre otros sistemas estructurales, y que gracias a sus propiedades y características ofrece beneficios que son difíciles de conseguir con otros materiales. Detallaremos aquí aspectos típicos de la construcción metálica, el costo de estas estructuras y su potencial ecológico; para brindar un panorama de las opciones que encontramos en Colombia.

La evolución y transformación que ha sufrido el acero lo ha llevado a formar parte importante de los materiales del constructor actual, y a avanzar en el desarrollo de técnicas constructivas, especialmente en su fabricación y montaje. El acero se encuentra entre los materiales de alto desempeño por haber alcanzado un gran desarrollo tecnológico, actualmente existen más de 200 tipos de acero disponible para un uso estructural. Entre muchos otros usos, ha masificado en el mundo su utilización para resolver el esqueleto portante de las edificaciones, remplazando gracias a sus ventajas a los materiales tradicionales en el campo estructural.

El acero es básicamente una aleación o combinación de hierro y carbono (alrededor de 0,05% hasta menos de un 2%). Ya que el acero es básicamente hierro altamente refinado (más de un 98%), su fabricación comienza con la reducción de hierro (producción de arrabio) el cual se convierte más tarde en acero. Algunas veces otros elementos de aleación específicos tales como el Cr (Cromo) o Ni (Níquel) se agregan con propósitos determinados.

Los diferentes tipos de acero se clasifican de acuerdo a los elementos de aleación que producen distintos efectos en el acero:

**Aceros al carbono:** Más del 90% de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen diversas cantidades de carbono y menos del 1,65% de manganeso, el 0,60% de silicio y el 0,60% de cobre. Entre los productos fabricados con aceros al carbono figuran máquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques, somieres y horquillas.

**Aceros aleados:** Estos aceros contienen una proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos, además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono normales. Estos aceros de aleación se pueden subclasificar en:

**Aceros de baja aleación ultra resistentes:** Son más económicos que los aceros aleados convencionales ya que contienen cantidades menores de los costosos elementos de

aleación. Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono. En la actualidad se construyen muchos edificios con estructuras de aceros de baja aleación. Las vigas pueden ser más delgadas sin disminuir su resistencia, logrando un mayor espacio interior en los edificios.

Aceros Inoxidables, que contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación, que los mantienen brillantes y resistentes a la oxidación.

Entre las numerosas variedades de acero, utilizables en construcción metálica, se pueden distinguir los aceros de utilización general, los aceros patinables de mejor resistencia a la corrosión, los aceros inoxidables y los aceros especiales para tornillos de alta resistencia

A continuación describiremos algunos de los aceros comúnmente usados en la construcción, aclarando que por cada tipo de estos aceros se definen varias calidades, que ofrecen garantías crecientes de la 1 a la 4 de acuerdo a las variaciones permitidas en la composición química del metal y a sus principales características mecánicas.

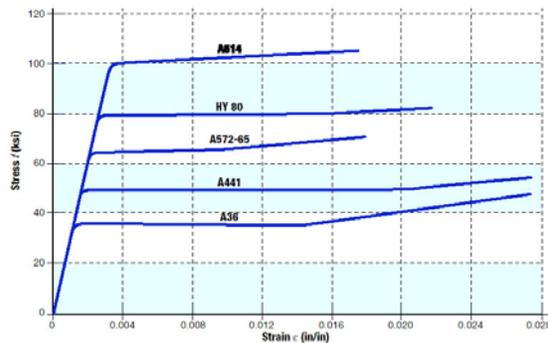


Fig. # 28. Curvas de resistencia del acero.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
[www.structurae.de](http://www.structurae.de)

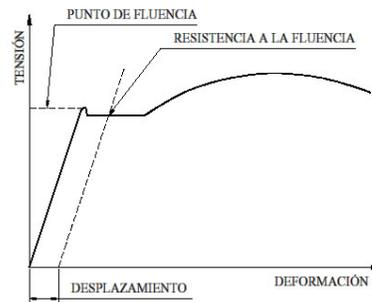


Fig. # 29. Curvas de deformación del acero.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
[www.structurae.de](http://www.structurae.de)

Acero A-36: Es la base para la fabricación de toda la serie de perfiles y de plancha estructurales. Se rige por la Norma Oficial de Calidad, “Acero estructural para puentes y edificios” (DGN B254, ASTM A-36). Su límite elástico es de 2530 kg/cm<sup>2</sup>.

Acero A-37: Es el que se empleaba normalmente en estructuras de edificación. Su límite elástico es de 2400 kg/cm<sup>2</sup>. Su empleo es cada vez menos frecuente, habiendo sido desplazado por la utilización de aceros de calidad superior.

Acero A-42: Tiene las mismas aplicaciones que el acero E 24. Su límite de elasticidad es igual a 2600 kg/cm<sup>2</sup>. Es de uso más generalizado en la actualidad.

Acero A-52: Es el llamado “de alto límite elástico”. Su límite de elasticidad es igual a 3600 Kg/cm<sup>2</sup>.

Acero A-440: Es el acero denominado Mon-Ten, de alta resistencia, con un límite elástico mínimo de a 3515 kg/cm<sup>2</sup>. Y gran resistencia a la corrosión; materia prima de la lámina base de los perfiles formados en frío y plancha de usos especiales. Bajo la Norma Oficial de Calidad para “Acero Estructural de Alta Resistencia Mecánica y a la Corrosión” (DGN B-283, ASTM A-440)

Acero A-615: Es el acero corrugado de alta resistencia para refuerzo de concreto, con un límite elástico inferior mínimo de 4220 kg/cm<sup>2</sup>.

Aceros para remaches, tornillos y electrodos: Los remaches y tornillos ordinarios se obtienen con aceros suaves, cuyas cualidades de resistencia son sensiblemente iguales a las de los aceros empleados en la estructura, pero que debido a las operaciones de forja a que son sometidos, poseen un coeficiente de alargamiento superior.

Los aceros para remaches y tornillos destinados a unas piezas de estructura realizadas con los aceros ordinarios del mercado A 37, o con aceros A 42, tienen una resistencia a la rotura de aproximadamente 3800 kg/cm<sup>2</sup>., y un alargamiento mínimo del 28 por ciento. En la actualidad sólo se utilizan los aceros A-36 y A-440 y se han dejado de utilizar los remaches en caliente. Los aceros para electrodos utilizados en la soldadura de aceros comerciales ordinarios y de aceros A 42 y A 52 son objeto de estudio por parte de los fabricantes.

Estos aceros empleados para la edificación son suministrados bajo las siguientes formas:

Perfiles: Hay series normalizadas de perfiles laminados en caliente: ángulos, T'es, doble T, que se emplean en vigas y armaduras. La laminación se logra calentando el lingote a 1330 °C y se hace pasar por dos enormes rodillos, accionados por motores. El material se convierte en lupias de sección cuadrada o en planchones de sección rectangular. Estos constituyen la materia prima para obtener, mediante posteriores laminaciones, productos terminados, tales como: plancha, lámina, perfiles estructurales y comerciales, rieles, varilla corrugada, alambrón, etc.

Laminados Comerciales: Son de menor canto que los anteriores; existen: angulares de alas iguales, con ancho de ala de 20 a 200 mm, angulares de alas desiguales, con anchos de alas de 30/20 a 200/100 mm. Perfiles T de 30 a 100 mm de ancho de ala. Pequeños perfiles doble T y U de canto inferior a 80 mm. Chapas planas laminadas, cuyo ancho varía de 150 a 1250 mm y el grueso de 5 65 mm.

### **3.1 Caracterización de las estructuras de acero.**

Las estructuras de acero se caracterizan por usar una gran variedad de elementos estandarizados de acero los cuales son transformados para conformar vigas, columnas, platos, y cumplir así con los requerimientos de diseño deseados. Los elementos típicos se relacionan entre si indistintamente según especificaciones, o con otros elaborados

especialmente para conseguir y conformar estructuras complejas de gran rigidez y formas audaces.

Los elementos estándar usados especialmente para vigas y columnas, son de forma alargada con dimensiones de hasta 12 mts., con secciones transversales que varían sus dimensiones para ser utilizadas según sea las cargas a las que se someterá el elemento. La forma de las secciones transversales también varía y se pueden identificar particularmente sus características y condiciones por su geometría, que le ofrecen cierto comportamiento físico y estabilidad. Estas geometrías son variadas, dentro de las más comunes tenemos “tubos”, circulares o rectangulares, barras sólidas, y algunas formas que se asemejan a caracteres alfabéticos, por los que se les reconoce gracias su similitud, como es el caso de las vigas tipo I, tipo T, o tipo L “ángulos”, que se les denomina con el carácter cuya forma representa respectivamente. Además cada elemento tiene una designación alfanumérica (tipo de elemento-dimensión-peso), conformada en primer lugar por el tipo de elemento con la cual también podemos identificar su forma, la altura o peralte y el peso del elemento; por ejemplo un elemento designado como “IR305\*21.1”<sup>34</sup>, corresponde a una viga tipo I de 305 mm. de altura y un peso de 21.1 kg/m.

Una viga tipo “I”, tiene dos elementos horizontales superior e inferior conocidos como “patines” o flanges, y un elemento vertical conocido como “alma” (web). Las dimensiones de este tipo de elementos se especifican de acuerdo a el ancho y espesor de los patines y a la profundidad del “alma”; igual ocurre para las especificaciones del resto de elementos estructurales estandarizados. Además de estos elementos, se pueden fabricar formas similares con piezas cortadas o con la interacción de otros elementos estandarizados para conseguir la respuesta efectiva al requisito solicitado, obteniendo formas que se comportarían en forma relativamente igual que el elemento estándar.

Actualmente se puede conseguir en el mercado distintas especificaciones de elementos típicos para la fabricación de estructuras de acero, ellos varían en formas, dimensiones, método de fabricación y calidad o resistencia del acero conseguida por su aleación con otros minerales. El instituto Americano de la construcción en Acero AISC (American Institute of Steel Construction) tiene especificado alrededor de “1700 secciones estándar”<sup>35</sup> de elementos típicos para estructuras con sus respectivas propiedades necesarias para calcular la resistencia de la estructura.

### **3.1.1 Proceso de diseño.**

El proceso de diseño que debemos efectuar como arquitectos corresponde a una programación dinámica tendiente a buscar la solución a un problema. El objetivo del diseño estructural es por tanto generar una estructura que con alta seguridad cumpla y se conjugue con los demás agentes que intervienen en las edificaciones, ya que estas no son

---

34 Manual de construcción en acero. Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, IMCA. Limusa, 4 edición. México. 2002.

35 AISC, American Institute of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design Manual of Steel Construction, 2ed., 1998.

simplemente un espacio artificial que nos protege del viento y la lluvia, se han convertido en sistemas complejos de clima, de elaborados acabados, y están plagadas de cables y tuberías necesarias para que funcionen eficientemente en interacción con sus usuarios.

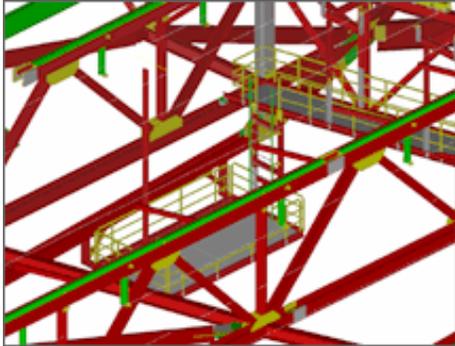


Fig. # 30. Visualización estructura.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
[www.canam.cc](http://www.canam.cc)

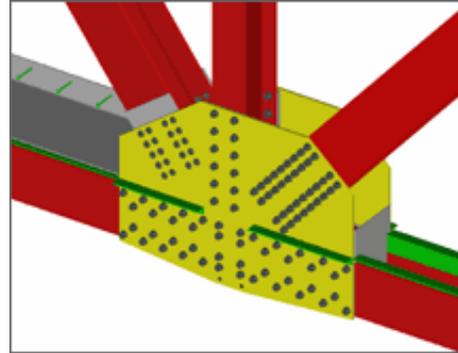


Fig. # 31. Ensamble elementos estructurales.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
[www.canam.cc](http://www.canam.cc)

El diseñador de estructuras debe mantener el control del proceso de diseño, el computador nos debe asistir para producir diseños superiores cargados de alta tecnología, pero el diseñador debe negociar entre todos los componentes consiguiendo la optimización de seguridad, ya que aunque siempre exista la posibilidad de falla se debe cumplir con un alto grado de complejidad, conjuntamente con el costo, ya que si la estructura cuesta mucho generaría una sobre valoración para su uso. Además nos comprometemos a conjugar la función como propiciadora de la convivencia humana con la creatividad que debe ser usada para aprovechar la tecnología de hoy en beneficio y confort del usuario, con parámetros estéticos.

### 3.2 Elementos tipológicos fundamentales.

En cuanto a la tipología individual de los elementos estructurales, se puede considerar 2 elementos como básicos, vigas y columnas, que interactúan entre ellos conformando distintas formas cuya acción depende de las condiciones de vínculo, longitud entre soportes, magnitud y tipo de aplicación de las cargas (normal para vigas. Axial para los demás). La eficacia de la solución depende de la calidad del material, las condiciones reales de sustentación y la forma de la secciones.

Los pilares o columnas son los elementos que transmiten las cargas verticales al terreno, están sometidos a esfuerzos axiales, considerando los soportes que actúan a compresión y las barras que actúan a tracción. Según sea el tipo de unión, podemos encontrar esfuerzos adicionales en los soportes a compresión, si estos están empotrados se generan cargas de flexión que dan lugar a tensiones secundarias.

Los soportes de acero pueden tener las formas más diversas, pueden estar compuestos por varias piezas facilitando su unión con los elementos que le transmiten las cargas, o pueden ser elementos de una sola pieza maciza o elementos huecos como el caso de los perfiles o tubos estructurales. Estos últimos tienen la cualidad de brindarnos un ahorro en el espacio de área vendible mejorando además la resistencia al pandeo en todas las direcciones. Las vigas son los elementos sustentantes horizontales o, como en las cubiertas, ligeramente inclinados, que reciben las cargas verticales y las transmiten a los apoyos, trabajando a flexión. Las cargas que la viga recibe producen en sus secciones tipos de esfuerzo como momento de flexión y esfuerzo cortante.

Entre las formas de viga se distinguen las vigas de alma llena compuestas por aletas horizontales con un elemento vertical o alma, y las vigas de celosía que presentan cordones, montantes y diagonales, conformando elementos mucho más livianos.

Las vigas de acero resultan muy económicas, pues todas las partes de su sección se aprovechan óptimamente. Las partes del perfil destinadas a absorber esfuerzos normales (extensión o compresión) están concentradas en sus fibras extremas, las aletas o platabandas, donde se aprovechan al máximo. Hasta un cierto límite, una viga resultará más económica cuando más alta sea, pues la sección necesaria para los cordones disminuye al aumentar la altura de la viga. Pero pasado este límite el mayor precio del alma o la celosía sobrepasa el ahorro en material para los cordones. La transmisión de los esfuerzos cortantes verticales tiene lugar en las vigas de alma llena por la resistencia a la cortadura del material que forma el alma.

Las vigas de acero pueden constituir las llamadas estructuras mixtas cuando actúan solidariamente con losas de hormigón puestas sobre las platabandas o aletas, maximizando la absorción y transmisión de fuerzas. En las vigas mixtas la colaboración entre dos materiales de distinta resistencia y distintas condiciones de elasticidad y deformabilidad, requiere especial atención, así como la disposición de sus uniones y la tecnología de su ejecución. En las vigas mixtas el cordón de compresión está constituido por una losa de hormigón; en las de celosía la resistencia al cortante se realiza por los montantes y diagonales, trabajando a extensión y compresión.

De todas las formas de vigas, las vigas de alma llena son las más utilizadas en la construcción de edificaciones habitacionales, aunque actualmente se ha comprobado los beneficios de las secciones tubulares. Se distinguen los perfiles laminados y los perfiles soldados. Los laminados son los más económicos y son preferibles incluso siendo su peso mayor que el de las soldadas. Los soldados requieren más trabajo de fabricación, tienen aplicación en caso de grandes luces o grandes cargas.

Los pórticos o marcos son combinaciones de los dos tipos básicos anteriores, vinculadas entre sí por uniones simples (Cerchas) ó Rígidas (Marcos), estos últimos son los elementos usados para construir edificios en estructuras metálicas. Los arcos son elementos curvos que actúan casi siempre a compresión, se pueden construir en alma llena o celosía.

Vigas de entramado o celosía es la que requiere la menor cantidad de material, pero a la vez en su ejecución se emplea mucho trabajo resultando un poco mas costosas que las de alma llena, pero al compararlas con estas que son de mayor peso, definitivamente son más livianas y por su mejor transmisión de cargas son ampliamente aconsejables.

Este tipo de vigas pueden construirse para todas las cargas y todas las longitudes, desde las más delicadas y ligeras, hasta las vigas para puentes más pesadas. En la construcción de edificaciones habitacionales tienen aplicación, tanto en forma de vigas a flexión para transmitir cargas verticales, como en forma de elementos de arriostramiento horizontales y verticales. Las vigas de entramado que actúan a flexión bajo cargas verticales pueden ser vigas de forjado ligeras, pueden ser jácenas o vigas secundarias, y pueden ser vigas principales o de transmisión de las cargas de todo el edificio al sistema de soportes.

Algunas veces como ilustraremos más adelante con un sistema estructural ideal para edificaciones habitacionales, las vigas de celosía tienen una altura igual a la de un piso y pueden estar en la parte baja del edificio o intercaladas verticalmente. Las vigas de entramado, cuando se emplean como vigas de entrepiso, tienen la ventaja de que a través de ellas pueden hacerse pasar con toda libertad las canalizaciones e instalaciones necesarias para todos los sistemas que interactúan en un edificio.

Una Celosía consta de un cordón superior, un cordón inferior y las barras que lo unen, verticales y oblicuas, o solamente oblicuas. Las barras a compresión, a causa del peligro de pandeo, tienen mayor sección que las barras a tracción de la misma carga. Se elige por lo tanto un sistema de entramado en el que las barras más largas estén sometidas a tracción. Los nudos de un entramado se consideran como articulados. Las barras sólo están sometidas por lo tanto a fuerzas axiales (tracción o compresión). Las cargas se aplican generalmente en los nudos, pero si los cordones reciben cargas entre dos nudos, estarán sometidos a un esfuerzo local de flexión que habrá que añadir al esfuerzo propio del cordón; por lo tanto este cordón deberá tener una sección resistente a flexión.

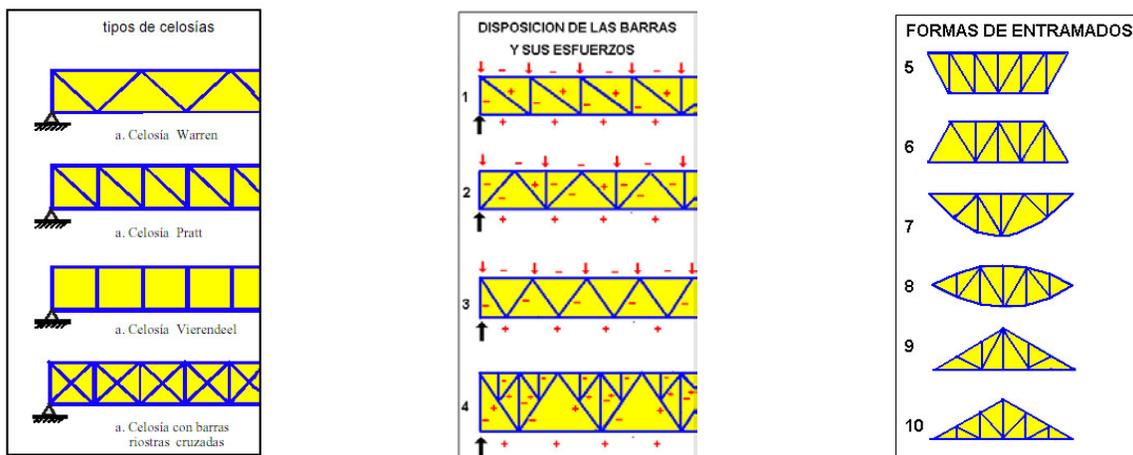


Figura # 31. Disposiciones de las barras de entramado en las vigas de cordones paralelos

1) Viga de entramado con barras verticales y barras inclinadas dirigidas todas en el mismo sentido. Las diagonales, más largas, están sometidas a tracción; las verticales, más cortas, a compresión.

2) Las diagonales están sometidas alternativamente a tracción y compresión. Las verticales intercaladas en los ángulos abiertos hacia arriba sirven para transmitir las cargas aisladas a los nudos inferiores.

3) Viga con sólo diagonales, sin barras verticales. La inclinación de las diagonales es de unos  $60^\circ$ . Esta forma de entramado tiene la ventaja de que las barras sólo tienen dos ángulos de inclinación y por lo tanto cuando se entrecruzan visualmente las barras de varios entramados, el aspecto resultante es más agradable que con los entramados de barras verticales y oblicuas.

4) Viga de entramado de gran luz, de la misma forma que en 2, en la que se han puesto entre los nudos principales unas barras adicionales para la transmisión de las cargas aisladas.

Formas de los entramados:

Figuras 5 y 6 Entramados trapeciales.

Figuras 7 y 8 Entramado parabólico y entramado lenticular.

Figuras 9 y 10 Entramados de cubierta triangulares.

Solicitud de  
las barras:  
- compresión  
+ Tracción

**Conexión de miembros estructurales y su ensamble:** Las conexiones son las que permiten transmitir las fuerzas entre dos o más miembros ya que son sistemas que unen todas las piezas de la estructura. Se clasifican por el tipo y magnitud de la fuerza transferida como momento, corte, reacción en el extremo. Una conexión totalmente restringida es en la que existe suficiente rigidez para mantener los ángulos entre los miembros que se intersectan.

Inicialmente las conexiones de acero se efectuaban con remaches en caliente, técnica que fue importante para unir elementos de acero a escala de edificaciones. Luego se avanzó con el atornillado, que se hacía para conexiones temporales y para casos especiales, hasta hoy en donde es más utilizado los tornillos estructurales y la soldadura.

Los miembros de acero en un sistema estructural generan una amplia variedad de situaciones según la forma de las partes conectadas, el tipo de conector utilizado y la naturaleza y magnitud de las fuerzas que han de transferirse entre los miembros. En situaciones comunes se utiliza un dispositivo de conexión, tales como placa de apoyo, ángulos, etc., que se sueldan o atornillan a un miembro.

### **3.2.1 Sistema de entrepiso.**

Los entrepisos son sistemas estructurales horizontales que establecen las separaciones entre los pisos y tienen por misión el servir de base para realizar nuestras funciones vitales; entre sus funciones principales están además de transmitir las cargas verticales y horizontales, las de aislamiento acústico, protección contra el fuego, el calor y la humedad.

La selección de un sistema de entrepiso en una edificación es muy importante para lograr la optimización del proyecto, debido a que el entrepiso es uno de los elementos estructurales más repetitivos en la construcción (su repetición depende del número de pisos) y por lo general el que mayor carga muerta involucra dentro del total de la edificación. La optimización de un proyecto depende de su relación calidad precio, del

cumplimiento de las exigencias de las normas estructurales y constructivas, de su facilidad constructiva y rendimientos en su ejecución, de su durabilidad en el tiempo y otros factores menores.

La utilización de sistemas de entrepiso en Colombia ha sido muy variada a través del tiempo, si nos remontamos a las edificaciones construidas con anterioridad a la utilización del concreto reforzado (antes de 1925 aproximadamente) los sistemas de entrepisos utilizados eran en madera, conformados por vigas o planchones en madera colocados en una dirección y encima un listón de madera machi-hembriado. Estos sistemas de entrepiso en madera se siguieron utilizando durante varios años, hasta los años sesenta, principalmente en viviendas de dos a cuatro pisos. Luego en la época del auge del concreto fueron reemplazados por losas macizas, sistema que ha evolucionado hasta ofrecer hoy entrepisos aligerados con casetones de guadua.

#### Sistemas de entrepiso más utilizados en Colombia

a. Placas macizas de concreto: se emplean más en edificaciones habitacionales de hasta 3 niveles.

b. Placas en concreto aligeradas en una dirección: son las más empleadas en los edificios aporticados principalmente con aligeramiento en casetón de guadua, se emplean en luces de 4.0 a 8.0 metros. Estas placas por lo general presentan mucho desperdicio de concreto durante la fundida, aumentando la carga muerta de la edificación y los costos. En los últimos años se emplean aligeramientos con lonas o icopor.

c. Placas aligeradas en dos direcciones: se emplea este sistema de entrepiso para luces mayores a 8.0 metros. En la actualidad para el aligeramiento se siguen utilizando cajones prefabricados en concreto, pero también se utilizan en fibra de vidrio reutilizables, en icopor, en casetón de guadua o lonas.

d. Reticular celular: el reticular celular se empleó bastante en Colombia, pero hoy en día de acuerdo con las normas debe contemplar vigas estructurales en las dos direcciones de la edificación, amarrando las columnas, convirtiéndose en una placa aligerada en dos direcciones.

e. Losas prefabricada: su utilización no es masiva. Se emplean placas o prelosas prefabricadas de 3 a 4 cm de espesor de luces no mayores a 6.0 m en concreto reforzado normal o pretensadas. También las hay aligeradas con icopor y vacíos en su interior con un espesor un poco mayor (sistema Fibrit). Se emplean más en edificaciones de mampostería que en pórticos de concreto.

f. Steel deck: se empezó a emplear en Colombia desde hace unos diez años con la reaparición de la construcción de edificios con estructura en acero, hoy en día se utiliza en cualquier sistema estructural pórticos de acero, pórticos de concreto y mampostería estructural.

g. Bovedillas: es un sistema poco utilizado en nuestro medio, se ha empleado en mampostería estructural y en vivienda de varios pisos. Su utilización es óptima en luces pequeñas (3.0 a 5.0 m.). La construcción de placas macizas con vigas descolgadas exige la colocación de dos niveles de formaleta para poder fundir conjuntamente vigas y placas en forma monolítica, situación que es difícil de ejecutar con el tipo de formaleta en tablero que más se utiliza en nuestra construcción, obligando en la gran mayoría de los casos a fundir parcialmente las vigas descolgadas, dejando la parte superior de la viga en un espesor igual al de la placa maciza para fundirse conjuntamente con la placa. Allí, se genera una junta de construcción la cual afecta la arcilla, de concreto o de escoria como aligerantes de las placas, pero principalmente en construcción popular e informal.

La bovedilla puede ser de dimensiones variables, normalmente se busca que se pueda manipular fácilmente. En muchas ocasiones el sistema presenta unas viguetas prefabricadas con refuerzo, fundidas parcialmente, de luces máximas de 6.0 m., las cuales soportan las bovedillas. Posteriormente, se funde una pequeña placa en concreto reforzado que confina el sistema, generando un diafragma rígido.

h. Entrepisos de madera: actualmente se utiliza en proyectos especiales, o entrepisos pequeños y livianos para mezanines, pero por el ruido que presenta al caminar por el crujir de la madera en muchas obras se descarta. Fue un sistema de entrepiso muy empleado en Colombia en épocas pasadas.

Con la aparición del concreto reforzado en Colombia (1920 aproximadamente) se empezaron a hacer entrepisos con este material, principalmente conformados por placas macizas, las cuales se apoyaban sobre vigas descolgadas o sobre rieles de ferrocarril. Además, se empezaron a desarrollar sistemas estructurales de pórticos en concreto reforzado, sistema que hasta la fecha es el más empleado en Colombia para edificios de más de cuatro pisos.

Durante los primeros años de la década de los noventa, el aumento progresivo en el costo del concreto y el poco aumento en el acero estructural llevó a los constructores en Colombia a desarrollar edificios con estructura metálica, perfiles importados en su gran mayoría, lo que introdujo en el país el sistema de entrepiso en Steel Deck “formaleta permanente”, este entrepiso en los últimos años se ha popularizado, al punto que se ha empleado en edificaciones con diferentes sistemas estructurales y materiales, en pórticos de acero, en pórticos de concreto y en mampostería estructural.

Las ventajas que presenta este entrepiso son: su bajo peso, su facilidad constructiva, la lámina colaborante sirve de formaleta y además reemplaza el refuerzo positivo de la losa, su facilidad para colocar las instalaciones por debajo del entrepiso (esto implica la colocación de un cielo raso) y algunas otras ventajas.

Sus desventajas son: poca resistencia al fuego (la NSR-98 exige para entrepisos por lo menos una resistencia al fuego de 1 hora), presenta poco aislamiento acústico debido a su bajo espesor y si no se colocan soportes adecuados puede presentar vibraciones al caminar o correr sobre él.

Para satisfacer todas las funciones de los subsistemas necesarios para habitar una edificación, los entrepisos se componen en general de varias capas, en donde alojan generalmente las canalizaciones horizontales y muchas de las instalaciones para el suministro y la evacuación de que disponen los edificios. Finalmente, constituyen los cerramientos y límites visuales horizontales, superiores e inferiores de los locales.

De su composición y de la clase y grueso de cada capa depende su altura total, siendo deseable conseguir la menor ya que luego repercute en la altura total del edificio; están formados por lo general de tres partes:

La estructura sustentante o forjado resistente, que en la estructura metálica está constituida normalmente por un sistema de vigas y un conjunto de losas que descansan sobre aquéllas.



Fig. # 32. Sistema de Entrepiso Típico en Acero

Imagen tomada con fines académicos de:  
[www.losconstructores.com](http://www.losconstructores.com)



Fig. # 33. Entrepiso aligerado en una dirección con casetón de guadua

Imagen tomada con fines académicos de:  
[www.losconstructores.com](http://www.losconstructores.com)

El cielo raso o plafón, que es la cara inferior y a su vez el límite visual superior del piso que va debajo. Puede consistir en un revestimiento aplicado a las caras inferiores de las losas y de las vigas, o estar formada por un cielo raso suspendido, de una o varias capas.

Encima de la estructura sustentante va el firme del piso de encima; se compone de capas de nivelación, de aislamiento y de reparto de cargas, y del revestimiento definitivo.

Transmisión de cargas: el entrepiso recibe las cargas verticales constituidas por los pesos propios y las cargas vivas, y las transmiten, trabajando a flexión, a los puntos de apoyo del esqueleto metálico. También reciben las cargas horizontales debidas al viento u otras causas como terremotos, y las transmiten a los elementos de arriostamiento del edificio.

El entrepiso integra buena parte de los sistemas de protección acústica, térmica y contra el fuego. La protección acústica tiene mucha importancia, ya que cada vez es mayor el

número de personas que, tienen que vivir, trabajar o estudiar en un espacio reducido. Los techos deben garantizar el necesario aislamiento del ruido de las pisadas y de los ruidos aéreos. En lo que concierne al aislamiento acústico el entrepiso presenta una o varias capas de materiales especializados que disipan las ondas acústicas, según sea la necesidad.

El enemigo número 1 de la construcción metálica es el fuego, por lo tanto la protección contra el fuego es necesaria y, esta incluida y vigilada por los códigos de construcción de cada localidad, dicha protección debe seguirse para la losa resistente, eligiendo un material resistente al fuego o mediante revestimientos, para las vigas, mediante recubrimientos o por un revestimiento de la totalidad del sistema. En los climas extremos es necesario incluir sistemas de protección térmica, que controle el flujo de calor según sea la intención.

### **3.3 Elementos estructurales ideales para edificaciones habitacionales: los perfiles tubulares de acero.**

Actualmente este tipo de elementos estructurales constituyen la más económica y mejor opción constructiva para las estructuras de celosías: Aunque el costo de su fabricación es más elevado que el de otro tipo de perfiles, su utilización proporciona soluciones económicas y livianas, ideales para ser utilizadas en edificaciones habitacionales de poca altura; las cuales son objeto de esta investigación y por lo cual los perfiles tubulares se convierten quizás en el elemento estructural ideal para su solución, aún más si su estructura se desarrolla en base de celosías.

A nivel mundial, es notable el incremento del empleo de estos perfiles tubulares para la construcción, gracias a la divulgación de sus ventajas y beneficios económicos, y a la creación de herramientas de cálculo y diseño orientadas hacia este tipo de construcción como al correcto empleo de estos; generando diseños competitivos gracias a estudios arquitectónicos y de ingeniería para generar el cambio de uso por estos elementos.

El auge de las estructuras livianas de acero ha generado un cambio radical en favor de las estructuras generadas con perfiles tubulares. Anteriormente, por la falta de perfiles tubulares en las ferreterías y fábricas obligaba a recurrir a soluciones como la unión de 2 perfiles soldados (perfiles UPN), que aunque tienen un comportamiento parecido a los perfiles tubulares no es idéntico y no brinda las mismas posibilidades.

Entre las grandes diferencias entre estos dos métodos tipos de elementos, encontramos la económica, ya que conformar un perfil hueco a base de UPN's es más caro que el perfil tubular cuadrado o rectangular que se busca reemplazar; puesto que es necesario soldar toda la longitud del perfil, dificultando aun mas este proceso, ya que "la soldadura debe realizarse sobre aristas de laminación, lo que deriva en una muy escasa penetración y, por lo tanto, en un comportamiento distinto al de los perfiles tubulares; los perfiles conformados en frío también tienen un cordón de soldadura en toda la longitud; que se

ejecuta con penetración completa mediante golpe de forja en un proceso continuo y se trata e inspecciona automáticamente al 100% en toda su longitud, lo que garantiza su buen comportamiento<sup>36</sup>, en contraposición. Por lo tanto el empleo de 2 UPN's soldadas en lugar de un perfil tubular cuadrado o rectangular carece de sentido por rentabilidad, seguridad y resistencia.

### 3.3.1 Fabricación De Perfiles Tubulares

Los perfiles tubulares pueden fabricarse con soldadura o sin soldadura. Estos últimos se producen en dos fases, la inicial que consiste en punzonar con una barra y la segunda consiste en el estiramiento de este tubo corto hasta conformar un perfil tubular delgado y largo. Después de este proceso, el tubo pasa por un laminador para adquirir el diámetro exterior deseado.

Los perfiles tubulares rectangulares se fabrican conformando los perfiles tubulares circulares mediante rodillos. Este proceso puede realizarse en frío o en caliente, y pueden utilizarse para perfiles tubulares circulares sin o con soldadura longitudinal mediante procesos de soldadura con resistencia eléctrica o con un proceso de soldadura por inducción.



Fig. # 34. Perfiles tubulares  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Catálogo Aceralia  
<http://www.ICTubular.es>

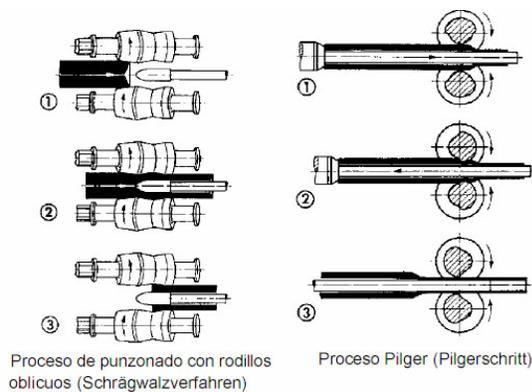


Fig. # 35. Métodos de fabricación de tubos estructurales.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Perfiles Tubulares en Aplicaciones Estructurales

“Fue en el siglo XIX cuando se desarrollaron los primeros métodos para producir perfiles tubulares circulares soldados y sin soldadura. En 1886, “Mannesmann brothers” desarrolló el proceso de punzonado con rodillo oblicuo (skew roll piercing process/

36 Construber, Boletín informativo No.1. Instituto para la Construcción Tubular, ICT. Pág. 4. 1991

Schrägwalzverfahren), que hizo posible laminar elementos tubulares cortos de pared gruesa. Este método, combinado con el proceso Pilger (Pilgerschrittverfahren), desarrollado algunos años más tarde, permitió fabricar perfiles tubulares sin soldadura con pared de menor grosor y de mayor longitud. En 1952 Stewarts and Lloyds (en la actualidad Corus Tubes) desarrolló el perfil tubular rectangular con casi las mismas propiedades que el perfil tubular circular, facilitando las conexiones ya que permite realizarlas mediante cortes planos<sup>37</sup>.

### 3.3.1.1 Símbolos

Se utilizan preferentemente las siguientes designaciones en aplicaciones estructurales:

Perfil tubular estructural (SHS).

En Canadá y EE.UU., es habitual referirse al perfil tubular estructural como Hollow Structural Sections (HSS) en lugar de Structural Hollow Section (SHS).

Perfil tubular circular (CHS)

Perfil tubular cuadrado y rectangular (RHS)

### 3.3.2 Conexiones de tubos estructurales

Uno de los componentes del costo global de una Estructura con mayor incidencia es la fabricación y la mano de obra empleada en ella. Por lo tanto, contribuir a su reducción en una celosía, pórticos, o estructura tridimensional, esta determinada no sólo por la disminución del número de nudos, del número de diagonales, de igualar su longitud y ángulo de encuentro, sino que también será necesario diseñar uniones lo más sencillas posible que facilite su ejecución en taller.

Hasta aproximadamente 1930, las uniones se realizaban exclusivamente por remachado y atornillado. A partir de esta misma fecha, la soldadura eléctrica se ha generalizado, aportando profundas modificaciones en el campo de la construcción metálica, gracias a la metalurgia que encontró propiedades químicas que le confiriesen al elemento la necesaria soldabilidad, ya que este nuevo método de unión fue preferido por su rapidez y alta efectividad. Las acereras producen, bajo demanda, aceros de calidad garantizada para el soldado. Además, se obtiene industrialmente en los altos hornos.

Enfocándonos en las celosías, ya que serán importantes luego para nuestro sistema estructural, encontramos varios tipos de ellas que se utilizan en la práctica estructural. Las celosías construidas con perfiles tubulares deben calcularse de tal forma que el número de nudos, y, por tanto la fabricación, sean mínimos. Esto significa que, debido al reducido

---

37 Wardenier Jaap. Perfiles Tubulares en Aplicaciones Estructurales. Universidad Tecnológica de Delft. Holanda. ICT 2002. Pág. 11

número de nudos, se prefiere una celosía Warren con nudos de tipo K, a una celosía Pratt con nudos de tipo N. Las vigas Vierendeel se utilizan principalmente en aquellos casos en los que los requisitos arquitectónicos o funcionales exigen que no se utilicen barras diagonales.

Puede que se prefieran o requieran uniones atornilladas por razones de transporte y ensamblado, mientras que en las estructuras espaciales se utilizan generalmente uniones prefabricadas. Sin embargo, la solución más sencilla es perfilar los extremos de las barras que se van a conectar al elemento pasante (cordón) y soldar las barras directamente entre sí. En la actualidad, el perfilado de los extremos de las barras no supone ninguna complicación y puede combinarse este procedimiento con el rebabado necesario para las soldaduras. Aunque las uniones soldadas directamente son la solución más simple y limpia, la transferencia de esfuerzos es bastante compleja debido a la distribución no lineal de la rigidez a lo largo del perímetro de las barras de relleno conectadas.

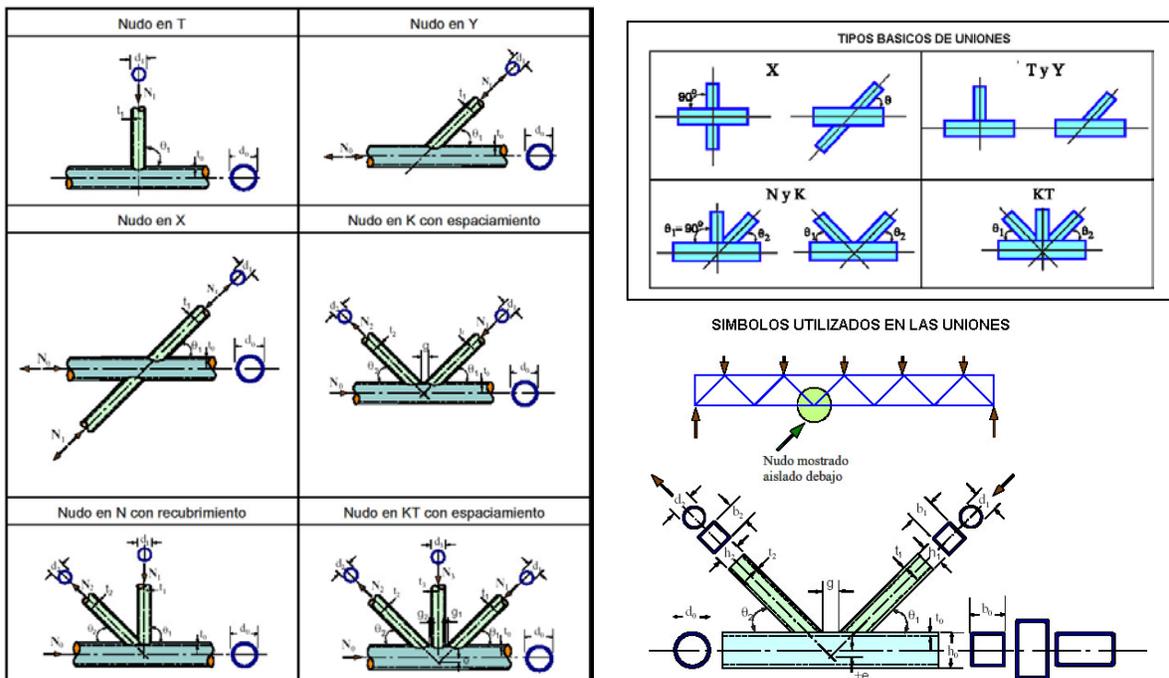


Fig. # 36. Conexiones Típicas en perfiles tubulares.

Imagen tomada con fines académicos de: Perfiles Tubulares en Aplicaciones Estructurales

Los perfiles tubulares circulares pueden conectarse de varias maneras, con conexiones especiales prefabricadas, con piezas para los extremos de las barras que permiten uniones con tornillos (Bridas), soldados a una placa, soldados directamente a la barra pasante (cordón). La forma más económica y habitual de unir perfiles tubulares rectangulares es la unión directa sin placas de intersección ni cartelas. Esto proporciona también la forma más eficiente de protección y mantenimiento. Las uniones entre perfiles tubulares rectangulares pueden realizarse fácilmente, ya que los elementos a conectar sólo

necesitan cortes rectos en los extremos. Aunque la fabricación es sencilla, la transferencia de esfuerzos es más compleja debido a la distribución no uniforme de la rigidez en las uniones. A causa de las caras planas del perfil, las diferencias de rigidez en las esquinas y en el centro de una cara son incluso mayores que los de los perfiles tubulares circulares. Las uniones entre vigas y columnas pueden ser soldadas o atornilladas. En el caso de las uniones atornilladas, la mayor parte de las veces se sueldan placas o casquillos a las columnas o vigas para permitir el atornillado.

### 3.3.3 Ventajas Estructurales de estos Perfiles

Entre las ventajas de los perfiles tubulares encontramos que estos tienen un comportamiento excelente frente a los esfuerzos de compresión, gracias al alejamiento del material respecto de su eje. El radio de giro de un perfil tubular (relativo a la masa del elemento) es generalmente mucho mayor que el correspondiente al eje menor de un perfil abierto, esta diferencia se traduce en una esbeltez menor para los perfiles tubulares, y por consiguiente, una masa también menor al compararla con los perfiles abiertos. Los elevados radios de giro facilitan que se trabaje con elementos comprimidos más largos, o que los elementos con los que trabajamos se vean menos afectados por el fenómeno del pandeo.

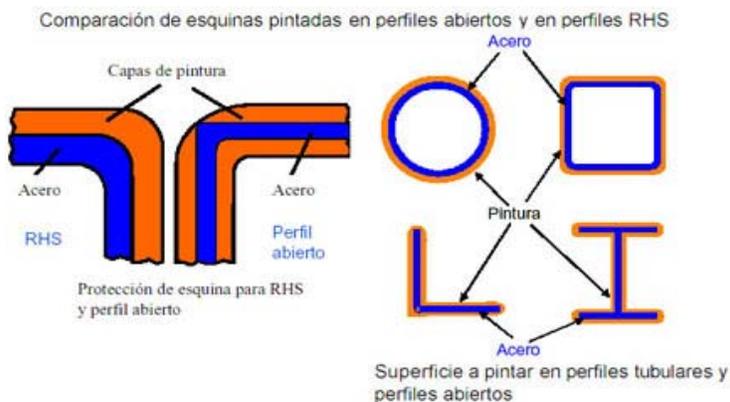


Fig. # 37. Protección y pintura de perfiles tubulares

Imagen tomada con fines académicos de:

Perfiles Tubulares en Aplicaciones Estructurales

Las estructuras diseñadas con perfiles tubulares tienen una superficie a proteger (corrosión y pintura) menor que las estructuras construidas a base de perfiles abiertos, en proporciones que varían entre un 20 y un 50% de menor superficie. Además se han realizado muchos trabajos comprobando que la corrosión interna no se da en perfiles tubulares sellados, e incluso en aquellos perfiles tubulares que no se han sellado herméticamente, la corrosión es limitada. En lo que respecta a la condensación del agua, en un perfil imperfectamente sellado, se pueden realizar agujeros de drenaje en una zona hacia donde el agua tienda por gravedad, evitando de esta manera este fenómeno.

Al utilizar códigos nuevos y actualizados que incluyan el diseño y cálculo de estructuras con este tipo de perfiles, como el Eurocódigo 3, el diseñador obtiene una serie de ventajas adicionales, ya que permite la plastificación de las secciones antes del agotamiento cuando la sección se clasifica como clase 1 ó 2, y la mayor parte de las secciones que encontramos en los prontuarios de perfiles tubulares resultan ser de clase 1 ó 2 cuando se someten a compresión o flexo-compresión.

Otra ventaja de trabajar con el Eurocódigo 3 es que los perfiles tubulares siempre emplean las curvas europeas de pandeo "a" y "b", es decir, las que menos penalizan la resistencia de los perfiles al aumentar la esbeltez adimensional. al consultar el Eurocódigo 3 vemos que el perfil hueco conformado mediante 2 UPNs soldadas quedaría clasificado como clase 3 (sólo se puede utilizar el régimen elástico) y la curva de pandeo europea que tendríamos que utilizar sería la "c", que penaliza más la resistencia del perfil que sus predecesoras. Esto quiere decir que 2 UPNs soldadas tendrán peor resistencia a compresión que un perfil tubular de similares características geométricas.

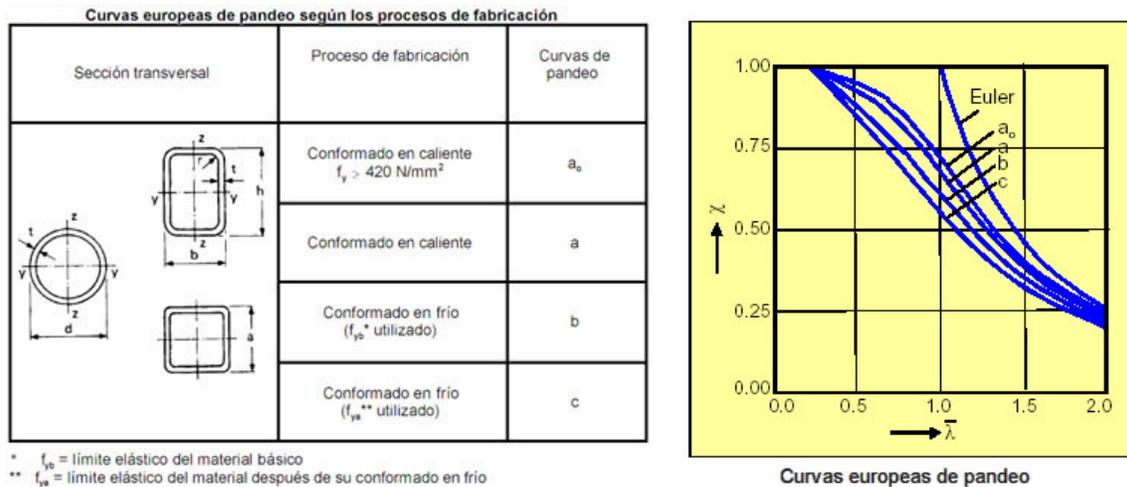


Fig. # 38. Curvas de pandeo para cálculo de estructuras tubulares según códigos Europeos.  
 Imagen tomada con fines académicos de: Perfiles Tubulares en Aplicaciones Estructurales

El uso del hueco interno de los perfiles puede ser aprovechado también, obteniendo aun mejores beneficios, ya que por ejemplo puede utilizarse para aumentar la resistencia portante rellenándolo con hormigón o para suministrar protección contra el fuego. Inclusive, las columnas de perfiles tubulares pueden utilizarse para incorporar la instalación de sistemas de ventilación o calefacción.

**Calefacción y ventilación:** El hueco interno de los perfiles tubulares se puede utilizar para la circulación de aire y agua de los sistemas de ventilación y calefacción en edificios; lo que demuestra la excelente combinación de la función resistente de las columnas de perfiles tubulares junto con la integración de un sistema de ventilación o calefacción. Este sistema ofrece una maximización del área útil de la planta a través de la eliminación de

intercambiadores de calor, un suministro uniforme del calor y un sistema combinado de protección contra el fuego.

Rellenado del hueco interno con hormigón: Una razón de gran importancia en favor del uso de perfiles tubulares rellenos de hormigón es que las columnas pueden resultar relativamente esbeltas. Si los espesores de pared normalmente disponibles no son suficientes para satisfacer los requisitos de capacidad portante, se puede rellenar el interior del perfil tubular con hormigón. Por ejemplo, para edificios puede ser preferible que las columnas tengan las mismas dimensiones externas en cada planta. Para la planta superior puede optarse por el menor espesor de pared, y se puede aumentar el espesor de la pared a medida que aumenta la sollicitación en los pisos inferiores. En caso de que el perfil tubular de mayor espesor de pared disponible no sea suficiente para la planta baja, puede rellenarse el perfil tubular con hormigón para aumentar su capacidad portante.

Dado que la estructura de acero es visible, permite un diseño esbelto y arquitectónicamente atractivo. El perfil tubular no sólo actúa como encofrado del hormigón, sino que también garantiza que el ensamblado, montaje y proceso de construcción no sufren retrasos debido al tiempo de fraguado y endurecimiento del hormigón.

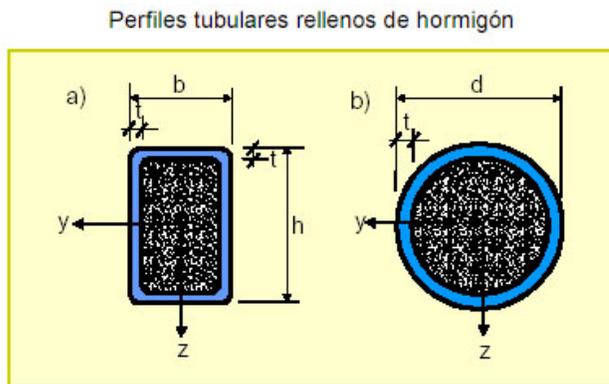


Fig. # 39. Perfiles tubulares rellenos de hormigón.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Perfiles Tubulares en Aplicaciones Estructurales

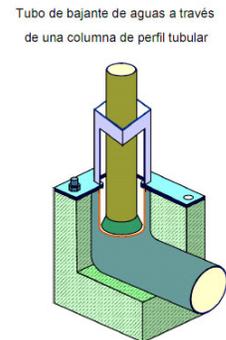


Fig. # 40. Beneficios por uso del hueco interno de los perfiles tubulares.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Perfiles Tubulares en Aplicaciones Estructurales

Todo lo anterior hace que los perfiles tubulares sean los más indicados para su utilización en estructuras en celosía. Para sacar el máximo rendimiento a estos materiales y a las características anteriormente descritas deberemos seguir pautas de diseño específicas que han sido probadas e incluidas en manuales de construcción en acero actualizados como el eurocódigo 3. Entre las principales disposiciones debemos procurar triangulaciones más largas, que nos llevarán a reducir el número de nudos. La geometría es vital para el éxito de estas, y las celosías tipo Warren resultan las más indicadas y económicas para este tipo de perfiles.

### 3.3.3.1 Esbeltez y resistencia al fuego mediante perfiles tubulares rellenos de hormigón.

Las columnas de perfiles tubulares rellenos de hormigón se convierten en una opción constructiva que incrementa la resistencia de estos elementos además de incrementar su resistencia frente al fuego, alcanzando hasta 120 minutos de exposición al fuego sin perder sus propiedades.

El relleno de hormigón de los perfiles tubulares no sólo los dota de una mayor capacidad portante, sino que además mejora la duración de su resistencia frente al fuego. Amplios proyectos de pruebas, muestran que las columnas de perfiles tubulares rellenas de hormigón armado, sin otra protección externa contra el fuego, como yeso, paneles de vermiculita o pinturas intumescentes, pueden alcanzar una vida frente al fuego de incluso 2 horas, dependiendo de la relación entre la sección transversal del acero y del hormigón, el porcentaje de armado del hormigón y la carga aplicada.

Protección frente al fuego de perfiles tubulares rellenos de hormigón

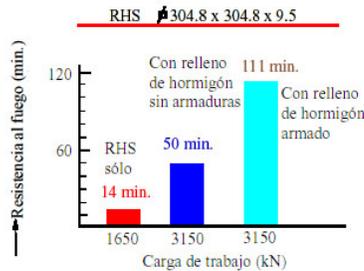


Fig. # 41. Resistencia al fuego de perfiles tubulares rellenos de hormigón.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Perfiles Tubulares en Aplicaciones Estructurales

Variaciones en la resistencia al fuego exigida

Tipo de edificio	Requisitos	Tipo de resistencia al fuego
Una planta	Ninguna o baja	Posiblemente hasta R30
2 a 3 plantas	Ninguna o media	Posiblemente hasta R30
Más de 3 plantas	Media	De R60 a R120
Edificios altos	Alta	De R90 y más

Fig. # 42. Resistencia al fuego exigida  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Perfiles Tubulares en Aplicaciones Estructurales

Estas columnas mixtas de acero y hormigón, presentan una importante serie de ventajas en el campo estructural y económico, lo cual ha incrementado últimamente su uso incursionando desde hace un par de décadas en las estructuras de los edificios. Al rellenar con concreto estos perfiles tubulares le brindamos a estos una mayor rigidez y una mayor capacidad de soportar carga, lo cual nos permite soportar mayores cargas con estéticas y esbeltas columnas sin incrementar las dimensiones externas. Este resultado se puede intensificar mediante el uso de armaduras de refuerzo, si se requiere.

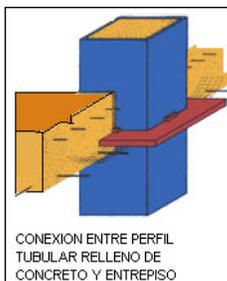


Fig. # 43. Perfiles tubulares relleno de concreto.

Imagen tomada con fines académicos de:

Boletín informativo Construber.  
<http://www.ICTubular.es>



La estructura de acero puede quedar a la vista, lo cual permite un diseño arquitectónico con colorido diverso; reduciendo tanto los costos del pintado como los de protección frente a la corrosión, debido a la reducida superficie externa de las columnas. Lo que conlleva a una superficie útil resultante por planta mayor, gracias a las reducidas dimensiones de las columnas. El relleno con hormigón del perfil tubular no requiere equipos especiales diferentes a los utilizados en los trabajos habituales. El perfil tubular sirve a la vez de encofrado, refuerzo para el concreto y protección en medios agresivos para las armaduras. La ganancia de resistencia del concreto no condiciona el plazo de ejecución, ya que el tiempo necesario para el ensamble y montaje no se ve interrumpido por este proceso de curado, sin generar contratiempos.

El núcleo de concreto incrementa la resistencia frente al fuego de las columnas, y si usamos armaduras, estas pueden resistir más de 120 minutos sin protección externa, presentando una mayor ductilidad y gran capacidad de rotación. El concreto queda sujeto al perfil de acero y no se puede desagregar aunque se alcance el límite resistente del concreto gracias al confinamiento, propiedad que mejora la resistencia de ambos materiales. Sin embargo existen limitantes con respecto a la esbeltez relativa y a la excentricidad para poder calcular estos elementos, afortunadamente toda esta normativa se ha desarrollado y se encuentra compilada en códigos como el Eurocódigo 4 lo cual nos permite beneficiarnos de estos elementos.

El comportamiento frente al fuego se convierte de esta manera, en la principal razón para la elección de estos elementos para las estructuras de edificaciones habitacionales. Al combinar materiales con conductividades térmicas muy diferentes, se produce un comportamiento que permite el tránsito calórico entre estos elementos y diferencias de temperatura a través de la sección transversal.

Dimensiones mínimas de sección transversal, cuantías de armado y recubrimiento del eje de las armaduras en función de la resistencia al fuego, para diferentes grados de utilización  $\mu$ .

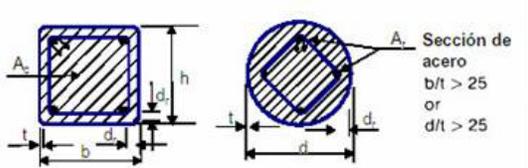
	Clase resistente al fuego				
	R30	R60	R90	R120	R180
Dimensiones mínimas de la sección transversal para $\mu = 0,3$ Mínimo ancho (b) o diámetro (d) % mínimo de armado ( $p_s$ ) Recubrimiento mínimo ( $d_s$ )	160 0.0 -	200 1.5 30	220 3.0 40	260 6.0 50	400 6.0 60
Dimensiones mínimas de la sección transversal para $\mu = 0,5$ Mínimo ancho (b) o diámetro (d) % mínimo de armado ( $p_s$ ) Recubrimiento mínimo ( $d_s$ )	260 0.0 -	260 3.0 30	400 6.0 40	450 6.0 50	500 6.0 60
Dimensiones mínimas de la sección transversal para $\mu = 0,7$ Mínimo ancho (b) o diámetro (d) % mínimo de armado ( $p_s$ ) Recubrimiento mínimo ( $d_s$ )	260 1.5 25	450 6.0 30	500 6.0 40	- - -	- - -

Fig. # 44.

Requisitos para el recubrimiento de armaduras de refuerzo en acero.

Imagen tomada con fines académicos de:

Boletín informativo Construber.  
<http://www.ICTubular.es>

### **3.3.3.2 Protección contra el fuego mediante circulación de agua.**

Uno de los métodos modernos de protección de edificios contra el fuego, y que más adelante detallaremos, utiliza columnas de perfiles tubulares rellenos de agua, interconectadas a un depósito de almacenamiento de agua, generalmente en la parte superior de la edificación. En una situación de incendio, el agua circula por convección, manteniendo la temperatura del acero por debajo del valor crítico de 450°C. Si la circulación del agua es apropiada, el tiempo de resistencia al fuego resultante es prácticamente ilimitado. Para evitar que el agua se congele, se le añade carbonato potásico (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Este sistema tiene ventajas económicas cuando se aplica a edificios de más de 8 plantas.

### **3.3.3.3 La protección de estructuras con perfiles tubulares frente a la corrosión.**

En muchas ocasiones se utiliza este argumento en contra de las estructuras de acero en general, pero son pocos los que alguna vez han realizado una valoración sobre qué es lo que puede suceder con su estructura, cuáles son los medios idóneos para combatir la corrosión en cada caso y cuál es la repercusión económica de cada método.

Centrándonos en lo que se refiere a la protección frente a la corrosión de estructuras de perfiles tubulares de acero, éstas no son una excepción; el método que elijamos para su protección nos condicionará el dimensionamiento de los perfiles y los detalles de las uniones, por ello debe ser seleccionado desde el principio y tenido en cuenta a lo largo de todo el proceso de diseño y fabricación de la estructura. Existen dos cuestiones que preocupan especialmente cuando se habla en concreto de los perfiles tubulares y de su protección frente a la corrosión. Una se refiere al comportamiento del interior de los perfiles, al cual no podemos penetrar para saber qué está sucediendo. La otra concierne a la galvanización en caliente, cuya exigencia de realizar perforaciones que garanticen el correcto llenado y drenaje del interior de la estructura puede afectar a la resistencia de las uniones.

El interior del tubo es una atmósfera inerte. El proceso de oxidación, como su propio nombre indica, requiere de oxígeno para comenzar, y para progresar debe consumirlo. Si aseguramos la estanqueidad del interior de los perfiles tubulares, aseguramos también que los fenómenos de corrosión quedarán limitados al consumo del oxígeno alojado inicialmente en el hueco del perfil. Es decir, donde no exista renovación de aire, la protección del perfil está asegurada por la propia estanqueidad. Después de consumida la pequeña cantidad de oxígeno del interior, la propia reacción química de la oxidación genera una atmósfera inerte que protege el acero, impidiendo que la corrosión progrese. Ésta quedará reducida al mínimo y no supondrá ningún perjuicio para la estructura.

Se puede concluir transcribiendo las siguientes líneas del informe de la Comisión F8 de la CECA, titulado “Manual de Durabilidad de Estructuras de Acero”, cuya sección 2.3 dice

lo siguiente: “Los perfiles huecos estructurales (circulares, cuadrados y rectangulares) son comúnmente empleados en la construcción. La protección de la superficie interior no es necesaria bajo la mayor parte de las circunstancias.

Tanto la teoría de la corrosión como la experiencia muestran que si el perfil está perfectamente sellado, la corrosión no se puede producir en las superficies interiores. A la intemperie, si los perfiles no están perfectamente sellados, es posible que la humedad penetre en el perfil. En estas condiciones, si no hay circulación de aire por el interior, no se producirá corrosión, salvo la posible aparición de una leve oxidación superficial. Más a tener en cuenta es la posibilidad de que, quedando el agua atrapada en el interior del perfil, se congele causando daños en el perfil. Para prevenir este peligro, es recomendable practicar un agujero en la parte más baja del perfil que permita el drenaje de éste. De nuevo, en estas condiciones, sin un flujo de renovación de aire por el interior, sólo aparecerán ligeras oxidaciones superficiales. Se debe comprobar periódicamente que los agujeros de drenaje no se hallan bloqueados.

Uno de los posibles métodos de protección que se debe tener en cuenta a la hora de comenzar un diseño de una estructura es el de la galvanización en caliente. Este método garantiza largos periodos sin necesidad de realizar ningún mantenimiento a la estructura, incluso bajo las condiciones ambientales más adversas: entornos marinos o plantas de proceso químico. Por otra parte, debido a requerimientos del propio proceso, siempre protege tanto la superficie externa como la superficie interna. Pese a que, como se ha visto anteriormente, en la mayor parte de las ocasiones no es necesario proteger la superficie interna del perfil, en algunas ocasiones el galvanizado en caliente puede ser la única solución viable de protección debido a la imposibilidad de sellar el interior de los tubos.

El diseñador debe conocer, por lo tanto, los principios básicos del proceso de galvanización para entender las consideraciones específicas que ha de tener en cuenta. El proceso consiste en una serie de baños: desengrasado, decapado, sales y galvanizado (zinc fundido a unos 450° C), tras los que se pasa a la terminación y la inspección. El resultado es un recubrimiento por aleación entre el hierro y el zinc (Fe-Zn) que va perdiendo hierro a medida que se aleja de la superficie inicial hasta convertirse en zinc puro. El espesor total de recubrimiento va desde las 50 a las 150 micras. En la práctica, para los espesores habituales de la construcción el espesor suele ser de unas 120 micras. Esto quiere decir que en ambientes poco agresivos (interiores secos) la vida teórica de una estructura galvanizada sería de 1.200 años; muy superior a la vida de cualquier estructura. Si, por el contrario, el ambiente es muy agresivo (exteriores húmedos salinos en entornos industriales) y el consumo anual de Zinc es mucho más elevado (hasta 8,4 micras/año), la protección tendría una duración teórica de unos 14 años.

### **3.4 Tipologías estructurales en acero usadas en edificaciones habitacionales.**

Se esboza ahora los diferentes tipos de estructuras usadas en las edificaciones habitacionales objeto de esta investigación, limitándose a las edificaciones de baja altura de hasta 12 pisos las cuales esencialmente se caracterizan por presentar un esqueleto conformado por vigas y columnas, dispuestas generalmente de manera ortogonal, las cuales conforman un conjunto tridimensional, estas características le confieren a la edificación un espaciamiento constante entre columnas al igual que en las alturas de los pisos.

El acero se convierte en una opción factible para este tipo de edificaciones, no solo por la posibilidad de prefabricar con anterioridad todos los elementos, si no por el ahorro económico y energético que nos provee este material, al igual que su velocidad de construcción, ya que conseguimos erigir la estructura en un corto periodo de tiempo, permitiendo a su vez la realización de otras actividades de obra sin contratiempo alguno. Además conformamos una estructura liviana, debido al poco peso de este material comparado con el concreto reforzado, con un alto grado de seguridad y de respuesta sísmica.

La función básica de la estructura es brindar el soporte y la estabilidad necesaria para que la edificación pueda ser habitable. Es por ello que sus elementos se enfrentan a una serie de fuerzas naturales y artificiales que afectan el comportamiento de la edificación. Los primeros elementos encargados de asumir estas fuerzas son las vigas y las columnas que además deben estar sujetas a un diseño previo en donde se especifican una serie de factores como son su espaciamiento y colocación.

Superando esta etapa, y al tener todos los elementos dispuestos según el diseño plateado, la estructura se ve sometida, y especialmente el esqueleto de acero, a generar la estabilidad necesaria que soporte el edificio ante fuerzas laterales como el viento, ante la misma fuerza de gravedad, y a movimientos irregulares en todas las direcciones generados por los sismos. Es por tanto que además de las vigas y columnas, debemos proveer a la estructura de un sistema adicional de rigidez para soportar dichas fuerzas.

La estabilidad lateral la puede proveer la misma estructura de acero por si misma con la interacción de otros sistemas, con el tipo de conexiones que diseñemos, o con el vínculo de otras partes de edificio construidas con materiales como concreto reforzado o mampostería estructural. Todos estos métodos deben estar definidos desde el diseño mismo, al igual que la localización la cual puede ser dentro del mismo edificio, en el perímetro e inclusive fuera de la edificación. Las siguientes son algunas de las tipologías estructurales usadas en edificaciones habitacionales de baja altura.

### 3.4.1 Sistemas estabilizadores.

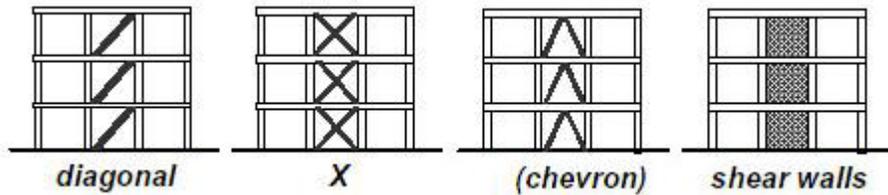


Fig. # 45. Sistemas de arriostramiento. Diagonal, X, K, Muros.

Existen muchos tipos de arriostramiento necesarios para brindar la estabilidad suficiente a todo el sistema estructural a las edificaciones de varios pisos, en donde generalmente se utilizan para el arriostramiento vertical sistemas de marcos apuntalados por elementos estructurales fáciles de identificar por su forma, siendo el más práctico el tipo en “X” (X-type) por su simplicidad. También existen otros que son modificaciones a este primer prototipo como el sistema de arriostramiento Chevron (Chevron Bracing), que tomó el nombre de su diseñador, en donde el sistema de apuntalamiento toma la forma de la letra “V”, lo cual facilita su identificación. Otros sistemas pueden ser el sistema de rodilla o (Knee Bracing) entre otros como son:

#### 3.4.1.1 Sistemas de Arriostramiento en acero de dos vías.

Es uno de los sistemas más eficientes en términos de rigidez, economía y velocidad de montaje, debido a que las conexiones viga columna son del tipo simplemente apoyadas o articuladas. Debido a esto la instalación de los elementos como columnas y vigas es muy sencilla y su erección es muy rápida, además la estructura es auto soportante y puede ser completada sin necesidad de otros equipos adicionales de soporte. Consiste en la instalación de los sistemas de arriostramiento tanto en el frente como en el posterior del sistema brindando de esta manera rigidez en todos los marcos exteriores de la edificación.

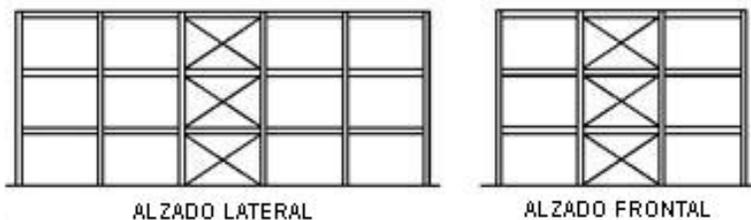


Fig. # 46.

Sistema de arriostramiento de dos vías de tipo X.

Lamentablemente, la presencia de los sistemas de arriostramiento en las superficies exteriores del edificio, puede interferir con el diseño de ventanas y vanos dispuestos por el diseñador de acuerdo a su criterio. Esta desventaja se ha visto minimizada si dejamos

la estructura completamente en el exterior como parte de un lenguaje arquitectónico estructural como un sistema autónomo, y retrocedemos el plano de cerramiento o fachada.

### 3.4.1.2 Sistemas de arriostamiento en acero de una vía.

A diferencia del sistema de dos vías, esta alternativa provee rigidez al sistema en el sentido transversal de la estructura, en donde todos los marcos ubicados en este eje, y no solo los del exterior son apuntalados. Este sistema genera más costos pero elimina la desventaja del sistema anterior al remover el sistema de apuntalamiento triangular, al menos en uno de los ejes de la edificación. Es ideal para largas estructuras, además por su continuidad disminuye la altura de las vigas principales y por consiguiente se disminuye la altura de los pisos.

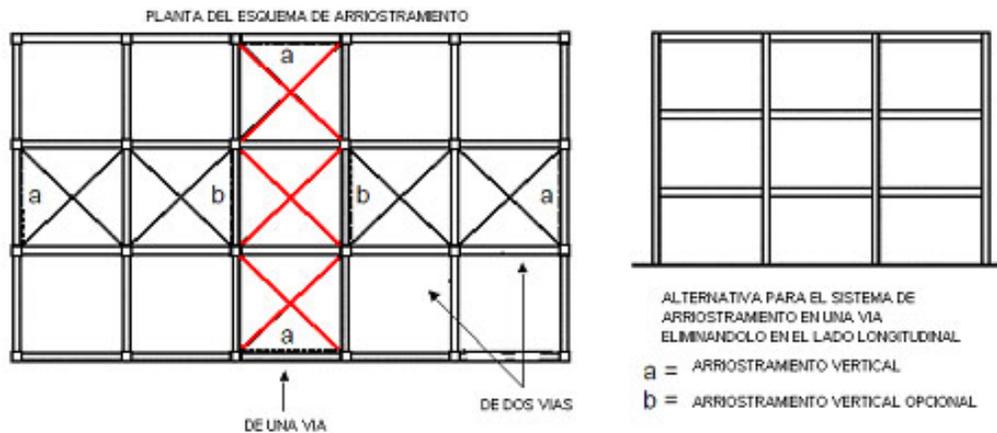


Fig. # 47. Sistema de arriostamiento de una vía de tipo X. Se elimina el arriostamiento en el sentido longitudinal, dejándolo en el transversal. (resaltado)

### 3.4.1.3 Núcleo central de servicios.

Si nos referimos a los métodos que aprovechan las componentes de una edificación para brindar estabilidad, encontramos que si disponemos de un núcleo central donde incorporemos todos los sistemas de la edificación, principalmente el de circulación con los puntos fijos y baterías de ascensores, podemos obtener buenos resultados al conectar directamente la estructura de acero a los muros que conforman este núcleo, construidos generalmente en concreto reforzado u otro material según sea especificado y calculado.

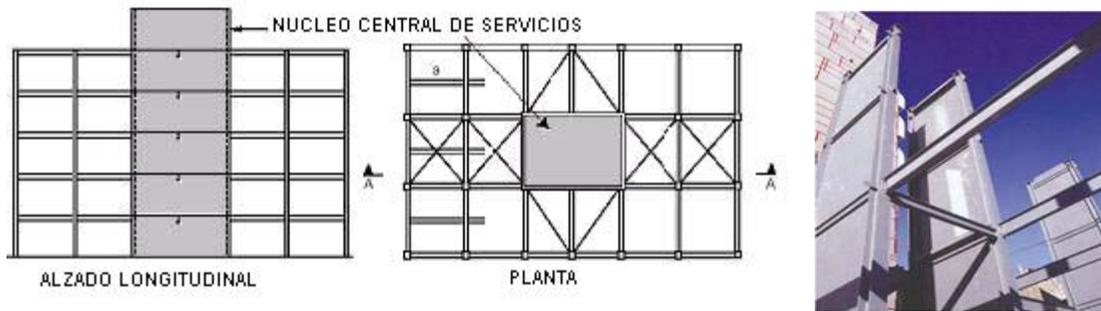


Fig. # 48. Sistema de arriostamiento mediante muros de cortante conformados por marcos de acero  
 Imagen tomada con fines académicos de: Steelplate Shearwalls Now Performing on the Main Stage.  
 Robert G. Driver.

El núcleo central es eficiente para edificaciones que no presente una gran longitud con respecto a su ancho, es decir que tiendan a ser cuadradas, permitiendo la centralidad en la ubicación de este, permitiendo de esta manera eliminar todos los apuntalamientos verticales, obteniendo un ahorro importante en el costo de la estructura. Además la rapidez de construcción también se ve favorecida al poder desarrollar ambas construcciones independientemente, sus conexiones son sencillas y fáciles de fabricar, basta con dejar anclajes embebidos en los muros de concreto para posteriormente soldar los platos que sirven de base para fijar finalmente las vigas a estos.

#### 3.4.1.4 Muros de estabilidad en acero.

Opcionalmente el núcleo central también puede estar constituido por muros de acero lo cual resulta ideal para zonas de alta actividad sísmica y para resistir fuerzas laterales producidas por el viento. Estos muros que básicamente asumen las fuerzas de cortante, están conformados por platos de acero, de una altura igual a la del piso, instalados verticalmente dentro de un marco de acero, el cual esta conectado a las vigas y columnas próximas. Una de sus principales ventajas además de su fácil y rápida instalación, consiste en la reducción de la cimentación necesaria para ellos, y que por su esbeltez no disminuye el área útil o de venta del proyecto.

#### 3.4.1.5 Torres de servicio externas.

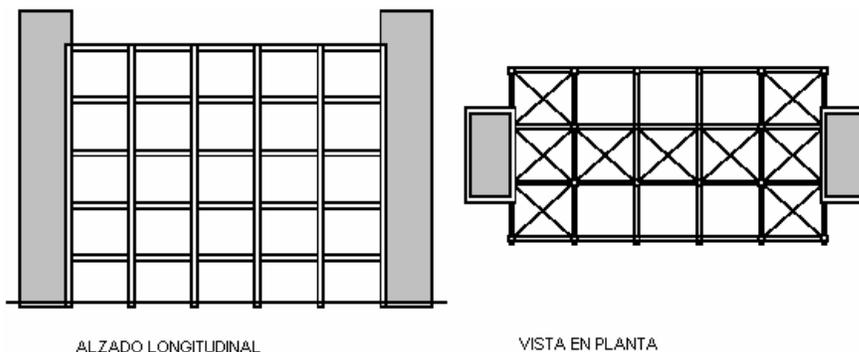


Fig. # 49. Sistema de arriostamiento mediante dos torres externas.

Si las dimensiones del edificio presentan una mayor longitud con respecto de su ancho, el uso de torres en los extremos de este, que al igual que el núcleo central, alberguen todos los servicios e instalaciones verticales, resultan muy convenientes si al igual se construyen con concreto reforzado con lo que se consigue una gran rigidez y estabilidad.

De la misma manera el uso de una sola torre externa de servicios brinda los mismos resultados para el mismo tipo de edificaciones; su ubicación debe ser en la mitad del lado de mayor longitud, y debe ser complementada con un apuntalamiento en acero en el lado opuesto a la torre. Resulta de esta manera una opción que conjuga todas las ventajas antes presentadas para edificaciones de mediana altura.

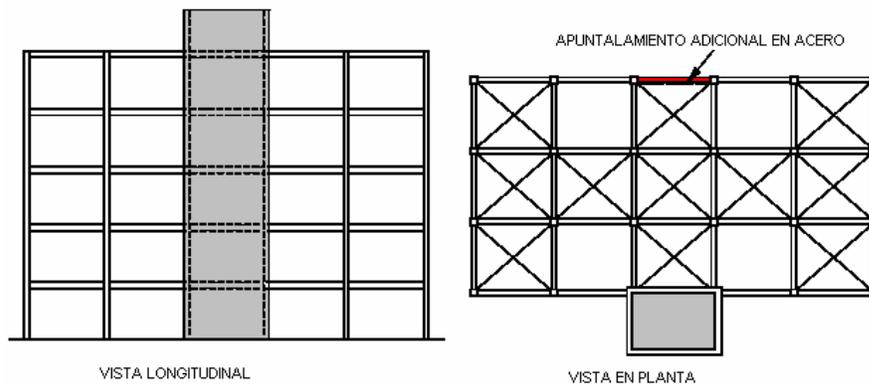


Fig. # 50.

Sistema de arriostamiento mediante una torres externa y sistema de apuntalamiento opuesto

### 3.5 Potencial verde del acero.

La idea de la construcción en acero sustentable es una meta que quieren conseguir las entidades y agentes vinculados con este tipo de edificaciones estructuradas mediante elementos de acero prefabricados. El instituto Americano de la construcción en acero (AISC) se ha vinculado a este propósito y en septiembre de 2003 publicó los resultados de una investigación realizada por Christopher Hewitt<sup>38</sup>, en la cual se echa un vistazo a cómo medir la sustentabilidad de un edificio con marco de acero, y las mejores maneras para maximizar el potencial verde del acero.

El termino sustentabilidad, es relativamente nuevo al igual que la preocupación mundial por la conservación y cuidado del medio ambiente; de donde precisamente surgió esta motivación que busca que “la construcción verde”, o un diseño ambiental favorable para la interacción hombre naturaleza, lo que podríamos llamar diseño sostenible.

Estas prácticas han alcanzado gran popularidad y se están extendiendo rápidamente, arquitectos y propietarios se están dando cuenta de los beneficios de mejorar las

38 the real deal: Sustainable Steel. Christopher Hewitt. AISC's Modern Steel Construction • September 2003

prácticas del diseño sostenible, involucrando nuestro entorno cercano en donde trabajamos y habitamos, el cual se vera reflejado no solo en nuestro beneficio físico si no en la preservación de todo el entorno que nos rodea.

Agencias estatales americanas como el “Green Building Council’s”, con su programa LEED™ (Leadership in Energy and Environmental Design) abocan y premian a los constructores con rebajas de impuestos y otros incentivos a quines apliquen principios de sustentabilidad en el emplazamiento, diseño y construcción de edificaciones. Estas medidas deberían ser aplicadas en nuestro contexto latinoamericano, consiguiendo de esta manera la adopción de prácticas de sustentabilidad como el uso de materiales de construcción con grandes cantidades de componentes reciclados, minimizar los desechos en la construcción y optimizar el uso eficiente del agua y la energía.

El acero se convierte en una opción favorable para el diseño verde, ya que uno de los principales métodos usados para analizar la eficiencia de los materiales se refiere a la cantidad total de energía necesaria para la producción, elaboración y transporte de cada producto incluyendo todos sus componentes y subproductos.

Este método conocido como LCA (life-cycle analysis), puede ser una potencial fuente de análisis en el futuro, y aunque todavía no hay disponibilidad de suficiente y acertada información acerca del consumo de energía, este debería ser implantado para ser utilizado como una herramienta precisa al comparar los materiales estructurales. Sin embargo un caso de estudio realizado en Francia por Ecobalance, buscó comparar la cantidad de energía utilizada en dos edificios similares, uno con estructura de acero y otro con estructura de concreto reforzado, obteniendo como resultado que al utilizar acero con aproximadamente un 87% de material reciclado, el sistema estructural utiliza menor cantidad de energía primaria que el concreto; en el caso que se utilice acero con menor cantidad de elementos reciclados resulta ser el concreto el sistema que utiliza menor cantidad de energía.

Este estudio arrojó como resultado una de las grandes ventajas de utilizar estructuras de acero para las edificaciones habitacionales, al ser este un material reciclable hasta en un 90% convirtiéndose en el producto más reciclado a nivel mundial, y según sea su método de producción podemos obtener un distinto porcentaje de material reciclable, tanto el método de arco eléctrico como el método de fundición con oxígeno, usan diferentes cantidades de material reciclable de acuerdo con el instituto de acero reciclado o Steel Recycling Institute (SRI)<sup>39</sup>.

La menor cantidad de energía primaria utilizada en la producción del acero al utilizar material reciclable significa que ahorramos la energía, entendida como el esfuerzo humano, técnico, mecánico y económico, necesarios para extraer la materia prima de su yacimiento, además contribuimos con el medio ambiente al aprovechar los desechos de acero que abundan en la cadena consumista de productos con este material, tal como vehículos de toda clase, electrodomésticos, maquinaria industrial e inclusive miembros

---

39 [www.recycle-steel.org](http://www.recycle-steel.org)

estructurales de edificaciones demolidas, aprovechándolos de nuevo en productos con propósitos diferentes.

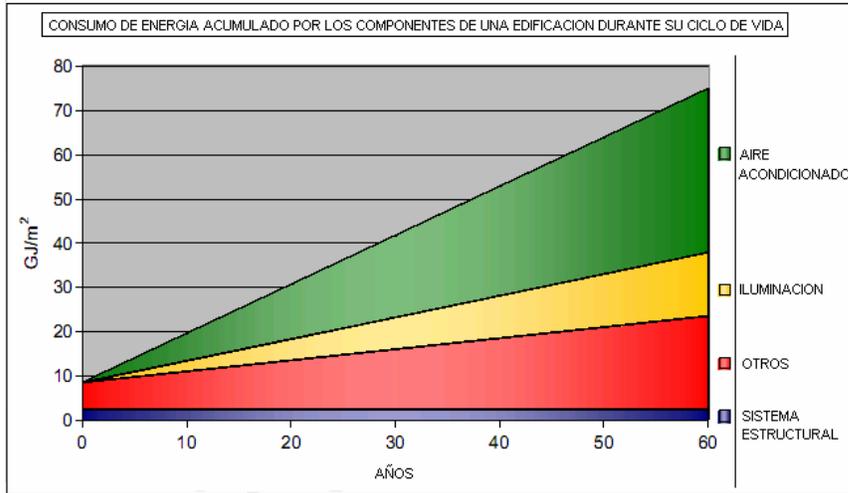


Fig. # 51. Consumo de energía del sistema estructural comparado con los demás componentes del edificio, el cual es mínimo y constante.

Imagen tomada con fines académicos de:

“A Comparative Life Cycle Assessment of Steel and Concrete Framed Office Buildings,”

Sin embargo el porcentaje de energía utilizado en el sistema estructural es mínimo comparado con otros sistemas involucrados en una edificación, que resultan mas convenientes para obtener realmente beneficios en la construcción ecológica y el diseño sustentable los cuales se consiguen con una eficiente implantación del proyecto, la piel o envolvente del edificio y la automatización de los servicios en la edificación. Un estudio realizado por el instituto de la construcción con acero<sup>40</sup> de Gran Bretaña (Great Britain's Steel Construction Institute) demostró que la cantidad de energía utilizada en el sistema estructural es apenas del 2% del total del consumo total de energía del edificio sobre una expectativa de vida útil de 60 años.

40 Chart redrawn from: K.J. Eaton and A. Amato, “A Comparative Life Cycle Assessment of Steel and Concrete Framed Office Buildings,” Journal of Constructional Steel Research, 1998, 46:1-3, Paper No. 163.

***ANÁLISIS DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN  
COLOMBIA Y PROCESOS ESTRUCTURALES EN ACERO***

#### **4.0 ANÁLISIS DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN COLOMBIA Y PROCESOS ESTRUCTURALES EN ACERO**

Aunque existen diferentes sistemas de construcción prefabricada en Colombia, a muchos de ellos su comportamiento estructural no les permite ser autoportantes para más de una planta, limitándolos en la mayoría de los casos a solucionar edificaciones unifamiliares, ya que se hace necesario en estos casos incorporar una estructura portante adicional, en concreto o en acero, haciendo que estos sistemas no sea competitivos técnica ni económicamente. La investigación de métodos y alternativas de construcción, diferentes a las conocidas tradicionalmente, debe impulsar el desarrollo de una nueva etapa en la construcción del país, permitiendo incorporar y adaptar nuevas tecnologías que mejoren la calidad de vida de los colombianos, a través de la solución del problema de vivienda.

Las edificaciones han adaptado sistemas y técnicas constructivas de configuración similar, en el caso Colombiano no se aplica aún la actualidad tecnológica que ha alcanzado la industria de la construcción con diversas técnicas constructivas con acero; nuestra propuesta busca encontrar un nuevo sistema optativo con este material debido a que el acero ha encontrado nuevamente el ambiente propicio y llenar la falta de conocimiento sobre los procesos que involucran la construcción con este material para ser tenido en cuenta al momento de tomar decisiones.

En el mundo existen patentados más de cien sistemas de industrialización en la construcción, unos quizá derivados de otros, de los cuales las empresas dedicadas a esta actividad en nuestro país han adoptado entre otros, el sistema “Outinord”, el sistema “Contech”, sistemas con paneles prefabricados, y la mampostería estructural entre otros utilizados en las edificaciones. Es importante para las empresas constructoras encontrar nuevas opciones que les permita construir a una velocidad superior para ofrecer menor precio, de aquí que tratemos de presentarles nuevas opciones industrializadas.

La construcción industrializada incide y beneficia los proyectos de construcción cambiando la naturaleza del diseño y construcción de estos, debido a que se logra mayor planificación, control y organización, e integración del diseño y construcción; obteniendo un incremento en la productividad gracias a la mayor eficiencia y eficacia en los procesos, la incorporación del factor humano con la asignación de mayor responsabilidad y capacitación. Todo esto con miras al mejoramiento continuo de la calidad de los procesos como parte de la visión gerencial de las empresas constructoras.

Una de las practicas de mayor optimización y que ha alcanzado alto grado de industrialización es la prefabricación, que tiene como principio la mecanización del

trabajo y la producción continua que obedezca a un determinado ritmo y contenga un alto grado de repetición. La prefabricación por lo general ligada al material, tiene una serie de aplicaciones en proyectos de edificación. La racionalización de sistemas se ha desarrollado aceleradamente para permitir el mejor aprovechamiento de los recursos involucrados en cada proceso. Así, la producción de elementos prefabricados en concreto y acero se ha desarrollado rápidamente.

Hoy se conoce y aprueba el concepto de vivienda como un fenómeno complejo que responde a las necesidades básicas del ser humano y su familia. Su estructura física ofrece abrigo, alojamiento, intimidad, seguridad, satisfacción y confort, y la asociación de algunas unidades dentro de un ámbito determinado, le da una dimensión social a la vivienda. Entonces, aparece una dualidad entre la calidad y el costo de la vivienda, ya que se trata de encontrar un punto de equilibrio que permita obtener dentro de unos costos mínimos, un nivel aceptable de calidad espacial y constructiva.

Observando la situación actual del mercado de vivienda y los altos costos de construcción, es importante plantear contribuciones a la solución del problema habitacional, creemos que para conseguir esto, debemos adelantar un proceso analítico que permita conocer las opciones constructivas, en nuestro caso para edificaciones, evaluarlas, y encontrar los puntos a favor y en contra de estos sistemas.

A continuación haremos referencia a sistemas estructurales de aplicación en Colombia, con lo que buscamos presentar una visión del contexto colombiano, haciendo evidente la escasa propuesta técnica para solucionar estructuralmente las edificaciones de hasta 12 pisos de altura, objeto de nuestra investigación.

#### **4.1 Sistemas estructurales de aplicación en Colombia.**

La Universidad de los Andes realizó un estudio acerca de los sistemas estructurales aplicados a la vivienda de interés social en Colombia, especialmente en la ciudad de Bogotá. El estudio realizado analiza las características principales de construcciones 'in situ' y de diferentes alternativas de prefabricación. Dentro del análisis, para cada uno de los sistemas estudiados se consideran los procedimientos constructivos, incluyendo la necesidad de mano de obra especializada, o no calificada, dada la importancia social de este aspecto; además, se presentan las características arquitectónicas, los materiales empleados y una aproximación al potencial de fabricación de vivienda en grande escala.

Los resultados tras un trabajo de investigación dirigido por el Ing. Diego Echeverri Campos. PhD fueron publicados por dicha entidad educativa, debido a su importancia para conocer la situación actual de la industria de la construcción en Colombia, se recopiló dicha información, y para posteriores indagaciones se anexa la dirección electrónica de la cual se obtuvo con fines académicos.

Para cada uno de los sistemas se presentan consideraciones de sus ventajas relativas y las limitaciones principales de la alternativa. Los sistemas analizados no son los únicos que existen en el contexto internacional, pero sí son los más importantes por una parte y además, son aquellos que cuentan con alguna experiencia local.

#### **4.1.1 Sistemas Prefabricados:**

Dentro de esta gran categoría encontramos en un primer gran bloque, los sistemas que involucran paneles de diversos materiales como son:

Paneles de asbestos “ETERNIT”, paneles de fibrocemento: “PLYCEM”, paneles de poliuretano: “METECNO”, paneles de poliuretano con fibrocemento: “SPEEDCO”, módulos de concreto sobre perfiles: “SERVIVIENDA”, y perfiles de P.V.C: “ROYALCO”.

Son sistemas nuevos que conforman muros estructurales, empleando láminas y cintas, perfilería metálica, anclajes, pegantes y selladores. No son aptos para tres o más pisos, ya que se requiere de una estructura de perfiles metálicos adicional. Estos sistemas permite la construcción rápida de viviendas muy livianas sobre cimentaciones conformadas por una subbase de recebo, una capa de suelo cemento y una losa de concreto reforzado.

El poco peso y la mayor parte de la obra es en seco, que le confieren ventajas. La calidad de los componentes corresponde a las de fábrica, lo cual asegura un buen producto. El sistema permite el empleo de diferentes tipos de acabado y logra una aproximación arquitectónica que parece satisfactoria con procesos constructivos simples.

Muchos de estos sistemas tienen en común que están conformados por elementos modulares, con medidas estándar, en el caso del Plycem son paneles de fibro cemento, y emplea láminas, perfiles y elementos de fijación. El Plycem 1000 emplea únicamente láminas mientras que el Plycem 2000 empleas láminas separadas por perfiles metálicos. Otros utilizan paneles de poliuretano expandido y lámina metálica. Son paneles tipo sándwich (poliuretano expandido dentro de lámina metálica), perfilería en aluminio, y cubierta también con paneles tipo sándwich.

La estructura de estos sistemas está compuesta por perfiles metálicos anclados con pernos de expansión a la losa en concreto que sirve de cimentación. La edificación obtenida tiene un adecuado aislamiento térmico y acústico y es resistente a efectos climáticos y bióticos. Estos sistemas no permiten construcciones de más de dos pisos sin recurrir a una estructura metálica que tiene incidencias en su costo, además no hay referencias sobre estas posibilidades.



Fig. # 53. Perfiles De P.V.C :  
"ROYALCO"  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Sistemas Estructurales Aplicados A La  
V.I.S.

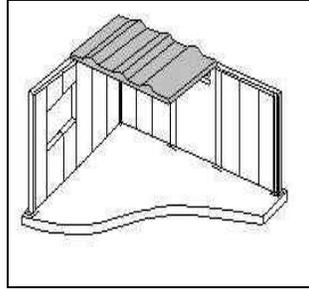


Fig. # 54. Paneles De  
Poliuretano: METECNO  
Imagen tomada con fines  
académicos de:  
Sistemas Estructurales  
Aplicados A La V.I.S.



Fig. # 55. Paneles De Poliuretano Con  
Malla Electrosoldada: 3D PANEL.  
Imagen tomada con fines académicos  
de:  
Sistemas Estructurales Aplicados A La  
V.I.S.

Otros requieren de ser terminados en el sitio de obra ya que emplean paneles y concreto. Se trata de los conocido "3d panel", que consiste en una armadura tridimensional de concreto y malla electro soldada de acero con un núcleo aislante de poliestireno. El panel EVG 3D con técnica austriaca se coloca en su posición final y se le aplica concreto por ambos lados, así se conforman viviendas que permiten buenas opciones arquitectónicas a partir de los muros de carga suministrados por los paneles.

Igualmente de los sistemas que usan concreto para su terminado, encontramos los perfiles de PVC rígido, piezas de anclaje, vigas de cumbrera y entepiso, concreto y barras de refuerzo. Maneja muros de carga con perfiles de PVC rígido que ensamblados permiten obtener las paredes que se llenan con concreto fluido; se obtiene así una construcción muy resistente.

En un segundo bloque encontramos 2 sistemas que si pueden ser utilizados en edificaciones habitacionales, se tratan de sistemas prefabricados que utilizan paneles de concreto, y otro reciente y novedoso, que utiliza Paneles De Tabique: "LOSAS LTDA".



Fig. # 56. Paneles De Concreto  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Sistemas Estructurales Aplicados A La  
V.I.S.



Fig. # 57. Paneles De Tabique: "LOSAS LTDA"  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Sistemas Estructurales Aplicados A La V.I.S.

El primero está basado en el empleo de grandes paneles prefabricados de concreto reforzado, colocados en la obra con soportes temporales que se van retirando a medida

que la construcción va adquiriendo su forma. La cimentación consiste en vigas sobre las cuales se instalan los paneles verticales del primer piso, la flexibilidad arquitectónica está limitada una vez que la mayoría de sus muros son estructurales, y no pueden modificarse, sin embargo permite una variedad de diseños que se adecuan a la normativa sísmo resistente vigente.

Este sistema en concreto permite la construcción de edificaciones de varios pisos. La unión de los paneles tiende a marcar juntas debido a los efectos producidos por los cambios de temperatura. Este factor, que no tiene trascendencia desde el punto de vista de la seguridad de la edificación, ha preocupado a algunos usuarios.

El segundo sistema ha sido desarrollado por la ladrillera Santa Fe de Bogotá desde 1998 a partir de elementos prefabricados de mampostería de arcilla, formando paneles en ladrillo que se montan en la obra sobre vigas de cimentación y placas del entrepiso, conformando estructuras similares a las de mampostería reforzada lo cual le permite contar con una certificación frente a los requisitos de la normativa sismorresistente actual NSR-98.

Es una alternativa atractiva puesto que su principal insumo es el ladrillo que permite una buena acogida por el usuario. Como material están comprobadas sus bondades frente a los agentes naturales y su aceptación por parte del público, que encuentra en él un buen comportamiento acústico y térmico. Genera relativamente poco desperdicio y cumple especificaciones sismorresistentes.

#### 4.1.2 Sistemas prefabricados en concreto fundidos en el Sitio.

Encontramos que estas técnicas si han tenido mucha aceptación dentro de las grandes constructoras que tienen el poder económico para acceder a estas costosas alternativas, y por la gran experiencia adquirida con el manejo del concreto en el país. Se trata de 2 sistemas el OUTINORD proceso industrializado francés que emplea una técnica tipo túnel, y sistema CONT-TECH desarrollado en Estados Unidos de amplio uso en el contexto internacional; que utilizan formaleta, concreto y acero de refuerzo.



Fig. # 58. Métodos Prefabricados. "OUTINORD"  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Sistemas Estructurales Aplicados A La V.I.S.

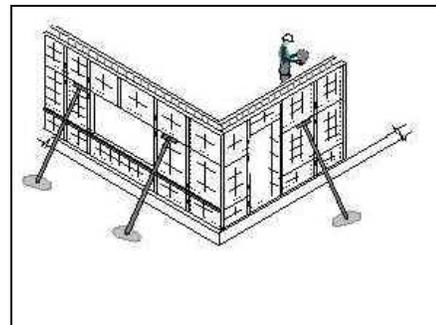


Fig. # 59. Métodos Prefabricados. CONT-TECH  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Sistemas Estructurales Aplicados A La V.I.S.

El primero permite por medio de formaletas fundir losas y muros de concreto simultáneamente en el sitio de obra, el segundo funden muros de concreto ‘in situ’ empleando formaletas de aluminio que permiten obtener un buen terminado con un notable rendimiento de construcción puesto que las instalaciones y el refuerzo resultan de fácil colocación en la obra pero no incluye los entrepisos.

El empleo de estas formaletas metálicas permite una rotación diaria de ellas, lo cual le confiere una apreciable velocidad de ejecución con muy poco desperdicio de materiales. Estos sistemas tiene el inconveniente del alto costo de las formaletas lo cual limita las posibilidades de adquisición para contratistas menores, al tiempo que elimina posibilidades de autoconstrucción. Como en otros sistemas en los cuales los muros conforman la estructura, la edificación terminada no permite modificaciones futuras de la construcción, ni ofrece flexibilidad arquitectónica por el proceso mismo de construcción.

Las formaletas permiten un buen acabado y el ensamble monolítico de muros y losas de entepiso, le confieren un buen comportamiento frente a la acción de sismos intensos, aunque esta unión monolítica genera algunos agrietamientos típicos molestos a la vista. Las fachadas se pueden construir sin limitaciones arquitectónicas y el aislamiento acústico y térmico resulta aceptable, similar al de otros sistemas como los de mampostería o prefabricación en grandes paneles de concreto reforzado.

#### **4.1.3 Sistemas híbridos.**

Son procedimientos de construcción híbridos que conjugan componentes artesanales con sistemas prefabricados ‘in situ’. Se trata tal vez de los únicos sistemas que involucran y que han tenido en cuenta dentro de este contexto la aplicación de nuevas técnicas de construcción metálica en las soluciones de vivienda, a excepción del sistema tradicional en acero de pies de amigo y vigas en perfiles de acero. Se caracterizan por ser estructuras livianas que aunque están enfocadas a resolver viviendas unifamiliares, son un claro ejemplo de la innovación que permite el uso del acero. Se trata de dos sistemas desarrollados por empresas locales, denominados “CORPOCASA” y “Casa Kit”.

Conforman un procedimiento constructivo industrializado porque sus componentes se producen en planta por una empresa fabricante, e híbridos por que involucran técnicas tradicionales como la del concreto reforzado para las losas, y mampostería para sus muros divisorios. Emplea perlines estructurales, placa en concreto con lámina colaborante o “steel deck”, cubierta metálica y cerramiento en ladrillo o en paneles. Las construcciones se conforman con columnas y vigas en láminas metálicas y placas de concreto reforzadas con lámina metálica. La edificación finaliza con una cubierta metálica. Columnas y vigas van sujetos mediante pernos en soportes que vienen de fábrica.



Fig. # 60. Métodos Híbridos. Corpacasa.  
Imagen tomada con fines académicos de: Manual Corpacero.

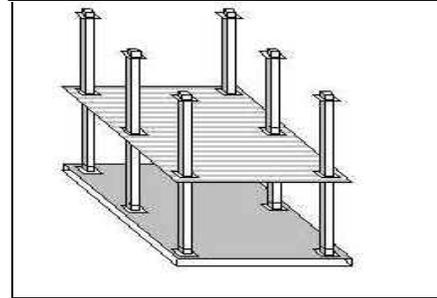


Fig. # 61. Métodos Híbridos. Casa Kit.  
Imagen tomada con fines académicos de: Sistemas Estructurales Aplicados A La V.I.S.

Dentro de esta categoría encontramos entonces clasificados los ejemplos de los que hemos hecho referencia anteriormente y que ejemplarizan el uso de estructuras de acero en edificaciones habitacionales, con ejemplos de hasta 18 pisos de altura y que serán analizadas y comparadas con las estructuras tradicionales de concreto reforzado distinguiendo sus cualidades.

#### 4.1.4 Sistemas artesanales.

Dentro de esta clasificación encontramos la mampostería estructural subdividida en Mampostería reforzada, Mampostería Confinada; y los tradicionales pórticos o marcos de concreto reforzado. Sobre ellos existe amplia experiencia constructiva en Colombia, cuenta con un excelente soporte experimental y analítico y un buen resultado observado en el comportamiento frente a los sismos de Popayán en 1983 y el Eje Cafetero en 1999. Estas técnicas por su característica artesanal tienen amplia difusión y aceptación que las hacen asequibles a todas las empresas.

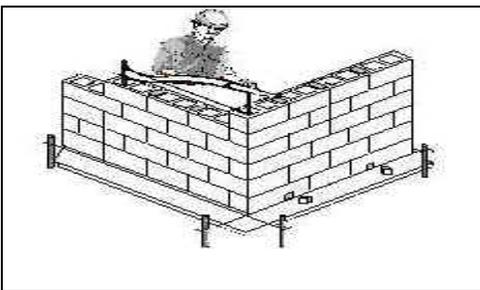


Fig. # 62. Métodos Artesanales  
Mampostería Reforzada  
Imagen tomada con fines académicos de: Sistemas Estructurales Aplicados A La V.I.S.

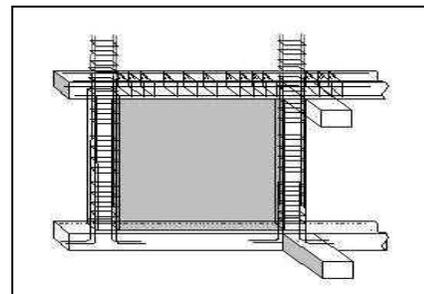


Fig. # 63. Mampostería Confinada  
Imagen tomada con fines académicos de: Sistemas Estructurales Aplicados A La V.I.S.

Los sistemas de mampostería buscan absorber y transmitir todas las cargas de la edificación a muros de carga, construidos con ladrillos huecos o macizos, pegados con mortero de cemento, y reforzados con barras de acero y mortero de inyección dentro de la

celdas verticales hábilmente formadas al instalar cada ladrillo o tabique; o amarrados con las vigas y columnas de concreto reforzado fundidas en el perímetro de estos.

Se considera que la mampostería estructural apta para construcciones en altura hasta unos seis pisos. La mayor parte de la construcción es estructural, por lo que no es flexible para hacer modificaciones una vez habitada puesto que la mayoría de los muros son estructurales que conforma un sistema seguro, con buen aislamiento relativo desde el punto de vista térmico y acústico.

Sistema de pórticos en concreto reforzado: Los pórticos tradicionales de concreto reforzado, con columnas y vigas, es un sistema sobre el cual existe amplia experiencia constructiva en Colombia y cuenta con un buen soporte experimental y analítico. A continuación describiremos las propiedades que este material ofrece para solucionar las edificaciones habitacionales comparados la técnica del acero estructural optativa que planteamos con esta investigación.

## **4.2 Estructuras de acero y sus procesos constructivos: diseño fabricación y montaje.**

La supervisión de los procesos constructivos involucrados con las estructuras de acero, exigen el estricto conocimiento de todas las actividades a desarrollar, y nos brindan un panorama general acerca de sus minuciosas especificaciones, de su control y correcta ejecución. Con este compendio de actividades y procesos buscamos llenar la falta de información acerca de esta técnica, para orientar y dar recomendaciones sobre los criterios para construir con este material.

Realizamos una interpretación de las normas que recopiladas a manera de resumen de los criterios y normatividades investigados sobre el tema de Supervisión de Estructuras de Acero; especialmente del sistema reglamentario argentino para las obras civiles “SIREA”<sup>41</sup>, reglamento CIRSOC 301<sup>42</sup>, y la norma sismorresistente vigente en Colombia “Ley 400 de 1997 y del Decreto 33 de 1998 NSR-98”<sup>43</sup>, para su referencia legal sería indispensable dirigirse directamente a estas fuentes.

Buscamos entonces establecer los principios fundamentales para llevar a cabo y supervisar los trabajos de la construcción metálica para edificios, así como para su protección y conservación y obtener la capacidad suficiente para controlar todas las actividades pertinentes a la construcción con estructuras de acero, y garantizar su correcta ejecución en taller y en obra.

---

41 SIREA - Sistema Reglamentario Argentino para las Obras Civiles. Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de acero para edificios. Argentina JULIO 1982 APROBADO POR RESOLUCIONES DEL MO y SP N° 977/83 y 621/84.

42 REGLAMENTO CIRSOC 301. Argentina JULIO 1982.

43 Norma Sismo-Resistente Colombiana. Ley 400 de 1997 y del Decreto 33 de 1998. REFERENCIA NSR-98. Colombia 1998. <http://www.asocreto.org.co/index.php3>

## **4.2.1 Servicios administrativos previos a la ejecución de la obra.**

### **4.2.1.1 Asignación profesionales encargados dirección e inspección de obra.**

El propietario debe designar un profesional, habilitado por la ley para construir estructuras, como director o supervisor de obra. Este será su representante técnico ante el proyectista estructural, la empresa constructora y demás autoridades. La designación debe ser comunicada a la autoridad fiscalizadora y a quienes concurran a la construcción.

El supervisor debe analizar el currículo y el organigrama de los profesionales asignados al proyecto estructural, puesto que el proyecto, cálculo y dirección de los trabajos de construcción deben ser confiados a profesionales y, la fabricación y montaje a empresas con técnicos y operarios calificados que garanticen la correcta ejecución de la obra, sin importar la manera de contratación, debe presentar al propietario su criterio acerca de la experiencia y buen desempeño de todos ellos. Al mismo tiempo debe solicitar la documentación necesaria para la correcta ejecución de la estructura, tales como planos del proyecto arquitectónico, estudio de mecánica de suelos, licencia de construcción, especificaciones, y otros.

Para poder comenzar los trabajos de construcción, deberá existir en taller y en obra, a disposición de los responsables y de la autoridad, un expediente conteniendo la información necesaria con el objeto de que se implemente su revisión y complementación. En esta etapa se crea el proyecto ejecutivo con participación en juntas de proyecto con consultores y propietarios, se reciben los planos y especificaciones de construcción, es decir la documentación inicial de obra, que deberá estar integrado por los documentos firmados por el Propietario y el o los profesionales responsables según lo acordado.

Es función del Propietario designar él o los profesionales que se harán cargo del proyecto y de la construcción, así como los profesionales que ejecutarán la supervisión de la obra, los cuales pueden brindar juicios acerca de la competitividad de los demás profesionales. Su designación queda confirmada con la firma por parte del propietario y de los profesionales en la documentación técnica.

Los profesionales asumen la responsabilidad en las siguientes áreas

- a) Proyecto estructural.
- b) Dirección de Obra.
- c) Construcción de la estructura.
- d) Asesoramiento especializado.

#### **4.2.2 Etapa Preliminar.**

El supervisor debe realizar las juntas y reuniones necesarias para definir todo el trabajo con proyectistas y consultores, para establecer los objetivos y requerimientos de los diversos sistemas estructurales aplicables al proyecto y evaluar su factibilidad, con una cuantificación aproximada de las alternativas factibles.

Al evaluar las alternativas estructurales, debe dar participación en la formulación de la investigación del suelo y de la cimentación, recabando datos necesarios y recomendaciones de los ingenieros de suelo. Con esta información debe preparar un diseño estructural preliminar, para definir las necesidades de espacio de los elementos estructurales y de las instalaciones, representando esta información mediante un bosquejo de criterios de diseño y de especificaciones, acordar los materiales y métodos de construcción.

En esta etapa de anteproyecto, se expedirá la documentación para la tramitación de los permisos, y para la ejecución de las obras, se deberá prestar atención y revisar los planos arquitectónicos, estructurales y de detalle de la estructura, así como otros documentos de obra que definan diseños, sistemas y materiales a utilizarse, como:

Revisión de la memoria de cálculo y datos de diseño. Verificación de pendientes, de requerirse complementaciones o modificaciones, se solicitarán las mismas al calculista estructural. Elaboración de dibujos de taller, para corte y organización del trabajo. Determinación de los espacios necesarios para la ejecución del trabajo. Determinación y organización del trabajo a ejecutarse en taller y en obra. Replanteo y trazos requeridos del sitio a ubicar la estructura. Verificación de medidas en obra.

##### **4.2.2.1 Requerimientos previos para definición de la estructura de acero.**

Es importante iniciar la gestión de registros, licencias y permisos, verificar y coordinar la obtención de recursos, equipos y materiales para poder dar recomendaciones acerca de la solución definitiva del sistema estructural en acero a aplicar, se debe haber alcanzado una total definición y revisión de los planos arquitectónicos, en etapas anteriores se habían recopilado los anteproyectos para poder estimar las alternativas estructurales posibles. Para poder avanzar y realizar planos estructurales y de detalle de la estructura, es necesario como ya dijimos haber definido la parte arquitectónica así como otros documentos de obra que definan diseños, sistemas y materiales a utilizarse.

Requisitos dimensionales: se requerirá que se disponga de un sitio adecuado para el almacenamiento y trabajos en obra.

Verificación de la fundición y condiciones óptimas de las bases, o cimentaciones que soporten la estructura.

Culminación de elementos de apoyo de la estructura como: muros, losas, vigas y similares.

Verificación de la existencia de instalaciones eléctricas requeridas.

Ubicación de sistemas de andamios, entarimados y otros que se requieran par el alzado y armado de la estructura.

Se efectúa también una cubicación del proyecto, en donde exhaustivamente se desglosen todas las cantidades de obra y materiales para verificar que exista correspondencia entre los volúmenes de las actividades a realizar. Teniendo esto se comparará contra los volúmenes del presupuesto de obra y de existir diferencias significativas se turnarán por para su conocimiento, proponiendo la solución correspondiente.

#### **4.2.3 Análisis estructural.**

El supervisor debe proporcionar al profesional responsable de esta área, la misma información recopilada en las especificaciones de diseño, coordinar que esta sea actualizada según la última junta que las aprobó para que se inicie la etapa de cálculo y análisis estructural.

Las cuestiones jurídicas comerciales y los estudios económicos forman parte de la labor que deben realizar en esta etapa y comprenden el estudio del costo de las obras, cálculo del volumen de obra, redacción del pliego de condiciones, de los contratos de ejecución de las obras, para posterior abrir el concurso y adjudicación de las obras.

Se propondrá un inventario de conceptos con base en la revisión previa al proyecto y sus especificaciones, verificando que todas las actividades de obra estén incluidas y que su descripción sea completa y precisa. Cotejando a su vez los precios y volúmenes del presupuesto con los presentados considerando las bases de medición efectuadas anteriormente.

Elaboración del programa de obra: Se integrara la información revisada con todos los procesos de obra para elaborar la programación de los mismos, verificando que este programa de obra cumpla con plazos y recursos aplicados en forma óptima, ya que es este programa maestro es el que regirá las etapas y todos los proceso en los tiempos establecidos mediante diagramas de ruta crítica. Se efectuara el seguimiento administrativo comparándolo con las guías mecánicas del proyecto ejecutivo y guías de dotación, reportando faltantes o incongruencias.

El resultado de esta etapa debe ser la formulación de la memoria de cálculo y datos de diseño estructural con sus elementos de acero, donde se especifique y verifique todos los aspectos que inciden en el uso y comportamiento de la estructura a ejecutar.

#### **4.2.3.1 Documentos Técnicos.**

Para poder comenzar los trabajos de construcción, deberá existir en taller o en obra, a disposición de todos los profesionales toda la información contenida en la documentación inicial de obra, la cual ha sido autorizada por propietario y el supervisor. De acuerdo a este requerimiento, se debe contar con la aprobación por parte del propietario de la etapa preliminar y autorización para continuar el diseño.

#### **4.2.4 Etapa De Diseño.**

Esta etapa se inicia con la aprobación por parte de la gerencia establecida o por el propietario de la etapa preliminar y autorización para continuar el diseño, los proyectistas deben planear y coordinar la estructura en el proyecto total, plantearan su recomendación para la cimentación de acuerdo al estudio de suelos.

El supervisor debe realizar las juntas y reuniones necesarias con proyectistas y consultores para planear y coordinar la estructura en el proyecto total, incluyendo las recomendaciones del estudio de suelos acerca del tipo de cimentación definitivo a ser utilizado.

Como resultado de esta etapa, se debe preparar los cálculos estructurales incluyendo: solicitudes para el diseño, dimensionamiento de los elementos, preparación de los detalles de diseño, producir los planos estructurales computarizados, suficientemente detallados para construcción y, proporcionar copias del proyecto total para su revisión.

#### **4.2.4.1 Planos de diseño y planos de taller.**

Se deben elaborar los planos de diseño estructural y los planos de taller, los cuales además de tener una perfecta coordinación y correlación de información, deben presentar en forma clara y detallada por medio de dibujos la siguiente información:

- a) Dimensiones para la construcción de los elementos y para la verificación de los cálculos del conjunto y de las partes integrantes.
- b) El tipo de acero a emplear y sus características mecánicas, químicas y tecnológicas.
- c) Detalle de los medios de unión para su construcción y la verificación de los cálculos.
- d) Dimensiones y tipo de acero de los remaches y tornillos a emplear en la construcción.
- e) Las estructuras soldadas deberán presentar la documentación que establece el reglamento correspondiente.
- f) Detalles de otros elementos constructivos (losas de entrepiso, placas de techo, tabiques, etc.) que se tomen en cuenta en la resistencia de la estructura.
- g) Detalles, dimensiones y materiales de bases y apoyos de la estructura.
- h) Planos aclaratorios del montaje de la estructura.

- i) Planos de andamios y apuntalamientos que requieran cálculos estructurales.
- j) Toda información complementaria que el o los profesionales responsables estimen conveniente para facilitar la interpretación o resguardar su responsabilidad.

#### **4.2.4.2 Memoria de cálculo y memoria técnica.**

La memoria técnica debe incluir todas las especificaciones estructurales, proporcionar datos para la obtención de licencias, establecer las pruebas que habrán de hacerse a los materiales y, obtención de las cantidades aproximadas de obra.

La memoria de cálculo debe presentar en forma clara los cálculos empleados en el dimensionamiento y la verificación de la estabilidad de la estructura de acero y sus componentes con indicación de:

- a) Detalle de las acciones consideradas y su superposición.
- b) Métodos de cálculo empleados.
- c) Destino de la obra.
- d) Recaudos constructivos que deberán ser guardados durante la construcción.
- e) Coeficiente de seguridad empleado.
- g) Tipos de acero a emplear en la construcción de los elementos resistentes y en los medios de unión con copia del certificado de fábrica.
- h) Detalles del dimensionamiento y verificación de la estabilidad de la estructura, andamios y elementos constructivos, bases y apoyos.
- i) Detalles del procedimiento de montaje incluyendo apuntalamientos temporarios, ajustes, condiciones intermedias de la estructura, condiciones de traslado de elementos estructurales, etc.
- j) Información sobre los métodos no destructivos de control que deberán ser efectuados en la construcción.
- l) Toda información que el Profesional Certificante estime conveniente para facilitar la verificación de los cálculos y para resguardar su responsabilidad en el proyecto.

#### **4.2.4.3 Documentación técnica final.**

La documentación técnica final es el compendio de toda la información técnica que indica como está proyectada y construida la estructura. Constituye la certificación de la seguridad estructural durante la vida útil mientras se conserven las condiciones consideradas en el proyecto y el antecedente cierto para todo asunto técnico de litigio, para proyectar modificaciones, ampliaciones o refuerzos y para analizar las condiciones de seguridad ante cualquier cambio que altere las condiciones del proyecto original.

La documentación técnica final deber contener:

- a) Planos definitivos.
- b) Memoria de cálculo.

- c) Informe de las características de suelos y aguas.
- d) Informe de las características técnicas adicionales.
- e) Memoria descriptiva de la construcción de la estructura, de las modificaciones introducidas y de la protección contra la corrosión y el fuego.
- f) Toda información que el Profesional Certificante estime conveniente para facilitar la interpretación o para resguardar su responsabilidad.

La autenticidad de esta documentación será dada por cierta cuando contenga la firma de los profesionales responsables que hayan intervenido en su confección. Su destino será radicado ante la autoridad fiscalizadora para ser incorporado al expediente de antecedentes de la obra, otro ejemplar será conservado por el propietario y el tercero quedar en poder del profesional certificador.

#### **4.2.4.4 Proyecto Estructural.**

Un profesional, habilitado a este efecto por la ley, firmará la documentación convirtiéndose bajo el nombre de proyectista estructural, en responsable del proyecto, cálculo y de la elección de los aceros y demás materiales a emplear en la construcción, así como su firma significa dar fe a la aplicación del reglamento. Los aceros serán garantidos por sus fabricantes.

Los registros que se llevarán en taller u obra, según la etapa de la construcción, serán accesibles al director de obra y deberán contener la fecha de iniciación y terminación de etapas de trabajo en taller y las observaciones que el representante técnico estime pertinentes; fecha de iniciación y terminación de los trabajos de montaje en obra, copias de los certificados de fábrica o de los informes de laboratorio de los aceros empleados, laboratorios que hayan intervenido con asesoramientos o controles en la obra y, toda información que el supervisor técnico estime conveniente para facilitar la interpretación o resguardar su responsabilidad.

#### **4.2.5 Concursos y contrataciones.**

La contratación de la ejecución de obras, el suministro y el montaje del esqueleto metálico son las labores propias de la empresa de construcciones metálicas, encargadas en general de todo el esqueleto metálico, forjados, escaleras, protección contra el fuego.

De acuerdo con la modalidad de contratación, sea esta directa o por concurso, se requiere haber culminado la documentación técnica final, donde debe estar contenida toda las especificaciones de la estructura, terminados y recubrimientos, ya que debe estar disponible como documentación del concurso y/o contrato de acuerdo a la carta de invitación o obtención de las mismas según sea una licitación.

Los contratistas deben preparar la documentación propia de sus empresas, seguir los requisitos detallados en las bases del mismo, elaborando las solicitudes según los Formatos de Concurso para la propuesta Técnica y Económica y, entregarla en el tiempo y forma solicitada.

#### **4.2.5.1 Visita e inspección del sitio de los trabajos.**

Es recomendable en esta etapa que los contratistas realicen una visita e inspección del sitio de los trabajos, y realicen una verificación de trazos topográficos y establecimiento de puntos de referencia y bancos de nivel, efectuar una revisión de planos de taller que son parte de las bases del concurso y/o contrato. En caso de encontrar alguna anomalía o carencia de información o especificaciones, debe expedir un reporte al supervisor o propietario para esclarecer estas deficiencias; si no existe alguna, también es recomendable que el contratista elabore o adapte los planos de taller de acuerdo al manual de procedimientos de su empresa.

El supervisor debe entonces verificar el cumplimiento de las bases del contrato, que se halla respetado la programación y la planeación general de la obra por medio del método de la ruta crítica (CPM) y diagrama de barras.

La propuesta técnica y económica debe contener la cuantificación final de las cantidades de Obra, el análisis de precios básicos y precios unitarios, especificando materiales, mano de Obra y equipos, con lo cual se presenta un presupuesto integral base, con un programa de compras, lo cual permite realizar un programa de ingresos y egresos. Esta propuesta será evaluada por el propietario y la gerencia, para expedir el fallo del concurso y/o contrato; con la firma del mismo se le da legitimidad y se procede a la contratación de personal obrero, proveedores, laboratorio de control de calidad y profesionales.

#### **4.2.5.2 Formas de contratación de las obras.**

Contratación por cantidades de obra: Los trabajos a realizar se diseñan y describen de tal modo que el contratista pueda hacerse cargo de todas las circunstancias que influyen en su costo. Los procesos se descomponen y especifican en partidas, describiéndolos en forma suficientemente detallada para que pueda conocerse claramente lo que se debe ejecutar en cada una de ellos. La responsabilidad de las mediciones es del que encarga la obra. El valor de la obra ejecutada se determina por partidas. Los precios alzados sólo son posibles cuando el contratista ha tenido la posibilidad de comprobar los volúmenes de obra que se contratan.

Contratación por elementos constructivos: este sistema de contratación se lleva a cabo cuando se hace y se admite que el contratista proponga variantes con proyecto propio, como ocurre por ejemplo cuando éste tenga procedimientos o sistemas de construcción propios o especiales. En este caso, fundamentalmente, no tiene ninguna importancia que la descripción de los trabajos se haga someramente o sean partidas sin indicación de

cantidades de obra, pues debido a que el contratista se hace responsable de la determinación de dichas cantidades generalmente se calcula a base de precios alzados. El detalle de partidas con precios unitarios sólo sirve para las eventuales modificaciones posteriores de los trabajos a realizar.

Contratación de obras por descripción del objeto a que estén destinadas: Este tipo de contratación es apropiado especialmente para obras a ejecutar por sistemas especiales donde el contratista puede así adaptar el proyecto a las posibilidades técnicas de su sistema, de modo que se obtenga una solución óptima. La base de la contratación es un precio alzado. En este caso la obra a construir se describe indicando con precisión el número, tamaño, uso y equipamiento de todos sus locales, así como todas las demás condiciones requeridas. La oferta puede incluir en ciertos casos la redacción del proyecto.

#### **4.2.6 Fabricación de estructuras de acero.**

El objetivo es el disponer de una estructura metálica elaborada en perfiles estructurales, y que consistirá en la provisión, fabricación y montaje de dicha estructura, según planos y especificaciones del proyecto y por indicaciones de fiscalización.

Es fundamental que la confección de los elementos estructurales, barras, medios de unión, apoyos, etc; se realicen respetando estrictamente lo dispuesto en los planos de taller o montaje. Las modificaciones que deban ser introducidas durante la ejecución respecto de las instrucciones surgidas del diseño y cálculo deberán contar con la aprobación del proyectista estructural.

-Comunicación del comienzo de la obra.

En toda estructura de acero cuya construcción implique el ejercicio de la responsabilidad profesional deberá comunicar al director de obra, dentro de un lapso a convenir, la iniciación de las siguientes etapas de la construcción:

- a) Trabajos de construcción o fabricación en taller.
- b) Pruebas de montaje total o parcial de la estructura a realizar en taller.
- c) Montaje total o parcial de la estructura en obra.
- d) Comienzo de las operaciones de remachado, atornillado o soldado.
- e) Comienzo de aplicación de pinturas.
- f) Toda modificación que, por imperio de causa fundada, se deba realizar al proyecto estructural.

-Construcción de la estructura.

La construcción de la estructura puede ser realizada en taller, ó en el mismo sitio de obra después de su adecuación. La empresa constructora de la estructura de acero asume la responsabilidad de la construcción delegando este cargo un profesional designado como

representante técnico, el cual deberá constatar las dimensiones de los elementos que constituyen la estructura y que los medios de unión coincidan con los indicados en el proyecto, que los aceros y demás materiales empleados sean los especificados en el proyecto.

Cuando se efectúen estos trabajos en obra, igualmente el representante de la empresa constructora deberá velar por la seguridad de la obra de acero y su coordinación con las demás labores, del acondicionamiento de instalaciones provisionales y en especial sobre la colocación y retiro de los andamios de apuntalamiento o sostén, de la seguridad de los elementos estructurales durante su traslado, así como de las precauciones para evitar la aparición de tensiones o deformaciones residuales.

La empresa constructora deberá realizar las pruebas y montajes necesarios en el taller u obra que aseguren el ajuste de la estructura en su emplazamiento definitivo, sin aparición de tensiones residuales, lo que conlleva a la realización de los controles de calidad que se establezcan para el proyecto durante la construcción, y de la aplicación de la protección contra corrosión y fuego.

#### **4.2.6.1 Preparación de los elementos estructurales.**

Después de haber previsto la llegada de los materiales y su almacenamiento se debe proceder a limpiarlos y a eliminar rebabas en los productos laminados con inclusión de las marcas de laminación en relieve cuando estén ubicadas sobre superficie de contacto.

La preparación de los elementos estructurales debe ser cuidadosa como para lograr un montaje no forzado de la estructura metálica que evite las tensiones iniciales de montaje, y un ajuste completo de la superficie de contacto que asegure la distribución del esfuerzo transmitido. Se debe evitar la aparición de fisuras u otros daños en la superficie de los elementos por efectos de doblado o achaflanado, mediante la elección de radios de curvatura y de temperaturas de trabajo apropiados.

#### **4.2.6.2 Corte de los elementos estructurales.**

Los cortes de los productos laminados deben estar exentos de defectos gruesos, estos cortes deben ser repasados mediante el cepillado, fresado, rectificado o limado, de manera que desaparezcan ranuras, fisuras, rebabas y estrías. Cuando el corte realizado en espesores superiores a 30 mm origine el endurecimiento de las zonas vecinas, éstas deben ser eliminadas mecánicamente.

Se debe comprobar la correcta terminación de la superficie de contacto en los empalmes de barras a compresión para asegurar la transmisión uniforme del esfuerzo.

Los cantos no cubiertos de las chapas de alma en las secciones compuestas deben presentar un ajuste con la superficie de las restantes piezas como para evitar el depósito de agua.

#### **4.2.6.3 Identificación de los elementos estructurales.**

El marcado de los elementos de la estructura debe ser realizado con procedimientos que eviten la modificación de la resistencia a fatiga de los mismos. No es admitido el marcado a cincel. De acuerdo a nuestra investigación, esta etapa es esencial para un futuro desarrollo de la automatización de las estructuras de acero, actualmente se facilita esta labor mediante medios magnéticos de identificación como el código de barras y chips de identificación que contienen toda las especificaciones del elemento además de permitir identificarlos.

#### **4.2.6.4 Confección de uniones remachadas y atornilladas.**

Los orificios para remaches y bulones deben ser realizados por taladrado. Cuando el medio de unión se realice con aceros F-20, F-22, y F-24 y sea destinado a estructuras bajo cargas estáticas, los elementos a unir presenten espesores no mayores de 10mm y el diámetro de los orificios sea mayor que del espesor de los elementos, se puede emplear el punzonado, siempre que se utilicen herramientas que aseguren una forma circular lisa para la pared del orificio, su perpendicularidad con las superficies de la chapa o perfil y la no producción de fisuras. En todos los casos se deben eliminar las rebabas formadas en los bordes de los orificios antes del montaje.

Durante la ejecución de uniones con tornillos normales deben ser controlados:

El diámetro de orificios cuando se proyecte el empleo de tornillos calibrados.  
Las dimensiones de los tornillos a emplear.  
La colocación de las arandelas proyectadas.

En los medios de unión antideslizantes con tornillos de alta resistencia se deben verificar los siguientes recaudos constructivos:

Tratamiento de las superficies. Previo al montaje, la superficie de rozamiento en la zona de contacto deben ser limpiadas y decapadas a los efectos de asegurar el rozamiento. La limpieza y decapado inicial puede ser realizada por:

El montaje debe ser realizado antes de 5 horas de haber realizado la limpieza final o, en caso contrario, proceder a proteger las superficies de los agentes exteriores mediante envolturas con papeles impermeables o plásticos y selladores adhesivos hasta el montaje.

#### **4.2.6.5 Control de materiales.**

Durante la fabricación: verificación de cumplimiento de dimensiones, formas y espesores, tipo de acero, extracción y preparación de muestras.

El supervisor técnico exigirá que la construcción de la estructura se realice utilizando materiales que cumplan con los requisitos generales y las normas técnicas de calidad

establecidas por los reglamentos para cada uno de los materiales estructurales o los tipos de elemento estructural. De considerarlo adecuado, se permitirá enderezar los perfiles antes de cortarlos. Se debe controlar el procedimiento y longitud de cortes, todos los cortes se realizarán en frío, a máquina o a mano, para el que las piezas deberán estar debidamente fijadas y aseguradas, no se aceptarán piezas que rebasen la tolerancia de  $\pm 5$  mm. No se recomienda el uso de calor para enderezar los elementos, se hacen excepciones bajo un control riguroso y previa aprobación de fiscalización.

#### **4.2.6.6 Control de ejecución.**

El supervisor técnico deberá inspeccionar y vigilar todo lo relacionado con la ejecución de la obra, incluyendo, como mínimo: replanteo, dimensiones geométricas, condiciones de la estructura metálicas, incluyendo sus soldaduras, pernos y anclajes, y en general todo lo que conduzca a establecer que la obra se ha ejecutado de acuerdo con los planos y especificaciones.

Antes del armado, se realizará la fabricación y montaje de las vigas y columnas correspondientes a un pórtico de prueba. Verificación de alturas, cortes, niveles, plomos y otros. Control de la colocación de apoyos, como platinas, placas y anclajes, debidamente aplomados y nivelados. Verificación de la instalación de tensores y otros complementarios que afirmen la estructura.

#### **4.2.6.7 Ensayos de control de calidad.**

El supervisor técnico dentro del programa de control de calidad le aprobará al constructor la frecuencia de toma de muestras y el número de ensayos que debe realizarse en un laboratorio o laboratorios previamente aprobados por él. El supervisor debe realizar una interpretación de los resultados de los ensayos realizados, definiendo explícitamente la conformidad de los materiales con las normas técnicas exigidas.

#### **4.2.6.8 Verificación y control de calidad de fabricación en taller.**

Se realizara un pre armado de los elementos en fabricación, para mediante un punteado con soldadura, verificar el cumplimiento de dimensiones, formas, ángulos y demás requisitos establecidos en planos. Aprobadas, se procederá con el soldado definitivo de cada una, y se realizará un nuevo control y verificación final, en la que se controlará cuidadosamente la calidad, cantidad y secciones de soldadura, la inexistencia de deformaciones por su aplicación, previo a su pulido y lijado.

Para uniones con pernos, igualmente se realizarán pre-armados en taller, verificando el adecuado empalme entre piezas y la correcta ubicación y coincidencia de las perforaciones y pernos.

#### **4.2.6.9 Protección de estructuras de acero.**

Las estructuras de acero deben verificar condiciones especiales de protección contra la corrosión y contra el fuego

Aplicación anticorrosiva. La protección contra la corrosión debe ser encarada mediante el cumplimiento de reglas sobre preparación de la base, materiales de recubrimiento y ejecución del recubrimiento. Se procederá con la pintura anticorrosiva, únicamente cuando las piezas se encuentren aprobadas y terminadas. Para su aplicación, los diferentes elementos de la estructura deberán estar limpios, sin óxido o grasa.

#### **4.2.6.10 Recubrimiento y pinturas.**

La primera capa será de imprimación (pintura de buenas condiciones de adherencia al acero y baja resistencia a agentes climáticos) aplicada a pincel u otros medios que aseguren la adherencia. Las capas posteriores a la imprimación pueden ser aplicadas a pincel, pistolas neumáticas o por inmersión.

#### **4.2.6.11 Transporte.**

El constructor, preverá todos los cuidados necesarios para el transporte de los elementos y piezas a obra, asegurando el equipo adecuado y los cuidados requeridos para impedir deformaciones, esfuerzos o situaciones no previstos. Igualmente cuidará de conservar durante este proceso, la calidad del revestimiento de pintura.

Adoptar los recaudos para que los elementos estructurales no se vean sometidos a solicitaciones o deformaciones excesivas durante la carga, descarga, transporte, almacenamiento y montaje.

### **4.2.7 Montaje y ensamble de estructuras de acero en obra.**

Para la planificación de la ejecución de un edificio con estructura metálica es importante tener conocimiento de los procesos de montaje y de su encadenamiento en el tiempo con los demás trabajos.

Después de haber pasado el control de calidad se aprobará el inicio del montaje de la estructura de acero que estará dirigido por un profesional experimentado en el ramo, el cual debe inicialmente verificar y hacer pruebas del personal técnico calificado para el montaje de la estructura, de la calidad y cantidad del equipo; grúa, elevadores y similares que posean las características y capacidad adecuada para el trabajo de alzado de la estructura. Se debe proveer de los sistemas de seguridad para los obreros: botas, guantes, anteojos, cascos, cinturones.

La velocidad del montaje de las estructuras de acero hace necesaria una cuidadosa planificación del montaje del esqueleto mismo y en general de los andamiajes y maquinaria, y otros elementos prefabricados por ejemplo, losas prefabricadas de

hormigón para forjados, elementos de escalera, de fachada, de pared interior. Además, los dispositivos empleados en el montaje de la estructura pueden servir para depositar en los forjados de los pisos los fardos que contienen los materiales de acabado.

El montaje de la estructura metálica no puede hacerse sin la previa construcción de las cimentaciones y de las obras de hormigón que dan la debida rigidez al edificio, ya que son procesos independientes en su elaboración. Igualmente es importante recalcar que el montaje de estas estructuras es independiente respecto a las condiciones climáticas y atmosféricas. Es indispensable para la fluidez del montaje que las vías de acceso a la obra estén bien consolidadas y accesibles en todo tiempo para los vehículos de transporte del material, así como que se disponga de vías de acceso para las grúas móviles y de espacio para su emplazamiento

#### **4.2.7.1 Operaciones que componen el montaje.**

Montaje y desmontaje de las estructuras auxiliares empleadas para sostener provisionalmente los elementos de la obra.

Descargue de los elementos que se reciben en obra.

Elevación de los mismos hasta el lugar que deben ocupar.

Colocación y fijación provisional.

Rectificación y ajuste de las piezas colocadas.

Fijación definitiva de los elementos por atornillado, soldadura, o empleo de adhesivos.

Las estructuras metálicas pueden montarse, sin almacenamiento a pie de obra, tomando directamente con la grúa los materiales del vehículo que los transporta, y llevándolos inmediatamente al lugar a que están destinados o, con almacén a pie de obra, que requiere de mucho espacio y unos aparatos elevadores para descargar y volver a cargar los materiales, así como unos vehículos para transportarlos al punto de la obra que tienen destinado, lo que causa gastos adicionales.

Antes del montaje, se deben presentar los elementos que componen la estructura y verificar que ésta adopta satisfactoriamente la forma prevista en el proyecto, se debe disponer de un sitio adecuado para el almacenamiento y trabajos en obra, determinando los espacios necesarios para el montaje, estableciendo y organizando un plan de trabajo, hacer los trazos requeridos del sitio a ubicar la estructura y verificar estas medidas en obra. Se debe verificar la total fundición y condiciones óptimas de las bases y cimentaciones que soporten la estructura, culminar la construcción de los elementos de apoyo e instalación de los equipos y ubicación de sistemas de andamios, entarimados y otros que se requieran par el alzado y armado de la estructura.

Se deben disponer las uniones de montaje y los dispositivos auxiliares que sean necesarios para asegurar la estabilidad y resistencia de la estructura bajo sollicitaciones de montaje y sólo deberán ser retirados cuando se haya asegurado que la capacidad portante de la estructura sea la especificada entonces se podrá remover los elementos auxiliares de montaje.

Sólo se debe realizar el remachado o atornillado final de la estructura cuando ésta se halle totalmente presentada, nivelada y asegurada con pernos y tornillos auxiliares. Se puede prescindir de este requisito en obra cuando la estructura ha sido presentada en taller. Las uniones realizadas serán accesibles para la recepción final de obra. Para aquellas uniones que no cumplan la condición anterior se debe prever un orden de montaje que permita su recepción provisoria antes que se tornen inaccesibles.

El montaje se iniciará por dos extremos opuestos, con el armado de los pórticos completos, en los que se controlará plomos y niveles, con medios de precisión y equipos topográficos, para asegurarlos y apuntalarlos, y proseguir con los pórticos intermedios. Toda la estructura se apuntalará adecuadamente, para la verificación sucesiva y final de su correcto armado y montaje, antes de proceder con su asegurado, soldado y complementación total, luego de la cual se verificarán las soldaduras realizadas en obra y la colocación y ajuste de pernos. Igualmente se procederá con la reparación de todas las fallas de pintura o el repintado total anticorrosivo, de ser necesario.

#### **4.2.7.2 Duración del montaje.**

La rapidez del montaje depende del número de grúas o elevadores disponibles y del número de operaciones de elevación que éstos efectúan por turno de trabajo. Las condiciones del lote y su accesibilidad determinan el número de aparatos elevadores que pueden instalarse. El número de operaciones de elevación que puede hacerse con un aparato varía con la altura de elevación, la accesibilidad del punto de colocación, el grado de dificultad de la fijación las piezas transportadas, y finalmente de las condiciones atmosféricas.

El retiro de apuntalamientos y andamios colocados para el montaje y armado, se lo realizará de acuerdo a la forma y el orden previamente establecido, para permitir el trabajo adecuado de la estructura. Anticipadamente al inicio de este trabajo, se tomarán los niveles, alineaciones y plomos de referencia, que permitan un control concurrente del comportamiento de la estructura terminada.

El supervisor determinará la necesidad de una prueba de carga u otras pruebas o ensayos, previa la aprobación de los trabajos. Para una prueba de carga, se consultará y diseñará la misma, con la participación del ingeniero estructural responsable.

-Control final de calidad, aprobaciones y entrega de obra.

La estructura y sus piezas componentes terminadas no deben tener torceduras, dobladuras o uniones abiertas. Se verificarán los plomos, alineamientos y niveles, comprobando dimensiones, uniformidad y ausencia de roturas. Se podrá exigir la realización de pruebas no destructivas de la soldadura efectuada, mediante una prueba de carga o utilizando ensayos de rayos x, magnaflux o pruebas ultrasónicas, a costo del contratista.

Finalmente si es necesario se efectuaran las reparaciones pertinentes, las más comunes son de fallas de pintura, producidas durante el transporte y montaje. Solucionando las fallas identificadas se procede entonces con el proceso de entrega y recepción de la obra, protocolizada por un acta de entrega-recepción, a la que se le anexa la documentación final de todos los procesos llevados a cabo al propietario, o director de obra.

#### **4.3 Ventajas y desventajas del acero y del concreto como elementos estructurales.**

De acuerdo a lo observado en el análisis anterior, podemos concluir que en nuestro país los sistemas estructurales más utilizados en la industria de la construcción son la mampostería estructural, y el concreto reforzado, que aunque existen procesos industrializados, es el sistema de pórticos estructurales fundido en obra el que impera, y rara vez estructuras metálicas, con ejemplos destinados a viviendas unifamiliares y con algunos ejemplos tradicionales de estructura en acero para edificaciones. De la madera hay pocas referencias, aunque existen ejemplos fantásticos en guadua, considerada el acero vegetal, con los que algunos visionarios han construido pabellones, puentes peatonales, casas unifamiliares, y en algunas regiones se han construido edificaciones de hasta 3 niveles. Observamos además que la tecnología del concreto ha evolucionado más rápido que el acero, el cual ha evolucionado en incrementos relativamente pequeños, prácticamente desde el año 1991 con la apertura económica.

Consideramos entonces que es importante evaluar el sistema tradicional preponderante en Colombia, nos referimos al concreto fresco con refuerzo de acero con sus distintas cualidades, sin desconocer que en el ámbito mundial el concreto reforzado cada vez es más competitivo alcanzando mejores resistencias; y el acero que consideramos un material con mejores propiedades de resistencia, ductilidad, tenacidad, capacidad para absorber energía y alta resistencia; queriendo ser objetivos analizaremos y detallaremos sus ventajas y desventajas.

Nos parece indicado empezar por limitar nuestro análisis y enfocarlos a nuestro objeto de investigación, las edificaciones habitacionales y delimitarnos nuevamente en la altura de construcción del edificio, que mayormente en nuestro contexto Colombiano se acude a una altura de 12 pisos con un promedio de 5 pisos como mínimo.

Entre los factores que limitan la altura de estas edificaciones están la reglamentación, los códigos de construcción prescriben la altura máxima a que se pueden construir, la posibilidad de los servicios públicos, las condiciones del terreno y cimentación pueden no ser satisfactorias para ciertos proyectos. Por supuesto el factor económico es vital, el alto costo del terreno obliga a conseguir una mayor altura, la cual a su vez tiende a aumentar los presupuestos.

-Comparando el acero con el concreto para la construcción de edificios altos, el concreto presenta un problema debido a su baja relación entre la resistencia y el peso. Para mejorar esta relación se debe disminuir la densidad del material o que se incremente su resistencia. Debido a que la resistencia del concreto es mucho más baja que la resistencia

del acero, y pensando en cargas similares, las columnas de concreto reforzado para edificios altos ocupan más espacio que las columnas de acero estructural, de esta manera se reduce el área libre disponible para venta; éste es un factor que limita enormemente el uso de la estructura de concreto en edificios altos, ya que el tamaño de las columnas se incrementa con la altura del edificio.

Existen ejemplos de estructuras fabricadas con los nuevos concretos ligeros y de alta resistencia que favorecen a las grandes construcciones de concreto contra las de acero, contando con nuevos sistemas estructurales que eliminan columnas interiores y dependen más de columnas exteriores colocadas parcialmente o totalmente fuera del edificio. Sin embargo es una clara ventaja que la modulación y estructuración con base en estructura metálica permite manejar elementos estructurales de mayores claros y dimensiones menores, libres de columnas y logrando un espacio interior más aprovechable en las plantas de un edificio, lo cual económicamente va a ser más rentable.

El acero, por lo contrario y debido a su gran resistencia, nos brinda menores dimensiones en columnas con perfiles esbeltos, y vigas obteniendo un menor peralte para la misma solitud de cargas, logrando con esto que se reduzca la altura total de un edificio, logrando que con la misma altura de un edificio de concreto de 20 pisos, usando estructuras de acero se puede lograr 22 pisos.

-El peso de la estructura, como consecuencia de las proporciones volumétricas de los elementos en cada tipo de estructura, generan grandes diferencias en el peso total de la estructura, inclusive por el peso mismo del material, en donde un edificio de concreto puede llegar a pesar hasta dos veces más que uno con estructura de acero,

La alta relación resistencia/peso del acero en edificios altos y estructuras de grandes claros, se convierte en menores cargas muertas o, en un menor peso de la edificación, con lo cual se reduce notablemente el costo de la cimentación y puede significar un ahorro importante en determinados tipos de suelos. La estructura metálica puede llegar a pesar hasta el 50% menos, para la misma geometría y cargas. Esto definitivamente es una de las grandes ventajas del acero estructural.

Concreto: Resistencia a la compresión  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$  , 28 MPa

Hierro: Resistencia a la flexión  $fy = 4.200 \text{ kg/cm}^2$  , 420 MPa

-La flexibilidad funcional de las estructuras es hoy día vital en el cambiante mundo en que habitamos, y a su vez es otra variable determinante que marca diferencias entre estas técnicas. El uso al que se destina una edificación depende de condiciones locales y puede variar con el tiempo, marcando peculiaridades en cada proyecto.

Cuando se deba ampliar una construcción, cambiar una sección dañada, en general para hacer modificaciones en la estructura, son las estructuras de acero las que permiten con cierta facilidad realizar estos trabajos sin los problemas y gastos de demolición que ocasiona las construcciones de concreto.

Al hacer alguna remodelación, ampliación o cambio de uso en un edificio, la estructura metálica está intacta, lo que significa que es recuperable en su totalidad, de manera que se puede volver a utilizar, caso distinto al de un edificio con estructura de concreto, que tiene que ser demolida y únicamente se puede llegar a recuperar el acero de refuerzo. La estructura de acero permite con cierta facilidad hacer las modificaciones sin los problemas y gastos de demolición que ocasionan las construcciones de concreto.

-La decisión de si se debe usar estructura de concreto reforzado o de acero, también se ve determinada por la función que va a cumplir la estructura. La modulación de la estructura de acero, proporciona un punto de funcionalidad seductor, pero las estructuras de acero vibran más que las de concreto. Esta es la principal desventaja en cuanto a su funcionalidad de las estructuras de acero frente a las de concreto, la rigidez. Esta cualidad es importante y depende de un buen diseño, ya que además de satisfacer las condiciones de seguridad, se necesita cumplir con requisitos de servicio y funcionamiento.

-En cuanto al transporte y al montaje o colocación de las piezas en su sitio final, son muy diferentes estos tipos de estructuras, las de acero son primordialmente prefabricadas, elaboradas en su mayoría en otro lugar fuera o anexo a la obra y solo sería similar cuando se usen estructuras de concreto prefabricado, la técnica de concreto fresco a la cual nos hemos referido en este análisis, es diferente, esta determinada por la facilidad con que una mezcla de concreto puede ser manejada sin que tenga una segregación dañina del concreto. Sin embargo de acuerdo a las condiciones del lugar y de accesibilidad, se tomara la decisión adecuada.

La estructura de acero se puede transportar e instalar en sitios muy accidentados o lugares con muchos obstáculos, y tal vez su única limitante depende de las normas que rigen el transporte en el sitio, las cuales limitan y controlan los volúmenes máximos a transportar. Los elementos que componen una estructura de acero, se pueden enviar semi ensamblados, precisamente para cumplir con esos requisitos,; salen de los talleres a la obra totalmente prefabricados e identificables en posición, de acuerdo con los planos de montaje. Esto hace la operación de montaje en la obra sencilla y con poco desperdicio de material.

Las características del concreto fresco que son difíciles de medir cuantitativamente, dependen del diseño de la mezcla, que le confiere y que pueden hacerlo difícil de colocar y de consolidar, lo cual no solo incrementa el costo de su manejo, sino que tendrá también pobre resistencia, durabilidad y apariencia, afectando tanto a los costos como a la calidad de las mezclas de concreto. Su consistencia no deberá ser más que la necesaria para colocarlo compactarlo y acabarlo.

El manejo de las mezclas de concreto es controlada por el contenido de agua, el contenido de cemento, la graduación del agregado y otras características físicas, aditivos y factores que afectan la pérdida de revenimiento, definida como la pérdida de la consistencia en un concreto fresco con el tiempo, esto limita el uso en que se puede colocar un concreto fresco, lo cual es otra desventaja en comparación con el acero.

-El equipo de construcción utilizado es importante, ya que no es posible separar la elección de la maquinaria y el equipo del método de ejecución de los trabajos. Estos dos están íntimamente relacionados y la elección que se tome en uno de ellos va afectar al otro.

El equipo y la maquinaria utilizados para las edificaciones con estructuras de acero o de concreto reforzado son completamente diferentes. Posiblemente la principal razón de su divergencia es el concepto de que el acero estructural es prefabricado en todos los casos y que el equipo utilizado en obra es exclusivamente para ensamble y elevación. A diferencia del concreto reforzado que requiere de todo el equipo necesario para: cimbrar, cortar y amarrar el acero de refuerzo, proporcionar, transportar, colar, y curar el concreto.

-La prefabricación es sin lugar a duda una de las principales ventajas constructivas de la estructura de acero, la elaboración de planos a detalle de cada uno de los miembros que componen la estructura, facilitan el control de calidad y tienen una instalación más sencilla. Esta ventaja reduce considerablemente los errores debidos a la gran cantidad de trabajo en obra que tiene el concreto y hace posible que se combinen varias actividades en el programa general de una obra.

Una desventaja de las estructuras de acero puede estar constituida por no permitir cambios una vez se han despachado los planos de taller y se ha iniciado su fabricación. Esto es muy importante debido a que frecuentemente se modifica el proyecto arquitectónico, lo cual obliga en ocasiones a modificar las dimensiones de la estructura. La fabricación de una estructura metálica se efectúa bajo normas de calidad más rigurosas, que las que se aplican en el concreto reforzado, por esto es, que una vez que la estructura de acero se fabrica, ya no se debe añadir, cortar o cambiar de posición a los miembros estructurales, puesto que cada pieza tiene una marca y corresponde a un lugar específico de acuerdo con los planos de taller y de montaje. De esto surge una necesidad imperiosa de analizar a fondo el proyecto antes de iniciar su construcción.

-La fácil supervisión de programación y actividades de obra ofrecidas por la construcción metálica se convierte en otra ventaja. La instalación de elementos de acero, se reduce a vigilar la geometría de la estructura en lo que se refiere a ejes, niveles, y juntas. Es importante advertir que el estricto cumplimiento de las normas de montaje sobre todo del primer tramo, garantiza la geometría y el buen ensamble del resto de la estructura. Sus uniones se someten a controles de eficiencia y calidad mediante inspecciones y procedimientos que se inician con la selección y calificación del personal.

En el caso del concreto el trabajo en obra es mucho más amplio y la mano de obra menos especializada, hay que armar el acero de refuerzo terminar la cimbra para poder posteriormente colar. Debido a la gran cantidad de personal y a las diversas operaciones que se realizan en la obra para la elaboración de estructuras de concreto, generan como resultado un proceso más complicado y de mayor susceptibilidad de errores. De lo anterior se puede resumir que las instalaciones en estructuras de concreto reforzado son más complejas y en ocasiones de menor calidad.

-El factor de seguridad para un miembro estructural se define como la relación de la resistencia del miembro al máximo esfuerzo previsto. La resistencia de un elemento, utilizada para determinar el factor de seguridad debe considerarse como el esfuerzo último. Para materiales dúctiles como el acero, el factor de seguridad se basa en los esfuerzos en los puntos de fluencia, mientras que para materiales frágiles o vítreos como el concreto, se basa en la resistencia a la ruptura.

Las estructuras de acero son un material dúctil, ya que se deforma gradualmente antes de fracturarse, esto es una ventaja sobre el concreto y sobre todo en estructuras construidas en zonas de alto riesgo sísmico, donde el comportamiento de los edificios depende en buena medida de esta propiedad. Esta capacidad de soportar sobrecargas repentinamente sin que se produzcan fallas del tipo frágil, permite a las estructuras de acero soportar cargas verticales máximas y laterales bajo grandes deformaciones durante un sismo de gran intensidad. Además este factor de seguridad entre otros objetivos busca retardar y permitir la evacuación de los habitantes antes de que falle.

Por otro lado, La elevada relación resistencia/peso de las estructuras de concreto representa una desventaja de estas estructuras contra las de de acero de acuerdo a su respuesta frente al sismo. Las estructuras de concreto fallan al alcanzar su resistencia máxima. Recordemos que las fuerzas sísmicas que actúan en la estructura de un edificio se determinan en términos generales, multiplicando la masa de éste por su aceleración de respuesta, al ser más pesada la estructura de concreto (carga muerta), mayor será la masa del edificio, por lo tanto mayor será el daño por sismo, y viceversa.

Otros dos factores importantes, donde el acero es más seguro que el concreto reforzado, son la gran capacidad para absorber energía del acero, útil para evaluar la resistencia a choque o impactos que se pueden presentar en sismos; y su alta resistencia a la fatiga que permite soportar muchos ciclos de tensión y compresión antes de que sobrevenga la ruptura.

Las propiedades anteriores le dan mayores niveles de seguridad a una estructura de acero sobre todo cuando esta sujeta a esfuerzos causados por cargas accidentales, principalmente viento y sismo, ya que estas fuerzas pueden ocasionar inversiones de esfuerzos.

Sin embargo una desventaja de estas estructuras, son los daños que pueden causar en elementos no estructurales como muros, fachadas, que tiene limitaciones frente a desplazamientos horizontales. Al ser estructuras más ligeras y flexibles, estas pueden resistir y desplazarse sin problemas, lo cual no ocurre con los demás materiales, presentándose grietas y rupturas. Se debe buscar evitar daños y desde luego prevenir el fenómeno de agrietamientos y fracturas en caso de sismo.

Otra desventaja de las estructuras de acero, se presenta con los elementos a compresión largos, como las columnas, donde la esbeltez de las secciones de los miembros estructurales de acero dentro de ciertos límites ocasiona susceptibilidad a problemas de pandeo y ocurrencia de otros fenómenos de inestabilidad.

-Resistencia contra el fuego. Debido a su gran importancia para las estructuras de acero, más adelante detallaremos la actualidad en técnicas para proteger las estructuras de acero, buscando de esta manera resolver su gran desventaja.

La respuesta frente a altas temperaturas de las estructuras de acero son su gran desventaja, en un incendio el acero pierde sus propiedades mecánicas a una temperatura del orden de 600 °C, a partir de este momento tiene un comportamiento plástico y, se deforman sin incrementar los esfuerzos. La protección de estructuras de acero contra fuego es cara y en ocasiones puede representar hasta un 5% del costo de fabricación de la estructura. No obstante el diseño y la protección contra incendio, deben de ser una de las prioridades en el análisis de estructura de acero, hay que recordar que el acero no es combustible.

Como una ventaja el concreto reforzado es a prueba de fuego, siempre y cuando exista un recubrimiento adecuado del concreto sobre el acero de refuerzo, el cual es mínimo y de cualquier manera, el recubrimiento requerido para la protección del acero contra la corrosión generalmente es suficiente para la protección contra el fuego.

-La mayoría de los aceros se corroe cuando están expuestos libremente al aire, y deben recubrirse periódicamente. Esto hace que el mantenimiento normal de una estructura de acero sea más caro, lo cual es una desventaja contra las estructuras de acero. Afortunadamente estos problemas se ven controlados, debido a que los elementos estructurales en edificaciones, casi siempre, están recubiertos y por consiguiente protegidos. Además existen diferentes tipos de acero de baja aleación y alta resistencia, que resisten la corrosión atmosférica dos veces más que los aceros al carbón, y logran resistir hasta cuatro veces más la corrosión atmosférica.

La durabilidad del acero depende de su fabricación y que como ya se comento se hace en plantas con altos controles de calidad, mano de obra especializada y equipo en condiciones adecuadas, por esto es difícil que el acero estructural falle como material, lo cual es una ventaja. Sin embargo el concreto es diferente dado que se fabrica en sitio y existen muchos factores externos que puede afectar su durabilidad.

La durabilidad del concreto puede verse afectada por los líquidos y gases que lo penetran, lo que se conoce como permeabilidad del concreto, por las condiciones micro climáticas que pueden tener un efecto en la corrosión del material de refuerzo. Para evitar la corrosión de estos se recomienda una relación agua cemento baja, compactarlo apropiadamente y, dejar recubrimiento adecuado para las condiciones de exposición del acero. Durante el diseño del proyecto se deberá estudiar la exposición al entorno de cada segmento de la estructura de concreto y de acero. Los estudios se deben convertir en requerimiento de especificaciones de proyecto que sean razonables y no excesivas.

-La rapidez en la construcción, y el cumplimiento en el tiempo de entrega, probablemente sea otra de las ventajas importantes de la estructura de acero, ya que mientras en el lugar

de la obra se está fabricando la cimentación, al mismo tiempo en taller se fabrica la estructura, quedando pendiente únicamente el montaje.

Tomando en cuenta lo anterior y con una adecuada planeación y programa de trabajo se reduce el tiempo de ejecución de una obra en acero. La superposición de actividades, en especial en la cimentación y la fabricación de la estructura en taller se transforman en mayor rapidez en la construcción de estructuras de acero contra las de concreto. Partiendo de la base que la estructura de acero es prefabricada, el transporte y el montaje puede efectuarse en un tiempo menor al requerido por otros procedimientos constructivos.

Conjuntamente cuando el acero estructural llega al lugar de construcción es capaz de asumir su máxima capacidad de carga, y es poco probable que el montaje se vea afectado por condiciones climáticas, cosa que ocurre frecuentemente en las estructuras de concreto. Sin embargo, cuando el edificio es de acero no provee de plataformas de trabajo o pisos hasta que no se complete el montaje de los mismos, como sí lo hace el concreto reforzado, y es necesario más trabajo antes de concretar el edificio.

Por el contrario, el concreto necesita un tiempo aproximado de 28 días para alcanzar una resistencia adecuada, ya que es necesario que las columnas de concreto reforzado tengan suficiente resistencia antes de que sea posible poner cualquier carga sobre ellas, y los pisos de concreto deben dejarse varios días fraguar antes de que sea posible trabajar sobre ellos.

-Quizá la principal razón que mencionan los diseñadores estructurales, consultoras, constructores y fabricantes para explicar el uso todavía limitado de la estructura de acero en la construcción de edificios, en comparación con las estructuras de concreto, sea el mito sobre su costo. Esta razón se mantiene en nuestro medio a pesar de que la estructura de concreto está más castigada por los reglamentos actuales de construcción.

“Las construcciones en México de edificios de acero y de concreto, han demostrado que el costo del esqueleto estructural de un edificio representa solamente entre el 30 y el 35% del total de la construcción, Pero en la obra gruesa hay elementos que no dependen del material de estructura básica, como son pisos, fachadas y muros, si se deducen de la obra estos elementos queda un costo remanente que varía entre el 15 y el 20% del costo total de la construcción. Aquí es donde pueden competir frente a frente el acero y el concreto, tomando en cuenta que en caso de daños estructurales o errores debido a control de calidad, la reparación de la estructura de concreto puede resultar más cara que la del acero. En la construcción de acero el costo de fabricación y montaje representa un poco más del doble del costo de la materia prima cabe señalar que en México, la mano de obra es "barata" (según la calidad), y la materia prima es cara, mientras que en Estados Unidos y Canadá, los materiales son baratos y la mano de obra cara”<sup>44</sup>.

El retorno de la inversión es importante ya que la estructura de acero se construye en un tiempo más reducido que el del concreto, garantiza que la entrega y ocupación del

---

44 Guerra González, Joaquín. Diseño y Construcción de obras de edificación evaluando estructuras de concreto con estructuras de acero. Tesis ing. Civil, UNAM. 2000. Pág.132

edificio sea en menos tiempo, generando ingresos importantes para el inversionista lo que podría dar como resultado una opción económica más viable.

Lo que si es cierto es que el concreto es un material más económico y más disponible en las obras, cuenta con gran distribución. Los principales ingredientes para producir concreto son relativamente económicos y comúnmente disponibles, aunque en ciertas regiones del mundo el costo del concreto puede ser hasta cuatro veces más que en otras, donde los insumos y/o la mano de obra son más baratos.

Podemos concluir y al mismo tiempo enfatizar con esta comparación, que cada proyecto es diferente y tanto los tiempos como los costos de producción van a depender de un cierto número de factores específicos para cada caso, como son: tipo de diseño, ubicación de la obra, altura del edificio, disponibilidad de materiales, disponibilidad de mano de obra calificada, posibilidad que se presenten catástrofes, y factores climáticos.

Es claro que las estructuras de acero son convenientes en aquellas construcciones que deben soportar grandes impactos, cargas dinámicas empujes y otras sollicitaciones con presiones de toda índole. Otra ventaja de las estructuras de acero es que muestran un comportamiento estable aun cuando están sometidas a ciclos repetidos de carga en el intervalo inelástico, desde ese punto de vista tienen una gran resistencia frente a condiciones severas de servicio. Sin embargo es necesario estudiar ambas posibilidades para un proyecto, la técnica del concreto reforzado esta más arraigada en nuestros constructores, tenemos acceso a las distintas variedades de este material y su respuesta frente al fuego no requiere mayores costos. Solo después de analizar los pros y contras para cada proyecto podremos decidirnos y desarrollar la técnica que sea apropiada y más viable.

#### **4.3.1 Ventajas y desventajas del acero de alto desempeño.**

El acero de alta dependencia conforma una familia de elementos para la construcción de estructuras, y se caracterizan por presentar un esfuerzo resistente a la tensión (yield stress) entre 70 ksi y 100 ksi. Su uso en la construcción es posible ya que actualmente los medios de producción lo han hecho económico y por que tienen todas las propiedades necesarias para un buen desempeño en la conformación de estructuras.

Este tipo de acero ha estado en el mercado por muchos años pero no tuvo mucha aceptación por presentar dificultades para ser soldado y, por su alto precio. Hoy día se ha buscado mejorar sus condiciones constituyendo una opción más que debe ser tenida en cuenta al momento de diseñar y calcular las estructuras. A continuación se hará un recuento de las ventajas y desventajas del acero de alto desempeño, plasmadas en el informe realizado para el NIST, titulado “Required Properties hoy high-Performance Steels”<sup>45</sup>.

---

<sup>45</sup> “Required Properties of high-Performance Steels”. Galambos V. Theodore, Hajjar F. Jerome, Earls J. Christopher, Gross L. Jhon. National Institute of Standards and Technology. 1997. p. 2-5.

Algunas de sus posibles ventajas tecnológicas son:

La reducción del peso total de la estructura, lo cual genera ahorros hasta en los costos de transporte, de la fábrica al sitio de obra, reduce también el tamaño de las cimentaciones. La estructura obtendría una mayor resistencia elástica, mejorando su comportamiento sísmico al ser más resistente a las fuerzas dinámicas. Su bajo peso y esbeltez de los elementos son ideales para diseñar estructuras con formas audaces e incluso dejando la estructura expuesta.

Algunas de sus posibles desventajas tecnológicas pueden ser:

Que se debe inspeccionar cuidadosamente su comportamiento a la flexión y a la vibración, hay que ser cuidadosos con problemas relacionados con la torsión en los altos niveles para prevenir estas deformaciones. Todavía no hay muchos datos confidenciales sobre el uso y comportamiento estructural de este tipo de elementos.

#### **4.3.2 Aportes de la construcción metálica.**

Las ventajas del acero estructural son evidentes, se construye rápidamente por su adecuación a la prefabricación en taller, por su facilidad y rapidez de montaje sin necesidad de estructuras auxiliares, resultando una edificación continua y sin pausas, lo cual reduce costos. Su larga duración es otra de sus ventajas debido a que con poco mantenimiento puede permanecer tan fuerte y resistente como el primer día, comprobando una vez más su bajo costo.

La estructura de acero es ligera y resistente, con pilares esbeltos y forjados muy ligeros, de modo que el peso de esta deja de convertirse en una de las cargas principales, por lo que se requieren unas cimentaciones menores que otros materiales, lo cual se traduce en optimización del volumen a construir. La estructura de acero es frente a otros materiales, especialmente adecuada para afrontar los sismos, pues no sufre grietas ni fisuras y su rotura es casi imposible. En todo el mundo como en Colombia, los sismos son un problema a resolver de mucha importancia que demanda un alto desarrollo técnico para desarrollar la solución estructural.

#### **4.3.3 Sumario de la argumentación a favor del acero:**

Ventajas financieras: El acero es un material que resulta económico. Menor tiempo de construcción en la obra por consiguiente bajan los intereses y por el retorno más rápido de la inversión.

Propiedades espaciales como la flexibilidad, adaptabilidad y versatilidad: Gran facilidad para transformar la obra y adaptarla a nuevas necesidades de uso durante su vida. Todas las partes arquitectónicas pueden tener una solución metálica.

Seguridad: La calidad industrial del acero garantiza la estabilidad de la obra metálica que, con mantenimiento normal, puede durar un siglo, y más. El acero, debidamente protegido, responde a las exigencias en materia de incendio.

Confort: Las obras perturban menos el ambiente, por su rapidez, aseo y eficiencia. La estructura metálica asociada a las fachadas, placas y cerramientos aporta un mejor confort acústico y térmico.

Como hemos enfatizado, la construcción mediante esta técnica aporta a los distintos ámbitos de la construcción, incomparables aspectos deseados como lo son:

Una construcción económica, gracias a la disminución de costos de la construcción y a los perfeccionamientos constantes en la productividad en los campos de siderurgia y construcción metálica que bajan los costos y permiten un precio de venta muy rentable, aun cuando se tienen que tomar en cuenta la protección contra incendio y alto peligro de corrosión.

Disminución en el costo global de la obra, que es inferior en razón del ahorro en las cimentaciones pues la construcción es más liviana. Igual situación ocurre con el costo de las instalaciones provisionales y, de las obras secundarias: ascensores, fachadas, acondicionamiento, tuberías. El tiempo de ejecución es más corto, la prefabricación se efectúa durante la construcción de la cimentación y el montaje es casi insensible a las inclemencias del tiempo.

Admite una construcción versátil que permite utilidades diversas, una de sus grandes ventajas que no pueden dejar de tenerse en cuenta entre las propiedades que otorga una estructura de este tipo; su modificabilidad permite una adaptación de la obra a necesidades nuevas o a traslados. La facilidad de reemplazo de componentes complementarios: divisiones, cerramientos, instalaciones, permiten su utilización en razón de la posibilidad de contar con grandes luces libres de elementos estructurales de manera económica.

Debido a que la estructura se compone por la interacción de múltiples elementos autónomos, nos brinda la facilidad para reforzar, transformar, suprimir y agregar elementos que pueden necesitarse por modificación de las necesidades o cambio de utilización. Las modificaciones pueden preverse durante el tiempo del montaje y, estos trabajos pueden emprenderse sin molestar otros sectores. Su demolición, o el desmontaje, son viables de igual forma y permiten una reventa de los materiales con precios muy rentables.

La rapidez de construcción es alta, desarrollada en un tiempo de construcción corto, gracias a la prefabricación de los elementos, que se efectúa en el taller mientras en la obra

se hace la cimentación. El montaje es más rápido gracias al peso inferior de estas estructuras, y su término no está sujeto a las inclemencias del tiempo. Además la mano de obra es calificada técnicamente, con medios industriales y con una planta adecuada, para garantizar la ejecución de los trabajos con normas de calidad adecuadas.

La calidad de los trabajos se efectúa con precisión: en máquinas y con personal experimentado, que dan por resultado una gran fidelidad al diseño propuesto, en donde no hay nada de improvisación ni retoques en la obra. El personal de los fabricantes de estructuras metálicas es calificado, experimentado y estable, no es con tratado para cada obra. El montaje y los trabajos en la obra son más reducidos por la prefabricación y la precisión de las estructuras; por consiguiente la ejecución es más rápida y segura.

Este tipo de estructuras ofrecen total seguridad, desde su etapa preliminar y de estudios, durante su ejecución, en su presupuesto, y sobretodo durante su vida útil. Esto se consigue gracias a la certeza de la calidad de los componentes perfiles y chapas, de fabricación controlada hoy día con técnicas y equipos computarizadas con elementos de precisión y posicionamiento láser y demás. Al igual que su montaje y su ensamble automatizados, controlados igualmente por computador, sin importar el método empleado, sean soldados o atornillados.

De esta manera tenemos la certeza de una resistencia sísmica óptima, de una resistencia al fuego cada vez mejorada con nuevos materiales y técnicas como la de enfriamiento por circulación de agua, que actúan según normas y requerimientos oficiales. Lo más importante es brindar seguridad a las personas que habitaran en estas estructuras garantizando la estabilidad de las mismas por tiempo indefinido o por un periodo necesario para evacuarlas en caso de una catástrofe, a condición de efectuar planes de mantenimientos claramente establecidos. Esta estabilidad puede esperarse por más de un siglo.

***ESTRUCTURAS DE ACERO LIVIANAS Y AUTOMATIZADAS  
ANALISIS SINCRETICO PARA SU CONFORMACION***

## **5.0 ESTRUCTURAS DE ACERO LIVIANAS Y AUTOMATIZADAS ANÁLISIS SINCRETICO PARA SU CONFORMACION**

En esta la era del menos es más, de la tecnología molecular, y de la estructuración de átomos, no podríamos continuar y atrevernos a plantear un nuevo sistema estructural en acero, sin advertir sus próximos advenimientos tecnológicos y nuevos procesos constructivos que revolucionaran aún más las características de las estructuras de acero, permitiéndonos brindar una opción para la solución de edificaciones habitacionales, ya que estamos seguros de conseguir un sistema estructural liviano y automatizado gracias a la fusión tecnológica, factible de ser implementada en nuestro contexto, y que describiremos en este capítulo.

### **5.1 Tecnología del acero estructural hoy.**

#### **5.1.1 Acero nanoestructurado.**

Gracias al desarrollo de la nanotecnología, el acero se convierte en uno de los materiales más susceptibles de cambio al alcanzar estructurar sus átomos y manipular sus características, entre otras importantes, la del ahorro de materia en su conformación molecular, con lo cual se conseguirá un altísimo incremento en su resistencia al mismo tiempo que se reduce notoriamente su peso.

La Nanotecnología designa un amplio conjunto de tecnologías novedosas en las cuales los materiales y objetos son fabricados con dimensiones ubicadas entre un micrómetro y un nanómetro de longitud o diámetro. Los padres de esta tecnología, los físicos Richard P. Feynman, y Freeman J. Dyson, por sus creativas aportaciones y su visión temprana conjunta del futuro de la tecnología molecular y biológica abrió el camino con respecto a la transformación futura de la industria, la investigación de materiales, la conservación de la ecología terrestre, el desarrollo de la cibernética y la exploración espacial.

Un Nano es igual a Una millonésima parte de un milímetro.  $(10^{-9}) = 1 \cdot 10^{-9}$  milímetros.

La nanotecnología permitirá manejar átomos y moléculas con absoluta precisión para conseguir entre otros avances el poder construir estructuras microscópicas con especificaciones atómicas sumamente complejas. Permite también la creación de nuevos y mejores materiales producto de la nanoestructuración, que revolucionará los procesos

industriales de producción del acero y otros materiales, conduciendo a una mejora de sus propiedades y características básicas ya que pueden ser prediseñadas antes de su creación.

Gracias a la nanoestructuración y descubrimientos como el microscopio atómico y el ensamblador nanotecnológico, se descubrió y consiguió seleccionar, desplazar y agrupar los átomos de una molécula. Este importantísimo avance permite diseñar y estructurar los átomos que conforma el acero para conseguir la organización de los nanotubos de carbón y de otros minerales que lo conforman, consiguiendo el acero nanoestructurado.

Dentro de las investigaciones realizadas por el Foresight Institute, se descubrieron los nanotubos, estructuras constituidas por los átomos de un elemento en formas variadas pero convergentes en dejar un espacio hueco interior de forma natural. Richard W. Siegel, descubrió además un proceso práctico y económico para crear materiales nanoestructurados en cantidades industriales, al cual ha llamado y patentado como Síntesis Física de Vapor.

Lo anterior significa un ahorro increíble de materia dentro de cada pedazo de material nanoestructurado, y como consecuencia, una ligereza en peso que puede llegar a ser mil veces mayor que lo normal, lo cual nos permite reducir más el peso de la estructura si los tubos estructurales (HSS sections) que habíamos encontrado como ideales para las estructuras livianas, son construidos con este acero nanoestructurado.



Fig. # 64. Ensamblador nanotecnológico.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
[www.foresight.org](http://www.foresight.org)

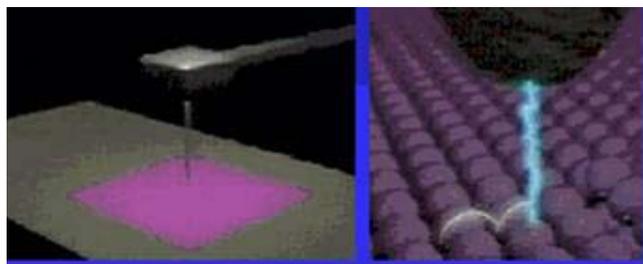


Fig. # 65. Microscopio atómico.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
[www.foresight.org](http://www.foresight.org)

Estos adelantos permiten manipular y ensamblar los átomos que conforman el acero. Debido a las muchas aleaciones con que se produce, el acero adquiere una estructuración atómica particular, y es la disposición de los nanotubos la fuente que confiere ciertas propiedades al acero. En el caso del carbón, la aleación primaria del acero y la más importante, lo provee de su gran dureza y resistencia, debido a que sus nanotubos son cilíndricos y huecos, y están presentes de forma natural en espirales, catalogadas como las estructuras esenciales de donde provienen sus cualidades.

El acero nanoestructurado puede ser producido industrialmente, una vez que los nanotubos de carbón y otros, sean organizados de tal manera que la disposición final conseguida produzca nuevas micro estructuras de mayor eficiencia gracias a la interrelación entre ellas, maximizando así sus cualidades.

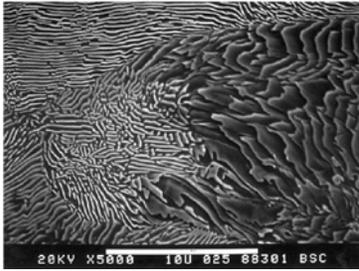


Fig. # 66. Microestructuras y estructuración molecular. Imagen tomada con fines académicos de: [www.foresight.org](http://www.foresight.org)

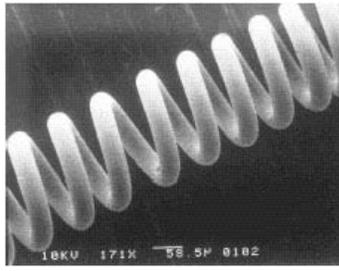


Fig. # 67. Nanotubos de Carbón. Imagen tomada con fines académicos de: [www.foresight.org](http://www.foresight.org)

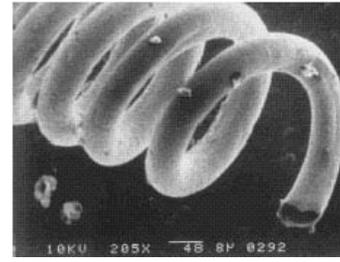


Fig. # 68. Cavidad interior de un nanotubo de Carbón. Imagen tomada con fines académicos de: [www.foresight.org](http://www.foresight.org)

## 5.2 Visión prospectiva de la construcción.

La industria de la construcción en nuestro contexto latinoamericano, presenta deficiencias notorias si la comparamos con la industria de los países desarrollados, en parte debido a la falta de implementación de conceptos de producción y de tecnologías. Es común que en nuestros procesos de construcción identifiquemos carencias de productividad y retrasos en los tiempos programados de obra, en seguridad y calidad. Un número de soluciones conceptuales abogan por superar estas deficiencias; hasta ahora la industrialización ha sido por mucho tiempo la que ha marcado el rumbo, sus procesos de prefabricación y modularización se han visto ahora fortalecidos con visiones prospectivas acerca de la robotización y la automatización, gracias a la integración de sistemas computacionales en esta industria.

“Actualmente las nuevas tecnologías de producción “new production philosophy” se refieren a un conjunto de metodologías, técnicas y herramientas que van de la mano con los adelantos científicos y las técnicas, muchas de ellas originadas en la producción automotriz en países como Japón y Alemania, entre las que podemos destacar, se encuentran procesos como “Just In Time (JIT)” (Justo a Tiempo), “Total Quality Control (TQC)” (Control Total de Calidad), “time based competition” (Organización del tiempo para la competitividad)”<sup>46</sup>.

Esta nueva filosofía de producción podría ser aplicada en la construcción mejorando su competitividad ya que permite identificar y eliminar las actividades donde se desperdicia tiempo y recursos, debido a que controlamos tan solo las actividades que tienen un valor agregado y por ejemplo actividades como almacenamiento e inventario no son siquiera involucradas en los diagramas de ruta crítica.

La construcción actual debe tratarse como un proceso volátil que involucre todas las actividades, inclusive las que no tienen un valor agregado, labor que la tecnología actual

---

46 Application of the New Production Philosophy to Construction. Lauri Koskela. CIFE Center for Integrated Facility Engineering. Stanford University. 1992

nos facilita, ya que la integración de los sistemas computarizados en la construcción es ya una realidad y junto con los conceptos de automatización han generado las bases científicas del control y supervisión total de la construcción que mejoran los procesos de diseño, ejecución y producción.

La implementación de estos conceptos en la construcción ya ha empezado, un gran paso alcanzado es la integración de los procesos con los sistemas de cómputo. Esta integración ha facilitado la transferencia de la información, la transparencia de los procesos gracias a la visualización y simulación. Sin embargo algunos de estos conceptos se encuentran todavía en investigación en procesos de ensayo y error. Uno de ellos son la automatización la cual se debe enfocar en reducir las actividades sin valor agregado y perfeccionar los procesos.

Los nuevos conceptos de producción de materiales nanoestructurados nos prometen un futuro halagador con muchas posibilidades de perfeccionar los procesos y solucionar los problemas crónicos de la construcción. En procesos como el de fabricación de estructuras de acero ya se ha alcanzado aplicar la automatización y la robótica, y para los demás como el montaje, tenemos a nuestra disposición una serie de principios, métodos y técnicas que debemos asimilar y adoptar. Se nos plantea un paradigma que determinará el largo proceso de cambio tanto en la práctica como en los conceptos y teorías de la construcción.

### **5.2.1 La construcción de acero automatizada.**

La industria de la construcción debe preparar el camino para que sus sistemas incluyan la automatización de los procesos en un futuro inmediato. Ya existe la tecnología y los equipos necesarios para implementarlo, además la cada vez decreciente cantidad de oferta habitacional, junto con la seguridad que debemos procurar durante la construcción, y la calidad a ofertar, son invitaciones que deben apuntar y proporcionar la motivación para automatizar la construcción.

Dentro del proceso de construcción de una edificación habitacional con estructura de acero, encontramos que el punto neurálgico donde se incrementan los costos de las mismas es en el montaje y el ensamble, por los equipos y por que emplean mano de obra especializada. La fabricación de los elementos necesarios para estas estructuras han alcanzado hoy día superar los métodos artesanales para emplear medios de producción industrializados de alta precisión y calidad, garantizando que las propiedades intrínsecas de cada elemento sean las especificadas.

Son los procesos de ensamble y montaje de las estructuras de acero a los que se les exigen alta productividad, la solución a todos estos requerimientos nos condujo a plantear la automatización de dichas tareas con el objetivo primordial de plantear opciones y contribuir con el avance de tecnologías constructivas en acero, y sobretodo fiabilidad y seguridad para las personas que habitaran estos espacios. Automatizando estas tareas,

disminuimos los riesgos en la construcción y disminuimos los requerimientos de mano de obra calificada y experimentada, que resultan costosos.

Algunos de los tópicos que involucran la automatización de las estructuras de acero son: la aplicación de la robótica en el proceso de fabricación. El rastreo de materiales utilizando identificación con radio frecuencia mediante etiquetas y/o códigos de barras, el diseño de conexiones especiales que faciliten el ensamble, y efectúen un preensamble para minimizar las conexiones de campo, el control de los equipos de izado y de mando computarizado, posicionamiento global y sistemas de localización.

### **5.2.2 Edificios cibernéticos.**

Este término resulta ser a primera vista la materialización de las películas de ciencia ficción, pero no es así, es un término que se ha empezado a utilizar y que pueden ser la evolución de los ya conocidos “edificios inteligentes” que han integrado sistemas de control de temperatura, iluminación, transporte y comunicaciones entre otros. “En realidad son el resultado de diez años de trabajo de compañías encargadas del control de edificaciones, fabricantes de equipos y sistemas, proveedores de energía, servicios e ingenieros diseñadores preocupados por mejorar los procesos y reducir los costos<sup>47</sup>.”

Un Edificio Cibernético CBS, es definido como la configuración de multi sistemas que permiten la comunicación de información y funciones de control simultánea y lógica, en todos los campos, incluido el de la construcción misma del edificio, en los cuales se basan las Redes de Control y Automatización de Edificios (BACnet Building Automation and Control networks)<sup>48</sup>. Estos procesos de automatización incorporan entonces los sistemas constructivos del edificio, que aplican estos procesos desde el momento de su construcción; en el caso de las estructuras de acero el proceso se iniciaría desde la fabricación de dichos elementos estructurales.

El consorcio BACnet es un proyecto corporativo de investigación y desarrollo para ofrecer productos como: protocolos estandarizados de comunicación que permitan abiertamente el intercambio de información entre proveedores de energía, de los sistemas de control de energía, sistemas de control de fuego y detectores de humo, sistemas de seguridad, controladores de elevadores y proveedores de servicios. En cuanto al control propio de la edificación, la habilitación de tecnologías como detectores de fallas y métodos de diagnóstico, organigramas en orden jerárquicos para el control de tomas de decisiones, estrategias de operación para los edificios. En cuanto al diseño y construcción, la integración de tecnologías de dimensionamiento avanzadas, incluyendo sensores inteligentes multifuncionales, de rastreo de elementos y realidad virtual

---

47 Traducción de : Benefits and Cost of Research: A Case Study of Cybernetic building Systems. Robert E. Chapman. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD. March 1999, pag. 39

48 “BACnet: A Standard Communication Infrastructure for Intelligent Buildings.” Automation in Construction (Vol. 6). Bushby, Steven T. 1997.: pp. 529-540.

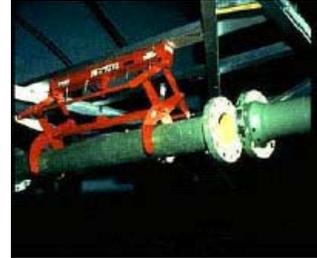
### 5.3 Sistemas y tecnologías para la automatización en la construcción.

#### 5.3.1 Fabricación automatizada de estructuras de acero.

Algo novedoso ocurre con la fabricación o transformación de esos elementos primarios en el esqueleto portante de una edificación, gracias a la integración del proceso de diseño y planos de taller con máquinas automatizadas que interpretan fielmente todas las especificaciones y limpian, cortan, perforan y unen todas las piezas con alta precisión y rapidez. En el área de fabricación de estructuras de acero ya se ha alcanzado cierta integración al incluir en los equipos utilizados tradicionalmente, sistemas CAD-CAN los cuales permiten obtener información de los planos de diseño y de taller previamente digitalizados, para realizar tareas de corte, ensamble y terminado de los componentes estructurales de acero, fiel reproducción de dichas especificaciones.



Fig. # 69 Automatización de procesos de fabricación.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
[www.bfrl.nist.gov](http://www.bfrl.nist.gov)



En la fabricación se especifica el prototipo de la estructura con el propósito de detallarlos, planificar su producción y elaborarlos como tal. Las piezas que integran sus ensambles se representan como una pieza estándar de acero, igual que su medio de unión que puede ser soldado o atornillado y su producción consistiría en hacer las adaptaciones necesarias como cortes, orificios y uniones con otras piezas.

Algunos expertos como el doctor Dr. Jim Ricles de la Universidad de Lehigh (Bethlehem, PA) ha lanzado propuestas acerca de la automatización de las estructuras de acero, en artículos como “Next Generation Steel Structures.”<sup>49</sup>, estableciendo las necesidades para implantar la automatización de las estructuras de acero. En su investigación ha analizado los requisitos estructurales para las conexiones, los actuales esquemas de estas, además de revisar el sistema de esqueleto portante en acero. En algunas de sus declaraciones

---

49 Ricles, J. and Schlafly, “Next Generation Steel Structures,” Automated Steel Construction Workshop, Gaithersburg, MD, 6-7 June, 2002.

sumariales para el taller sobre automatización auspiciado por “Building and Fire Research Laboratory of the National Institute of Standards and Technology”<sup>50</sup>, afirmo que “Los procesos de montaje de las estructuras para edificaciones no han evolucionado en los últimos 80 años, aunque los remaches fueron remplazados por tornillos y soldadura”

Adicionalmente planteamos la necesidad de automatizar el montaje y ensamble de las estructuras de acero, fijando las características requeridas en las próximas generaciones de conexiones viga columna automatizadas, entre ellos se destaca:

- Auto alineación: consiste en que la conexión debe ser capaz de guiar la viga hacia la posición exacta, acoplando todos los elementos localizados en la viga y la columna.
- Tolerancia: la conexión debe tener ciertas tolerancias que permitan corregir el alineamiento.
- Ajustado: debido a las tolerancias con que debe ser construida inicialmente la estructura, es improbable que la conexión este correctamente posicionada. Por consiguiente esta debe tener la habilidad de ser ajustada fácilmente.
- Rigidez, Resistencia y Estabilidad: La conexión debe ser lo suficientemente fuerte para transmitir las cargas, combinada con la rigidez suficiente para controlar las desviaciones. Además, debe ser lo suficientemente estable para permitir que continúe el montaje de la estructura hasta el último ensamble.
- Modularidad: La conexión debe permitir que sea producida en masa, con sistemas de sujeción estándar y con rápidas y automáticas ciclos de montaje.

La tarea de identificación de las piezas es importante. Es necesario reconocer cada elemento desde la etapa de diseño y etiquetarlo para que este se identifique durante todas las etapas. Uno de los sistemas que permite este intercambio es conocido como D/IT (design/information technologies) y permite controlar el tamaño y características de un elemento estructural en su etapa de fabricación, transporte, almacenamiento, montaje y ensamble.

Entre los sistemas que se utilizan para conseguir esta integración de procesos esta: el código de barras, integración de bases de datos, sistemas de dibujo en tres dimensiones, intercambio electrónico de datos. La integración de estos sistemas plantea la integración total y automatización de procesos lo cual fue designado como FIAPP y con los aportes de ellos en la construcción se busca primordialmente la reducción del tiempo de entrega de obra y la reducción de costos en el ciclo de vida de estas edificaciones.

### **5.3.2 Sistemas de lectura de códigos de barras adaptados al sitio de obra.**

La identificación de elementos estructurales por medio de código de barras es el sistema que más contribuye al proceso de automatización de la construcción. Se utilizo inicialmente en el ensamble de aviones pero hasta ahora se esta implementado su uso en

---

50 NIST, BFRL, Materials and Construction Research Division. [www.bfrl.nist.gov/861/CMAG/index.html](http://www.bfrl.nist.gov/861/CMAG/index.html)

la construcción de edificaciones, y especialmente sirve para identificar los elementos estructurales de acero.

Este sistema se convierte en el más factible de ser adaptado en nuestro contexto latinoamericano, de alguna manera ésta tecnología ya se utiliza en diversas tareas cotidianas como en la identificación de las mercancías en los supermercados gracias a su facilidad de implementación, ahorro de tiempo y bajo costo.

El uso de código de barras o UPC (Universal Product Code) se ha convertido en un método universal para la identificación de objetos. Adicionalmente los escáners utilizados en la lectura, nos pueden dar una estimación de dimensiones y características de los miembros estructurales como las vigas y columnas.

### **5.3.2.1 Rastreo de los elementos estructurales de acero en obra.**

El rastreo de los miembros estructurales en acero permite supervisar la correcta disposición de ellos y de sus correspondientes conexiones de acuerdo a los parámetros fijados desde el proceso de diseño.

Gracias a que los miembros estructurales prefabricados desde que son transformados en piezas estructurales llevan medios de identificación como etiquetas con código de barras o etiquetas para identificación por medio de radio frecuencia, que además de identificarlos nos presentan todas sus características contenidas en una base de datos.

Una de las instituciones involucradas con este tipo de tecnología NIST (National Institute of Standards and Technology), ha publicado sus avances acerca de este tema. Bajo el título de Automated Tracking Of Structural Steel Members At The Construction Site, por Karen M. Furlani y Lawrence E. Pfeffer, describen además un sistema llamado COMP-TRAK SYSTEM<sup>51</sup>, el cual integra todos estos medios y de su análisis podríamos tomar elementos tecnológicos que estén a nuestro alcance y que pueden contribuir en el diseño de un nuevo sistema constructivo. A continuación haremos referencia al funcionamiento y la descripción de este sistema.

El proceso se inicia con la coordinación en salida de los miembros estructurales de la fábrica, los cuales son embarcados en un orden preestablecido para agilizar aún más el proceso. Dichos elementos ya están etiquetados con códigos de barras y/o identificadores por radio frecuencia, que contienen además un código impreso para la lectura humana inmediata. Estas etiquetas contienen todas las especificaciones de cada elemento y son almacenados en una base de datos, de tal forma que al arribar al sitio de la obra, mediante una interfase sean escaneadas transfiriendo dicha información.

---

<sup>51</sup> Fulani, K.M, and Stone, W.C., "Architecture for Discrete Construction Component Tracking," Proceedings, 16th IAARC/IFAC/IEEE. International Symposium on Automation and Robotics in Construction, September 22-24, 1999, Madrid, Spain, pp 289-294.

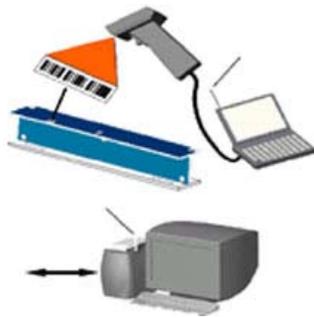


Fig. # 70. Hardware utilizado para el proceso de identificación.  
 Imagen tomada con fines académicos de:  
 Architecture for discrete construction  
 Component tracking  
<http://www.bfrl.nist.gov/>

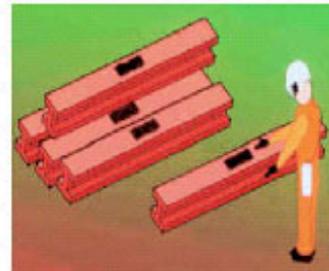


Fig. # 71. Lectura de códigos de barras.  
 Imagen tomada con fines académicos de:  
 Automated Part Tracking on the Construction Job Site.  
<http://www.bfrl.nist.gov/>

Una vez en el sitio de obra, una computadora móvil que debe incluir con dispositivos periféricos como escáner de código de barras y un dispositivo de coordenadas en 3-d de gran alcance, captura todos los elementos y los datos de ellos a los que se les puede continuar insertando datos acerca del mismo ítem escaneado.

Todos los computadores deben permitir una conexión a Internet, para comunicarse con la pagina web que brinda el servicio de identificación de coordenadas del sitio de obra, para complementar la información de cada ítem con coordenadas x,y,z, consiguiendo así que el servidor determine la posición y orientación en el sistema global de coordenadas del sitio de obra, e incluso pueda generar la visualización en tercera dimensión con su ubicación actual, como se muestra en la siguiente grafica:

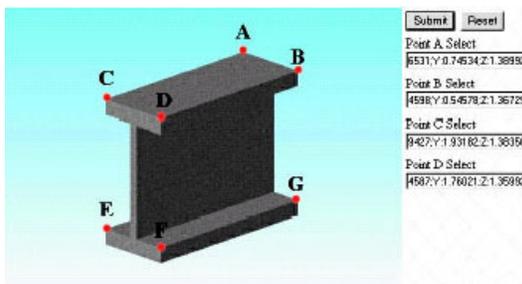


Fig. # 72. Visualización en 3-D del ítem estructural con sus características.  
 Imagen tomada con fines académicos de:  
 Automated Part Tracking on the Construction Job Site.  
<http://www.bfrl.nist.gov/>



Fig. # 73. Visualización en tiempo real.  
 Imagen tomada con fines académicos de:  
 Automated Part Tracking on the Construction Job Site.  
<http://www.bfrl.nist.gov/>

El inspector de campo proporciona la confirmación visual del elemento, determinando métricamente la fidelidad de la posición y orientación del mismo de acuerdo a holguras establecidas y calculadas con anticipación; la labor más importante es establecer la concordancia de las medidas y coordenadas del elemento en el sitio inicial dentro del área de obra, para que luego el servidor, utilizando una ecuación matemática diseñada

especialmente para ajustar la posición y orientación del elemento, procese está información con los datos y coordenadas del sitio de obra.

Esta información permite que por medio de otro agente automatizado llamado Virtual Site Simulator, se pueda visualizar en 3-D dicho elemento, el cual puede ser dispuesto en su lugar final y todo cambio será registrado por el servidor lo que agiliza la tareas de montaje y ensamble, ya que la información de cada ítem coincide con los planos finales, anexando información como los niveles y los miembros que deben estar adheridos a este en su destino final.

### **5.3.3 Montaje automatizado de estructuras de acero.**

#### **5.3.3.1 Intercambio electrónico de información para el montaje automatizado de estructuras de acero.**

La integración de los procesos de automatización depende de la comunicación entre el diseño y los sistemas que ejecutan estas órdenes. Es decir que las especificaciones definidas en la parte de diseño deben ser descritas mediante un lenguaje comprensible por los equipos automatizados, y viceversa, estos equipos deben tener la cualidad de describir de una manera comprensible el resultado real del proceso. Por lo tanto se debe implantar un lenguaje común estandarizado que integre todos los componentes del sistema para hablar el mismo lenguaje.

El instituto de la Construcción en Acero ha investigado acerca del desarrollo de este tipo de lenguaje y ha examinado el sistema “CIMsteel Integration Standards” (CIS/2)<sup>52</sup>, respaldado por el AISC (American Institute of Steel Construction) y, definido como un compilador y traductor, dentro del programa de intercambio electrónico de datos (AISC Electronic Data Interchange initiative)<sup>53</sup>, aplicado específicamente al montaje automatizado de estructuras de acero.

Para poder automatizar el montaje de las estructuras de acero se debe integrar todos los subsistemas, se necesita por lo tanto tener acceso a la descripción digitalizada de los miembros y de los ensambles previamente prefabricados, ofreciendo todas sus especificaciones, incluyendo su transporte al sitio de obra, proceso que debe ser coordinado y que debe coincidir con la secuencia en la que se ensamblaran los elementos estructurales, discriminar el tipo de unión que se utilizara para cada pieza, determinando su posición y orientación final para ensamblar todas las piezas en su sitio final, gracias a los equipos y sensores automatizados que facilitan además las tareas de supervisión al

---

52 Crowley, A.J., and Watson, A. S., CIMsteel Integration Standards Release 2, Vol.1-6, The Steel Construction Institute, Ascot UK, 2000. <http://www.cis2.org>

53 Hamburg, S. E., and Holland, M. V., Leaping Ahead with EDI, Modern Steel Construction, Vol. 39, No. 1, pp. 42-48, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, February 1999. <http://www.aisc.org/edi.html>

poder obtener información acertada acerca de cada elemento y de la totalidad de ellos conformando la estructura diseñada.

Con el intercambio de los datos presentes en cada código de barras, se puede avanzar con el montaje del prototipo estructural previamente especificado, tan pronto como los miembros y conexiones estructurales arriben al sitio de obra en un orden establecido, en donde el sistema coordina la localización de piezas individuales para ir conformando piezas estructurales cada vez mas grandes hasta conformar la estructura definida. Para coordinar precisamente que la estructura tenga las características definidas, el sistema utiliza un sistema de coordenadas referenciadas a un punto fijo de la obra o un sistema de posicionamiento global.

### **5.3.3.2 Reconocimiento visual digitalizado de elementos constructivos en el sitio de obra**

Actualmente en nuestro contexto los trabajos de construcción se realizan manualmente, y toda tecnología orientada al control y rastreo de elementos estructurales para agilizar las tareas es bienvenida. El reconocimiento digital de los elementos estructurales nos ayuda en estas tareas ya que nos permite determinar sus características físicas y diferenciarlos por su forma y dimensiones, nos permite además verificar su alineación y posición, lo cual es indispensable para conseguir la automatización de los procesos de montaje.

Su proceso es similar a la lectura de códigos mediante sensores ópticos, en donde un visor infrarrojo detecta la proyección del láser sobre el elemento estructural como vigas y columnas, produciendo un boceto del objetivo y saca un promedio de sus dimensiones. Para conseguir esto se necesitan sensores de imágenes como LADARs (laser distance and ranging devices) los cuales tienen la capacidad de recolectar datos de un sitio y generar imágenes en tercera dimensión, por lo tanto se usan para obtener en 2 o 3 dimensiones, series de valores como rango, intensidad y otras características de la obra con sus elementos.

Precisamente en la obra podemos encontrar diversos elementos, algunos con características predefinidas como los componentes estructurales y otros elementos cuya geometría no es definida, lo que dificulta su identificación y dimensionamiento. Este sistema tiene inclusive la capacidad de detectar estos elementos amorfos como arena o agregados para ser inventariados. Esto se logra gracias a que el sistema captura datos iniciales del sitio de obra, los almacena y computa obteniendo de ellos referencias como áreas, volúmenes y puntos clave para determinar la localización de objetos en el campo escaneado; luego representa estos datos gráficamente en planos.

“Actualmente este sistema se encuentra disponible y su funcionamiento se basa en la recolección de 4 tipos de información del objeto: su contexto, dos medidas angulares y la intensidad de la señal reflejada del objeto. Luego el sistema utiliza varios métodos

matemáticos para convertir estos datos en modelos tridimensionales del objeto dentro de la interpretación de la escena escaneada<sup>54</sup>.

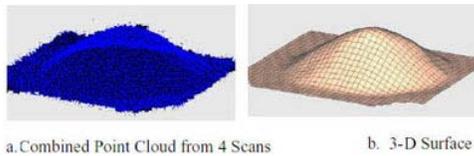
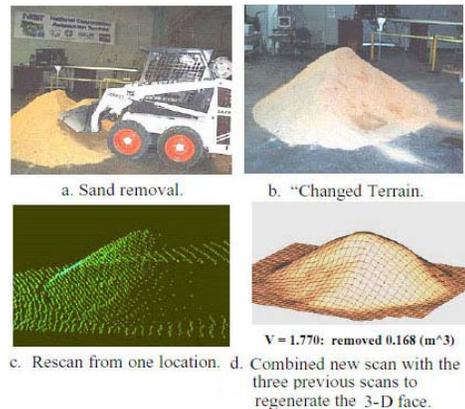


Fig. # 74. Actualización en tiempo real de los cambios y avance de tareas.  
 Imagen tomada con fines académicos de:  
 Laser Scanning For Construction Metrology  
<http://www.bfrl.nist.gov/>

Fig. # 75. Visualización de elementos en el sitio de obra por medio de sensores láser.  
 Imagen tomada con fines académicos de:  
 Laser Scanning For Construction Metrology  
<http://www.bfrl.nist.gov/>



El sistema nos brinda información actualizada y rápida acerca de los avances de obra y la captura automática de los componentes estructurales es supremamente importante para la supervisión de obra, ya que se obtienen datos precisos y en tiempo real sobre el como se esta construyendo a medida en que se avanza. Todo esto gracias al procesamiento de datos de todas las operaciones que se realizan a medida que estas ocurren, actividad muy complicada de conseguir si se emplean herramientas tradicionales de dimensionamiento y posición como los equipos topográficos, los cuales se hacían necesarios y debían permanecer constantemente en la obra para verificar el correcto posicionamiento de los componentes estructurales que pueden ser numerosos dependiendo de la magnitud del proyecto.

Hoy gracias a estos sistemas y al desarrollo de la tecnología láser podemos optimizar el rendimiento de la obra, minimizar el tiempo y personal dedicado a estas tareas logrando una perfecta coordinación entre las especificaciones de diseño y el desarrollo real. Los objetivos de este sistema son el de mejorar la velocidad y disminuir el tiempo dedicado a tareas como la de verificación del dimensionamiento y posicionamiento de las piezas, la realización un monitoreo constante sobre el estado de la construcción y de sus elementos estructurales y, sobre todo la supervisión del correcto montaje de las estructuras de acero, verificando la posición exacta de los componentes, sus niveles y holguras.

<sup>54</sup> Reconstructing Images of Bar Codes for Construction Site Object Recognition. David E. Gilsinn, Geraldine S. Cheok, Dianne P. O’Leary. 2National Institute of Standards and Technology (NIST).2000, pag. 1

### 5.3.4 Herramientas robotizadas.

Aunque siga sonando como ideas utópicas, desde hace varios años se viene hablando del uso de robots en la construcción mejorando los equipos y herramientas que utilizamos en la construcción ya que si buscamos implementar la automatización de estos procesos, debemos incluir a estas dentro del programa de implementación de esta tecnología. Además la actual tecnología permite que estos procesos se realicen con mayor precisión y calidad asegurando una total exactitud y confiabilidad del proceso.



Fig. # 76. Robots auto-construtores. Imagen tomada con fines académicos de: <http://www.bfirl.nist.gov/>

La industria aeronáutica ya ha implantado estos procesos automatizados para realizar el ensamble de las aeronaves, convirtiéndose en la industria pionera y, que sirve de ejemplo a la industria de la construcción para verificar la efectividad de estos sistemas.

Los fabricantes de aeronaves han conseguido la estandarización total de las piezas, las cuales están perfectamente identificadas y catalogadas y, gracias a su estricto control de calidad se consigue ensamblarlas con holguras insignificantes, tanto que se podría afirmar que no existen. Los sistemas implantados en los hangares coordinan entonces todo el proceso de ensamble de las piezas, y con sensores y visores láser ejecutan las correcciones necesarias, si encuentran un error en las especificaciones, dictan a los grandes equipos encargados de sujetar y desplazar las grandes estructuras las rectificaciones necesarias hasta obtener la integración total de toda la estructura y con ello la forma final que todos conocemos.

La integración de los equipos de construcción con instrumentos como escaners con visión láser se encuentran todavía en investigación. Uno de estos proyectos se adelanta en la Universidad de Lancaster con dos propuestas, una conocida como “LUCIE” (Lancaster University Computerised Intelligent Excavator)<sup>55</sup>, y otra construida por la empresa Construction Robotics Ltd. Conocida como Starlifter<sup>56</sup>, siendo éste último el que más puede ser adaptado al montaje de las estructuras de acero al permitir precisamente el izar las piezas.

Acerca de “LUCIE”, se puede decir que es un excavador autónomo que coordina su desplazamiento gracias a sistemas como GPS (Ground Positional System). Se viene trabajando en la seguridad de sus movimientos para lo cual se le ha implementado un

<sup>55</sup> Data Interpretation From Leuze Rotoscan Sensor For Robot Localization And Environment Mapping. D. W. Seward, S. D. Quayle, K. Zied, C. Pace. Engineering Department, Lancaster University, Lancaster, 2002, p. 2

<sup>56</sup> Ibid., p. 2

censur óptico “Rotoscan”<sup>57</sup> que consiste en una delgada unidad láser que puede abarcar un área de escaneado de entre 90° hasta 180° y un rango de detección hasta de 25 metros lo cual sirve para que descubra los obstáculos y posiblemente su propia localización, asimismo que permite una visualización del contexto donde trabajara.



Fig. # 77. Robot afinador de concreto.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Development of a Robotic Structural Steel Placement System



Fig. # 78. Robot soldador.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Development of a Robotic Structural Steel Placement System  
<http://www.bfrl.nist.gov/>

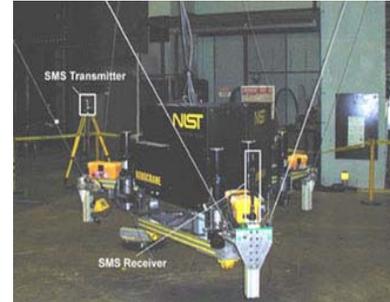


Fig. # 79. Robotcrane.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
Development of a Robotic Structural Steel Placement System  
<http://www.bfrl.nist.gov/>

Una de las herramientas que contribuye enormemente en la automatización del montaje de estructuras de acero puede ser el “Starlifter robot” propulsado por un sistema hidráulico, que cuenta con 6 brazos independientes los cuales pueden ser ancladas fijamente en distintas posiciones generando una plataforma estable que permite desplazar grandes pesos de hasta 200 Kg. en cualquier orientación.<sup>58</sup>

### 5.3.4.1 Sistemas robotizados para el montaje de elementos estructurales de acero.

La automatización de las estructuras de acero es quizás la técnica que proyecta un mejor porvenir para la industria de la construcción, ya que todos los agentes que intervienen en ella han enfocado sus esfuerzos e investigaciones para mejorar la velocidad de construcción con la cual se busca generar los mejores beneficios en todos los aspectos. Fue precisamente “el Instituto Americano de Construcción en Acero (American Institute of Steel Construction AISC), la entidad que ha manifestado la necesidad de reducir en un 25% el tiempo de montaje de estructuras de acero”.<sup>59</sup>

Tratando de responder a estos requerimientos el Grupo de automatización y metrología de la construcción (Construction Metrology and Automation Group), el cual pertenece al

57 Seward. Op. cit., p. 2

58 K. Zied, D. Seward, J.Riehl, A. Dolman: ‘The Development of a Robotic System for Tool Deployment in Hazardous Environments’, Proceedings of the 17th ISARC, Taiwan, 2000.

59 Traducción de: “Development of a Robotic Structural Steel Placement System”. Alan M. Lytle, Kamel S. Saidi, and William C. Stone. Official contribution of the National Institute of Standards and Technology (NIST); not subject to copyright in the United States.

NIST, ha desarrollado herramientas para mejorar la velocidad en el montaje de estructuras de acero, reforzando al igual las normas de seguridad para los obreros y la confiabilidad de los equipos. En este proyecto de colocación de miembros estructurales de acero conocido como ASCT (Automated Steel Construction Testbed), se integraron otros sistemas de los cuales ya se ha hecho referencia para ser aplicado específicamente en el ensamble de miembros estructurales de acero. Entre los sistemas integrados tenemos el empleo de grúas robotizadas, rastreo de elementos y visualización en tercera dimensión, y sistemas de dimensionamiento con rayos láser conocido como SMS (laser-based site measurement system) utilizado para planear y controlar la trayectoria.

El sistema ASCT, fue ensayado en el ensamble de una viga de acero conectada a dos columnas entre ella, utilizado como medio de unión conectores rápidos como el ATLSS conector<sup>60</sup> el cual no requiere ser soldado ni atornillado. El proceso se inicia entonces con la toma de referencias de los miembros ubicados en el sitio de obra, gracias a 4 transmisores láser ubicados en el perímetro de la obra, con la lectura de los SMS se crea un modelo digital de todo la escena de obra, incluyendo obstáculos. Luego el modelo inicial se actualiza con la posición de los miembros estructurales a conectar, identificándolos por medio de los códigos de barras y estableciendo sus medidas y posición, en este caso las columnas a las cuales será conectada la viga que debe ser izada por la robotcrane. Esta grúa robotizada calcula sus movimientos y posición por medio de los sensores SMS, transformando estos cálculos en movimientos para recoger el objetivo y desplazarlo al lugar establecido realizando la conexión respectiva. Gracias a la realidad virtual todo este proceso e información esta disponible para los operarios en un terminal en tiempo real para facilitar las tareas de supervisión.

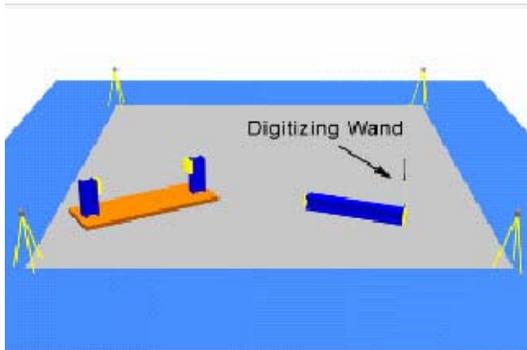


Fig. # 80. Reconocimiento del sitio de obra con los elementos estructurales a ensamblar.  
 Imagen tomada con fines académicos de:  
 Development of a Robotic Structural Steel Placement System  
<http://www.bfrl.nist.gov/>

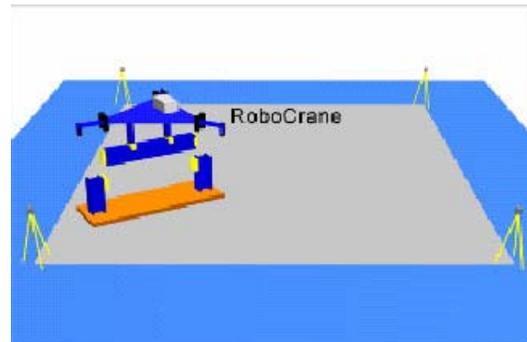


Fig. # 81. Visualización en 3-D y ensamble estructural mediante la robotcrane.  
 Imagen tomada con fines académicos de:  
 Development of a Robotic Structural Steel Placement System  
<http://www.bfrl.nist.gov/>

Este proceso plantea la posibilidad de autonomía en el ensamble de elementos estructurales de acero, realizando todas las tareas ya que recoge la pieza estructural, la

60 Fleischman, R., Viscomi, B.V., and Lu, L.-W., "Development, analysis and experimentation of ATLSS connections for automated construction." Proc., 1st World Conf. On Steel Struct., Acapulco, Mexico, 1992.

desplaza a su posición final y realiza la conexión respectiva. Este proceso requiere sin embargo, del control y supervisión humano, ya que se requiere de una comprobación inicial de medidas y del modelo inicial del sitio de obra.

Aunque los resultados fueron satisfactorios, es necesario perfeccionarlo ya que la estructura empleada para sus ensayos era relativamente sencilla comparada con lo compleja que resulta la estructura de una edificación con grandes cantidades de miembros estructurales y conexiones entre estos.

#### **5.3.4.2 Los impactos económicos de la integración de sistemas y tecnologías de automatización en la construcción.**

Es importante entonces que se evalué el impacto económico que tendrá la automatización de la construcción. Todavía en Estados Unidos apenas se está avanzando sobre este tema con resultados satisfactorios, aun más si tenemos en cuenta que tradicionalmente la nueva tecnología es costosa, hasta que la industria logre perfeccionar sus medios de producción consiguiendo así la disminución de los costos, de lo cual se puede afirmar que la variable tiempo juega un papel principal para que los costos se abaraten y se consiga una total aplicación de estos sistemas.

Los investigaciones acerca de este tema nos brindan un ejemplo de los beneficios que podríamos obtener al aplicarlos, aunque nuestro contexto latinoamericano es distinto, una transferencia tecnológica de algunos de sus procesos actualmente es posible y su estudio económico de impacto puede ser similar al Americano. Uno de estos estudios se titula “Impacts of Design/Information Technology on Building and Industrial Projects”, realizado por Stephen R. Thomas, Candace L. Macken, and Sang-Hoon Lee, para el CII Construction Industry Institute, en Octubre de 2001, de dicho estudio podremos concluir y tomar algunos datos claves sobre el impacto económico de esta tecnología.

Dicho estudio arrojo resultados significantes e interesantes como la correlación entre el uso de esta tecnología y sus beneficios. En general los proyectos que más la utilizaron reportaron un mejor desempeño y para los propietarios podría haber un mayor beneficio.

El resultado de este estudio estableció el beneficio en el uso de diseño e información tecnológica para propietarios y constructores de acuerdo a datos recopilados por “CII Benchmarking database”<sup>61</sup> entre 1997 y 1999. Para ambos propietarios y contratistas podrían estimar ahorros de aproximadamente entre el 2.1 y el 1.8 % de los costos totales del proyecto respectivamente. Para los propietarios, había evidencia de ahorros de hasta el 4% del costos de construcción si aumentaban el uso de estos sistemas. Lo más importante es que se hizo evidente la disminución en los tiempos de programación de obra, lo que evidencia la mayor velocidad de construcción, uno de los objetivos de nuestro propuesta.

---

61 Impacts of Design/Information Technology on Building and Industrial Projects”. Stephen R. Thomas, Candace L. Macken, and Sang-Hoon Lee. CII Construction Industry Institute, Octubre 2001. pag. v.

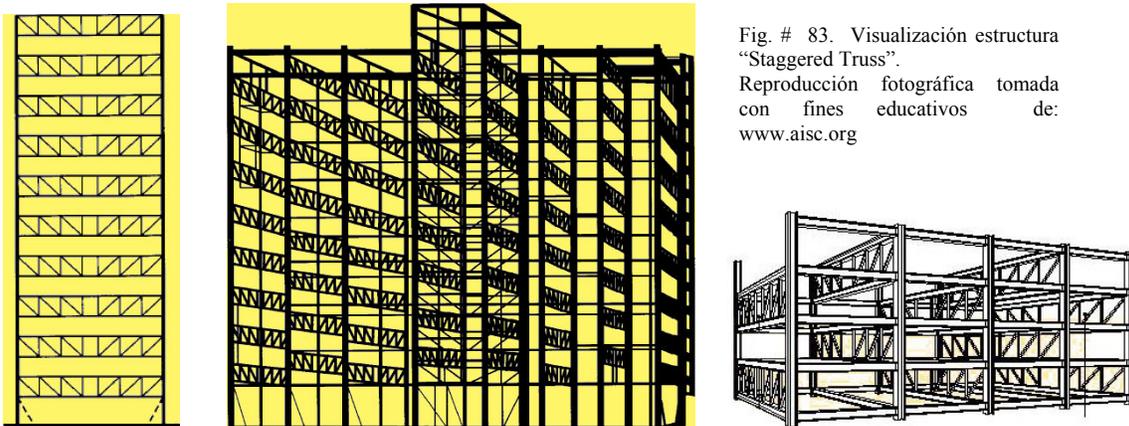
El tamaño del proyecto es el factor más importante para determinar el grado de uso de estas tecnologías. Cuando se trata de un proyecto de gran envergadura su utilización se justifica debido a la cantidad de ítems y de conexiones que se deben supervisar. A medida que los costos de implantación de esta tecnología sean accesibles, lo cual depende del tiempo, se puede incrementar el uso en pequeños proyectos.

## 5.4 Innovación Estructural Para Edificaciones Habitacionales Sistema “Staggered Truss”

### 5.4.1 Celosías Alternadas. Por William J. Lemessurier.

Una de las más profundas innovaciones en el campo estructural lo constituye el trabajo realizado por el investigador William J. Lemessurier, con la invención del sistema de celosías alternadas o STAGGERED TRUSS. El objeto de su propuesta consistía en proporcionar un nuevo y eficaz sistema estructural de acero que también proporcionaría beneficios arquitectónicos como la ligereza de su peso y espacios libres de columnas.

Los grandes resultados obtenidos con esta opción estructural en acero la convirtieron en la competencia del concreto y de los diseños tradicionales en acero estructural; desde entonces se ha usado subsecuentemente en una variedad de edificaciones de media altura, entre 15 a 20 pisos de altura, destinadas a edificaciones habitacionales, incluyendo hoteles y moteles.



El elemento básico del sistema lo constituyen las celosías o cerchas de altura igual a la del entrepiso, que se extienden transversalmente cubriendo en su totalidad el ancho de la edificación, y verticalmente en una alternancia sobre las líneas de columnas. Este sistema se caracteriza por permitir grandes espacios libres de elementos estructurales, la

disminución del peso total de la estructura y un fantástico comportamiento frente a fuerzas laterales de torsión como el viento.



Pese a que fue desarrollado ya hace 4 décadas en un programa de investigación durante los años sesenta en el Instituto de Tecnología de Massachussets, MIT, el sistema no ha perdido su vigencia y utilidad en nuestros días. Por el contrario es la época de su renacimiento, gracias a su perfecta integración y balance entre costos y eficiencia, al combinar el uso de perfiles tubulares en acero con sistemas de entrepiso como placas prefabricadas de concreto, reiteradamente otro sistema conocido como “guirder slab”, y el “steel deck”, con todas sus novedades como el sistema de doble lámina colaborante o “two way steel deck”.

Con esta integración tecnológica este sistema nos brinda calidades espaciales inmejorables como es la de alcanzar grandes espacios libres de columnas, por ejemplo si usamos un sistema de losas prefabricadas de concreto conjuntamente con las celosías alternadas, podríamos cubrir distancias hasta 10 mts (30 pies) sin requerir soportes con vigas intermedias, debido a que ellas son pre-esforzadas en la fábrica, y pesan hasta un 30 % menos que las losas de concreto fundidas en sitio.

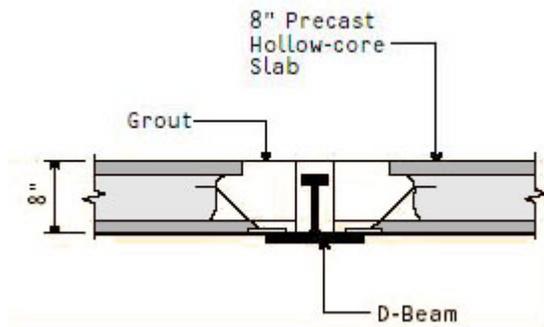


Fig. # 84. Entrepisos utilizados por Sistema “Staggered Truss”. Guirder slab.

Reproducción fotográfica tomada con fines educativos de: [www.aisc.org](http://www.aisc.org)

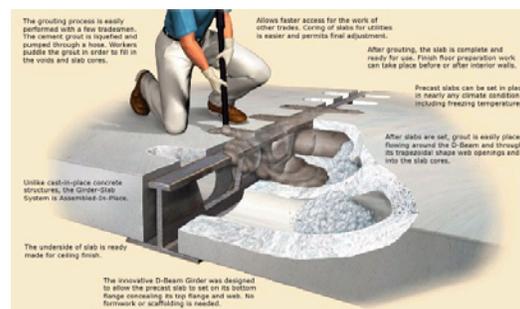


Fig. # 85. Entrepisos utilizados por Sistema “Staggered Truss”. Guirder slab.

Reproducción fotográfica tomada con fines educativos de: [www.aisc.org](http://www.aisc.org)



Fig. # 86. Entrepisos utilizados por Sistema "Staggered Truss". Two way steel deck

Reproducción fotográfica tomada con fines educativos de: [www.aisc.org](http://www.aisc.org)

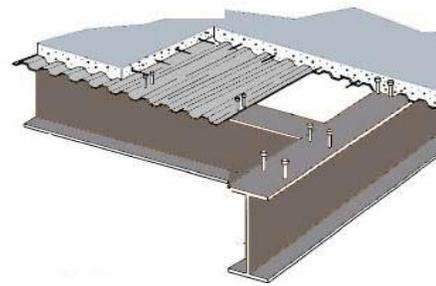


Fig. # 87. Entrepisos utilizados por Sistema "Staggered Truss". Steel deck.

Reproducción fotográfica tomada con fines educativos de: [www.aisc.org](http://www.aisc.org)

### 5.4.2 La maximización de la geometría, su principal avance.

El sistema "staggered truss" usa la geometría para reducir el peso de la estructura de acero, comparada con la construcción convencional de pórticos con columnas y vigas aún de acero.

La especial geometría del sistema staggered truss, permite un constante ir y venir de las cargas vivas que afectan la edificación. Una vez resuelta la transmisión de las cargas gravitacionales, las cargas laterales se transmiten a través de los entrepisos a los cordones superiores de las cerchas, la cuales actúan como muros estabilizadores, permitiendo que la cargas continúen su viaje de descenso por medio de sus elementos internos (diagonales y paralelos) hasta llegar al cordón inferior de esta. Debido a la alternancia vertical de las cerchas, no dispone la continuidad de estas, consecuentemente las cargas una vez alcanzan el cordón inferior de una celosía, deben continuar su desplazamiento por medio del sistema de entrepiso hasta encontrar el cordón superior de la celosía adyacente, de esta manera las fuerzas laterales son transmitidas atrás y delante por todo el sistema hasta alcanzar los cimientos de la edificación.

### 5.4.3 Sencillez en el diseño.

El diseño y la construcción de estructuras de acero para edificaciones habitacionales con el sistema de celosías alternadas son más sencillos que con los sistemas tradicionales en acero, puesto que los elementos son simples y tienen menos necesidad de conexiones y de pórticos, adicionalmente la mayoría de los detalles son repetitivos, disminuyendo aun menos planos de detalles.

Sin embargo se debe pensar bien sobre las exigencias asociadas con este sistema. Por ejemplo, debido a que los pórticos crean ejes de muros que no están alineados desde un piso a otro, es decir que la continuidad vertical de los elementos es alternada, los cuerpos

de las columnas deben estar independientes de las cerchas. Las instalaciones mecánicas, eléctricas e hidráulicas necesitan que se les haga acotaciones apropiadas en los planos arquitectónicos.

Con el renacimiento de este sistema, nuevos recursos para su diseño fueron implementados, buscando solucionar las pocas fuentes documentales que habían estado disponible para su uso, diseñadores interesados han venido trabajando en remediar esa situación, y gracias a las publicaciones del AISC, con Neil Wexler, presidente de la firma de Ingeniería Estructural de New York City-based Wexler and Associates; quien es el autor líder de la nueva guía para incorporar el sistema “staggered truss” en el diseño de edificios.

Estas publicaciones están orientadas para ayudar a los diseñadores y familiarizarlos en las técnicas necesarias para una correcta utilización de este sistema, publicando recientemente una guía de diseño para edificios con el sistema “staggered truss”. El manual está basado en técnicas desarrolladas por compañías que se han beneficiado al usarlo, Su metodología de diseño incorpora estrategias para el ahorro de tiempo durante los 3 estados del diseño estructural del mismo. 1) Diseño preliminar general de la estructura para establecer la fuerza de gravedad, del viento, y sismo; 2) cálculos manuales para dimensionado preliminar de miembros; y 3) análisis computarizado y revisión final.

El sistema “staggered truss” principalmente responde a los requerimientos de los usuarios actuales que buscan el gran espacio interior libre de columnas y el gran potencial de ahorro económico que este sistema puede proveer. De aquí que el uso más apropiado del sistema es en áreas de tipo residencial, que incluye apartamentos, hoteles, enfermerías y dormitorios, según Wexler, se puede considerar este sistema para cualquier edificio de este tipo que tenga al menos 6 pisos; lo cual se convirtió en una de las principales razones por la que nos definimos por utilizar este sistema para nuestra propuesta.

#### **5.4.4 Fabricación.**

Hoy la mayoría de los elementos estructurales que componen este sistema son diseñados con perfiles tubulares estándar (HSS), tanto para los miembros verticales y diagonales debido a que son más eficientes estructuralmente y fáciles de fabricar que los perfiles tipo C que se utilizaban en el pasado. Las celosías están fabricadas para responder a la acción de las cargas muertas y son transportadas a la obra, almacenadas y ensambladas en una sola pieza antes de ser izadas e instaladas en su lugar.

La fabricación de este tipo de estructura puede ser encomendada a cualquier empresa involucrada y familiarizada con el trabajo en acero, siempre y cuando cumpla con los certificados de calidad respectivos, especialmente en soldadura, al ser este el método de unión más utilizado para la confección de las uniones.

Las columnas pueden especificarse en cualquier tipo de perfil estructural que satisfaga las condiciones de cálculo. Sin embargo, para facilitar aún más el ensamble de todas las piezas, es recomendable que se hagan en perfiles tubulares, obteniendo los beneficios de estos, e incrementando su resistencia y protección contra el fuego, llenándolos de concreto una vez estén instalados en su lugar final.

#### 5.4.5 Montaje.

Este sistema resulta en nuestros días una alternativa muy eficiente y más económica debido a que es de fácil erección, su sistema de entrepisos es más flexible permitiendo economizar tiempo y dinero, y una vez terminada la edificación ésta puede ser fácilmente renovada en su diseño para adecuarla a los requerimientos del cliente



Fig. # 88. Equipo tradicional de montaje.

Reproducción fotográfica tomada con fines educativos de: [www.aisc.org](http://www.aisc.org)



Fig. # 89. Montaje tradicional de elementos.

Reproducción fotográfica tomada con fines educativos de: [www.aisc.org](http://www.aisc.org)

Para el montaje tradicional de estructuras con este sistema estructural, se requieren grúas con la capacidad de izar hasta 20 toneladas para edificios de hasta 20 pisos, y se efectúa secuencialmente piso a piso, debido a la inestabilidad temporal por no tener todos los elementos integrados. Nuestra propuesta busca solucionar esta deficiencia, aportando la integración de nuevas tecnologías de montaje que ya describimos antes y que seguramente se convertirá en la novedad de nuestro sistema.

#### 5.4.6 Estructura liviana.

La disminución del peso de la estructura es otro de sus beneficios, ya que las cerchas son diseñadas y calculadas para asumir y transmitir las cargas de dos pisos a lo largo de todo el ancho, por lo tanto sus miembros proveen la suficiente rigidez lateral, gracias a su geometría, sin necesidad de incrementar el peso de la estructura debido a las fuerzas laterales, y a la interacción con el sistema de entrepiso, el cual provee la suficiente resistencia y rigidez para asumir las cargas gravitacionales y laterales.

Adicionalmente, debido a que el número de columnas requeridas es altamente reducido, los diseños de “staggered truss” han alcanzado reducciones en el peso del acero, tan bajas de hasta 5 libras por pie cuadrado, comparados con 8 a 9 libras por pie cuadrado en los sistemas típicos de pórticos de acero. Pocas columnas se traducen en disminución en el tamaño de las cimentaciones, el uso de menos concreto y una rápida finalización de la construcción

#### **5.4.7 Flexibilidad y fácil asimilación de las cargas actuantes.**

El principal beneficio estructural del sistema lo constituye la alta resistencia a las cargas laterales, sobretodo las que actúan paralelamente al eje de las celosías, ya que la geometría del edificio, generalmente dispuesta en largos y delgados edificios rectangulares, son asumidas con facilidad y resuelven el problema de contrarrestar las fuerzas que como la del viento, actúan sobre la mayor superficie teniendo que ser asumida por la menor dimensión del edificio, es decir por el eje más débil. El sistema permite distribuir todas las cargas por toda la estructura evitando de esta manera que se volteé el edificio.

Las Celosías son de tipo Pratt, y se extienden a lo ancho del edificio localizándose en los muros divisorios. De forma zigzagante, se alternan de piso a piso, constituidas por líneas de paralelos conectados por diagonales, de manera que la barra inferior de una celosía se alinea con la barra superior de la siguiente. Esta particular disposición provee áreas libres de columnas tan grandes que alcanzan entre los 18 y 21 mts (60 a 70 pies); desbordantes si se compara con el espaciamiento típico de columnas en un sistema de concreto estructural que alcanza los 5.50 mts (18 pies), abusando de la altura de las vigas con unos peraltes muy grandes como lo vimos anteriormente; aún es superior si se compara con la construcción convencional de pórticos en acero, que alcanza entre los 7 y 9 mts (25 a 30 pies).

Las celosías se apoyan en sus extremos sobre columnas apostadas en filas longitudinales exteriores, las cuales también se disponen en un modelo alternado entre las celosías y las líneas de columnas adyacentes. Las cargas gravitacionales se transmiten a través de las losas de entrepisos las cuales conectan el cordón superior de una celosía con el cordón inferior de la celosía adyacente. Por consiguiente, cada celosía está cargada en sus cordones superior e inferior, transfiriendo la carga total del edificio a las columnas exteriores del edificio.

Debido a la estricta circulación que siguen las cargas desde el entrepiso a los cordones de las cerchas, las columnas no se ven sometidas a la torsión en su sección transversal, y el movimiento de la estructura en este sentido es asumido por la placa, la rigidez de la celosía y la sección transversal de la columna, por lo cual, estas se deben orientar con su eje menor paralelo al eje longitudinal del edificio, para que las columnas se puedan unir a

las vigas principales y conformar marcos que resistan las cargas laterales en el sentido longitudinal del edificio.

La reducción en el número de columnas, comparada con el pórtico de acero tradicional, también reduce el tiempo, y el costo de la protección del acero contra el fuego. Comúnmente los ahorros adicionales se incrementan debido a que permite usar ambos, el concreto premoldeado y el acero prefabricado, que proveen la oportunidad de incrementar la competitividad.

#### 5.4.8 Grandes espacios libres de elementos estructurales.

La ventaja principal entonces de usar el sistema consiste en la habilidad de crear grandes espacios libres de elementos estructurales sin la restricción de incrementar la altura del entrepiso. La mayor desventaja del sistema consiste en la existencia del cruce de los miembros diagonales de la celosía a lo largo el espacio, pudiendo obstaculizar la circulación y la integración espacial que requieren algunas de las funciones inherentes al habitar. Para superar este problema, los creadores del sistema incluyeron unos marcos estructurales tipo Vierendeel, dentro del tablero de la celosía permitieron la disposición de corredores para pasar a través de ellos.



Fig. # 90. Tablero Vierendeel dentro de celosía.

Reproducción fotográfica tomada con fines



Fig. # 91. Doble abertura Vierendeel dentro de celosía.

Reproducción fotográfica tomada con fines educativos de: [www.aisc.org](http://www.aisc.org)

El incluir los tableros Vierendeel dentro de la celosía, generó la aparición de fuerzas de pandeo, lo cual puede producir el torcimiento de los miembros de la cercha, penalizando el diseño con un aumento de los miembros estructurales de acero, y por ende, en el peso total. Para minimizar este efecto, los creadores del sistema establecieron la ubicación de los tableros Vierendeel en el centro de la cercha ya que en este sitio el torcimiento es el menor.

Gracias a que este sistema aplica el principio de asumir las cargas gravitacionales y laterales usando los mismos elementos, resulta ser el sistema más económico y flexible en términos arquitectónicos, su comportamiento ha sido ampliamente comprobado y su uso se ha garantizado y certificado por entidades como el AISC, y otras entidades gubernamentales de Estados Unidos.

#### **5.4.9 Beneficios del sistema “Staggered Truss”.**

Ahorros en el costo se obtienen por la esbeltez de la estructura de construcción y por lo pequeño que resultan las cimentaciones. La necesidad de aplicar protectores contra el fuego se reduce, ahorrando tiempo y costo. Las placas de piso pre-fabricadas proveen un acabado de piso y cielo raso en una sola operación, sin más sobrecostos para el terminado de la superficie de piso.

El sistema Staggered truss es una solución viable para reducir la alturas de cada piso. Típicamente se alcanzan 2.68 mts (8 pies con 8 pulgadas de altura) de altura incluyendo todos los elementos estructurales

Se incrementa la flexibilidad de diseño gracias a la libertad de disponer los elementos sin restricciones estructurales. Al requerir pocas columnas se permite más flexibilidad en planta de piso, especialmente en el primer piso del edificio, ofreciendo grandes espacios libres de Columnas tan grandes como 18 mts (60 pies) en cada dirección lo cual se traduce en columnas solo en el perímetro de la estructura.

Más rápido de izar y terminar la estructura que con concreto. La reducción del peso de la misma, lo cual se traduce en ahorros en la cimentación. La posibilidad de elevar las celosías ya armadas acelera la construcción y permite que otras tareas inicien su labor pronto.

Debido a que las cargas verticales están concentradas en pocos puntos, menos elementos de cimentación son requeridos. Una buena calidad de placas de concreto puede brindar el acabado de plafón y permite tipo de acabado seco para el piso.

La programación de obra también se ve mejorada por que no es necesario esperar para empezar otras tareas exceptuando la de cimentación, ya que una vez se han izado dos pisos es factible iniciar otras labores como la de fachada, muros de división. Las tareas que implican áreas húmedas son prácticamente eliminadas.

La resistencia contra el fuego es otra ventaja. La localización de las cerchas de acero en los muros divisorios hace más eficiente esta operación, debido a que estas quedan totalmente incluidas dentro de ellos, lo suficiente para que el rango requerido de protección sea aceptable y sea terminado por los tableros de los muros.

### 5.4.9.1 Ejemplos sobre su utilización.

El primer y gran uso del sistema “staggered truss” en New York City fue en 1986 con las Towers on the Park, un complejo de 29 pisos que contienen 599 apartamentos.

Un proyecto reciente del sistema “staggered truss” fue the Embassy Suites Hotel en Battery Park City. El grupo de diseño del proyecto incluye a Perkins Esatman Architects y como ingeniero estructural a Thornton-Tomasetti Engineers.

El uso del sistema estructural en acero “staggered truss” ha demostrado, con ejemplos específicos tales como Embassy Suites Hotel, el “Trump Taj-Mahal” en Atlantic City, “the Renaissance Hotel” en Nashville, y “The Aladdin” in Las Vegas, ser la mejor opción constructiva para las edificaciones habitacionales dentro de un rango de 5 a 20 pisos con un gran potencial de ahorro económico.



Fig. # 92. Embassy Suites Hotel.  
Reproducción fotográfica tomada con fines educativos de:  
Architectural Record Magazine.

Fig. # 93. Clayton Park Apartments, NY,  
Reproducción fotográfica tomada con fines educativos  
de: [www.aisc.org](http://www.aisc.org)



Half Moom Harbor, un nuevo edificio de 12 pisos de apartamentos en North Bergen, N.J, del cual Wexler fue el ingeniero estructural, es un ejemplo de los beneficios del diseño con “staggered truss”. Este Sistema permitió que Edgewater, N.J.-based Cybul and Cybul Architects diseñaran espacios generosos libre de columnas. Barrett Companies of Fort Lee, N.J., seleccionaron el sistema “staggered truss” basados en el análisis de costos / beneficios que también consideraron en sistemas tradicionales, incluyendo concreto fundido en sitio y pórticos de acero. El peso total tan ligero del sistema “staggered truss” fue particularmente benéfico para reducir requerimientos en la cimentación.

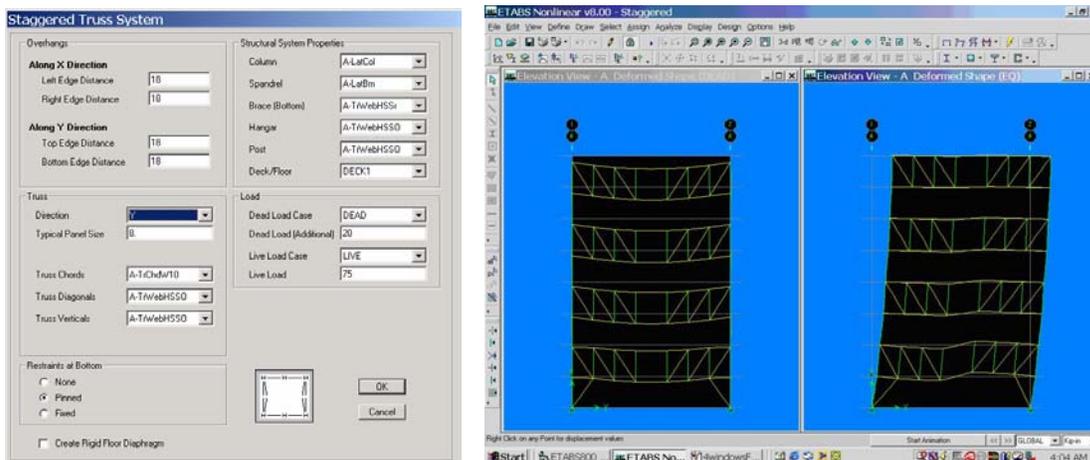
Wexler también fue el ingeniero estructural del recientemente terminado Mystic Marriot Hotel and Spa en Groton. El análisis realizado por el grupo de diseñadores del proyecto determinó que el sistema ofrecía múltiples ventajas. Produjo flexibilidad para el New York City-based Brennan Beer Gorman/Architects en el diseño de ambos, los espacios públicos y las habitaciones de los huéspedes. El sistema “staggered truss” eliminó la necesidad de vigas intermedias en el segundo piso, arriba de las áreas publicas del hotel.

Las 2600 habitaciones, en los 38 pisos del Aladin Hotel en las Vegas fue la primera estructura de acero, y el primer hotel con el sistema staggered truss que fue construido en la capital de apuestas de Nevada, en donde los pórticos de concreto son la norma. Una súper estructura de concreto fue originalmente contemplada para el Aladdin, de acuerdo con el representante del propietario el New York City-based Tishman Realty and Construction Co. Pero vinieron objeciones sobre el precio tan alto, proponiendo inmediatamente una investigación sobre alternativas en el diseño. El costo del plan de una staggered truss propuesto por SMI-Owen Steel Co., Columbia, S.C., fue más que un 10 % menos que el plan de pórticos de concreto.

El ingeniero estructural de Boston-based McNamara/Salvia Inc. Fue consultado por SMI-Owen. Principalmente Robert McNamara dice que el sistema staggered truss ayudó a integrar la torre del hotel con sus áreas de funcionamiento, las cuales están localizadas abajo del sexto piso. Pórticos de acero también facilitaron la adicción de refuerzo estructural que llegó a ser necesaria cuando una piscina que no era parte del diseño original fue añadida y ubicada en la cubierta de una sección medio baja del hotel.

### 5.5 Software especializado para el Sistema Staggered Truss. ETABS.

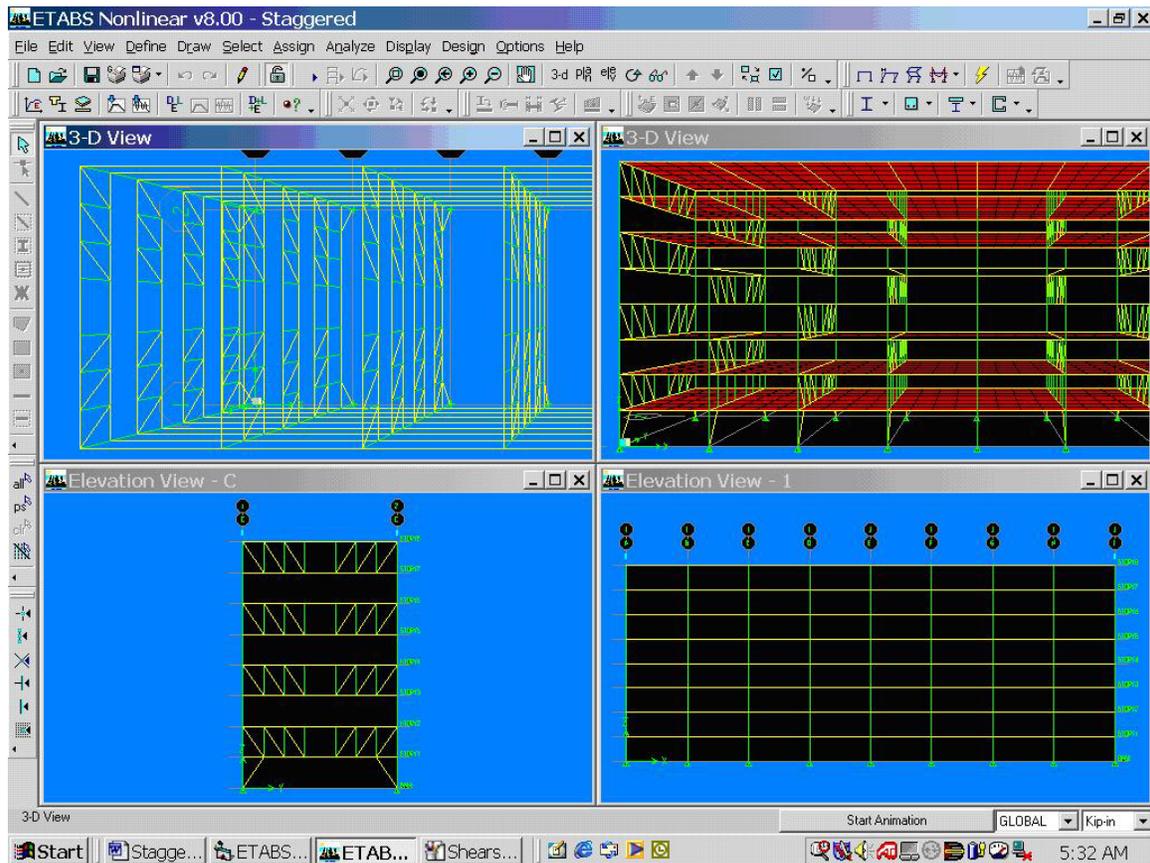
Una vez estamos familiarizados con los conceptos que se aplican en este sistema, podemos utilizar cualquier programa que permita el análisis y modelado de estructuras. Sin embargo la firma especializada en el diseño de Software para estructuras, Computers and Structures, Inc., con sede en Berkeley, California; lleva aproximadamente 30 años con el desarrollo de programas estructurales, ha incursionado en el campo de los sistemas estructurales utilizados en edificios habitacionales, uno de ellos se ha especializado entre otros en el sistema de celosías alternadas, conocido como Integrated Analysis, Design And Drafting Of Building Systems; ETABS<sup>62</sup>.



62 Computers and Structures, Inc., Berkeley, California. 2003

ETABS contiene una interfase que permite crear eficientemente un modelo Staggered Truss con todas las especificaciones que este sistema requiere, permitiendo generar automáticamente un modelo tridimensional con todos los aspectos de análisis y diseño, además del comportamiento de este para hacerlo mas eficiente.

El programa ETABS, permite modelar una edificación de múltiples pisos, en dos dimensiones gracias a su opción de dibujo, o en tres dimensiones generándola automáticamente. Este modelo inicial nos servirá como base para incorporar cualquier condición especial de la edificación, no importa lo complejo que estas sean, gracias a que el programa también incluye una poderosa herramienta de edición.



Gracias a todas estas herramientas, este programa nos facilita la tarea de diseño de un sistema estructural con los principios inherentes al Staggered Truss, sobretodo si todavía no nos hemos familiarizados con estos principios, además no se requiere que se especifiquen los miembros estructurales a considerar, ya que el programa incluye una amplia gama de elementos además de los códigos y manuales que se deben cumplir; de tal modo que basta con oprimir la propiedad de auto selección, obteniendo como resultado los que se aproximan a las directrices que definimos con anterioridad.

De esta manera el modelo conseguido con ETABS responde fielmente a todos los conceptos geométricos que el Sistema Staggered Truss promulga, por ejemplo el cordón superior de las celosías es generado como un miembro continuo sin ninguna conexión, el sistema cuando realiza el análisis, define todos los puntos de intersección, interpreta toda la geometría para dar a conocer su comportamiento antes las fuerzas y momentos actuantes, transfiriendo dicha información a hojas de cálculo que muestran los diagramas y fuerzas a las que el miembro estructural se ve sometido.

También el programa incluye los tipos de entrepisos más comunes con que el sistema trabaja, entre los que se encuentra las losas prefabricadas de concreto, aligeradas con conectores que asumen las fuerzas de cortante y que son cubiertas y selladas con una ligera capa de concreto. Otras opciones utilizadas en el sistema incluyen tipos de entrepiso mixto, que consiste en losas de acero o “steel deck”, soportadas o no sobre vigas secundarias de acero, cubiertas con una capa de concreto reforzado de hasta 10 cm., igual con conectores de cortante. Estos sistemas son analizados por ETABS como conexiones flexibles o semirígidas con sus respectivos diagramas que muestran su deformación.

## **5.6 Protección Contra el Fuego.**

### **5.6.1 Resistencia al fuego requerida para edificaciones habitacionales.**

Como pudimos detectar durante todo el recorrido acerca de las propiedades de las estructuras de acero, que la resistencia frente al fuego la principal falencia de estas estructuras. Descubrimos que el acero pierde sus propiedades al estar expuesto a temperaturas 500 grados centígrados. Sin embargo, todos los materiales estructurales deben prever una adecuada protección frente a este agente ocasional, debido a que todos los elementos y conjuntos estructurales pueden deformarse e incluso colapsar al exponerse a la situación de incendio.

Quisimos resolver esta desventaja del acero investigando cual seria la técnica adecuada a implementar en nuestra propuesta, específicamente para los perfiles tubulares designados para nuestro sistema estructural, obteniendo magníficos resultados al lograr fusionar un sistema de enfriamiento con agua circulante dentro de nuestros celosías y vigas, y rellenar las columnas tubulares con concreto.

Con la aplicación de estos sistemas, despejaremos las dudas y mitos sobre este tema. Básicamente consiste en que las columnas y celosías estén interconectadas a un depósito de almacenamiento de agua. En una situación de incendio, el agua circula por convección, manteniendo la temperatura del acero por debajo del valor crítico de 450°C. Este sistema tiene ventajas económicas cuando se aplica a edificios de más de 8 plantas. Si la circulación del agua es apropiada, el tiempo de resistencia al fuego resultante es prácticamente ilimitado.

A continuación, mostraremos los avances realizados por el Instituto para la Construcción Tubular, ICT<sup>63</sup>, del cual hemos extraído los requerimientos en cuanto a resistencia frente al fuego de los elementos estructurales para edificaciones y como, con las técnicas por ellos sugeridas podremos cumplir con dicha normatividad, sin aumentar los costos destinados a estas actividades.

### 5.6.2 Resistencia al fuego exigida.

En lo que a construcción de edificaciones habitacionales se refiere, las precauciones de seguridad frente al fuego se especifican en razón del intento de evitar daños personales y reducir los daños económicos causados por incendio a un nivel aceptable, por lo tanto es importante que los elementos constructivos puedan aguantar el incendio durante un periodo determinado de tiempo.

Variaciones en la resistencia al fuego exigida		
Tipo de edificio	Requisitos	Tipo de resistencia al fuego
Una planta	Ninguna o baja	Posiblemente hasta R30
2 a 3 plantas	Ninguna o media	Posiblemente hasta R30
Más de 3 plantas	Media	De R60 a R120
Edificios altos	Alta	De R90 y más

Fig. # 94. Resistencia al fuego exigida.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
[www.ict.org](http://www.ict.org)

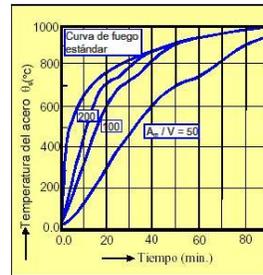
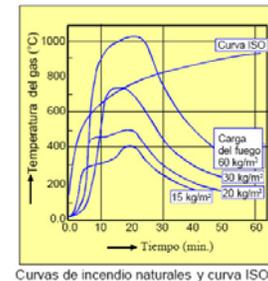


Fig. # 95. Curvas de fuego estándar y curva ISO.  
Imagen tomada con fines académicos de:  
[www.ict.org](http://www.ict.org)



Precisamente es a este periodo de tiempo durante el que un elemento de construcción puede soportar la exposición al calor al que se le denomina “resistencia al fuego”, los reglamentos y normas de protección exigen para cada tipo de edificación, un tiempo mínimo para poder ser evacuado. Para edificios de viviendas, objeto de nuestra investigación, encontramos que para estructuras de más de 3 plantas, el tiempo requerido o resistencia al fuego es de más de 90 minutos; este valor nos servirá entonces para elegir el sistema de protección que elijamos.

La seguridad contra incendios de los edificios persigue conseguir dos objetivos fundamentales, reducir los daños personales y reducir las pérdidas materiales y de propiedades en el edificio en llamas y sus alrededores.

Los objetivos de seguridad contra incendios en edificios pueden alcanzarse de diferentes maneras. Por ejemplo:

63 Wardenier, J. Perfiles Tubulares en aplicaciones estructurales. Instituto para la Construcción Tubular. España. 2002.

- prevención de incendios: eliminando o protegiendo posibles fuentes de ignición
- instalando un mecanismo de extinción automático para evitar que el fuego se extienda hasta grandes proporciones (medidas operativas o activas, por ejemplo, aspersores de agua).
- dotando a los componentes del edificio de una adecuada resistencia al fuego mediante la utilización de medidas pasivas o estructurales para evitar que el fuego se extienda de un compartimiento a otros adyacentes.

Los niveles de seguridad exigidos se especifican en los Códigos y normalmente dependen de factores tales como:

- el tipo de ocupación
- la altura y tamaño del edificio
- la eficacia de los servicios contra incendios
- elevada resistencia al fuego de la estructura principal para garantizar que pueda sobrevivir al incendio total de los materiales combustibles del edificio o de una parte determinada del mismo.

En ocasiones, el acero sin protección es suficiente, por ejemplo en situaciones en las que la seguridad contra el fuego se satisface por otros medios (por ejemplo, rociado automático) y/o si los requisitos relativos a la resistencia al fuego son bajos (es decir, no superiores a 30 minutos).

### 5.6.3 Resistencia frente al fuego de los perfiles tubulares.

Los perfiles tubulares estructurales (HSS) sin protección tienen una resistencia inherente al fuego de entre 15 a 30 minutos. Se ha asumido tradicionalmente que los elementos estructurales de acero sin protección fallan cuando alcanzan temperaturas de, aproximadamente 450 a 550°C. Cuando sea necesario que los perfiles tubulares de acero resistan al fuego durante periodos de tiempo más largos, se deberán tomar medidas adicionales para retrasar el aumento en la temperatura del acero.

Protección frente al fuego de perfiles tubulares rellenos de hormigón

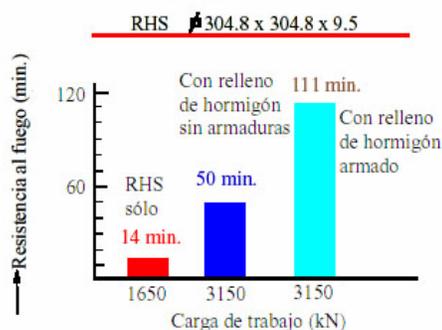


Fig. # 96. Resistencia al fuego de tubulares con concreto. Imagen tomada con fines académicos de: [www.ict.org](http://www.ict.org)

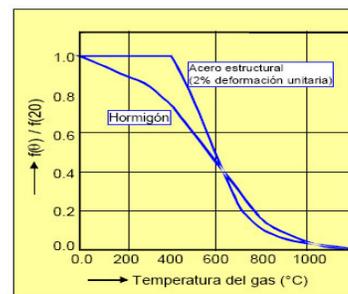


Diagrama esquemático de reducción de la resistencia material para aceros estructurales y hormigón con la temperatura

Fig. # 97. Curvas de reducción de resistencia. Imagen tomada con fines académicos de: [www.ict.org](http://www.ict.org)

No existe gran diferencia en la reducción relativa de la resistencia del hormigón y del acero sometido a altas temperaturas. La razón de la diferencia en el comportamiento estructural de los elementos de acero y hormigón, sometidos a condiciones de fuego, es que el calor se propaga entre 10 y 12 veces más rápido en una estructura de acero que en una de hormigón de la misma solidez, porque la conductividad térmica del acero es mayor que la del hormigón.

#### **5.6.4 Aislamiento externo de los perfiles tubulares de acero.**

Este tipo de protección frente al fuego puede aplicarse a todos los tipos de elementos estructurales, columnas, vigas y celosías. La variación de la temperatura en un perfil tubular de acero protegido depende de las propiedades térmicas del material de aislamiento, es decir de su conductividad, del espesor del material de aislamiento y del factor de forma del perfil de acero. Los materiales de protección externa frente al fuego pueden agruparse de la siguiente manera:

- Láminas aislantes, basadas principalmente en yeso, fibras minerales o áridos ligeros, tales como perlita y vermiculita. Si se utilizan láminas aislantes sobre elementos que soportan cargas a tracción, deben tomarse las medidas necesarias para garantizar la integridad de las uniones entre láminas.
- Recubrimientos rociados o pegados, basados principalmente en fibras minerales o áridos ligeros, tales como perlita y vermiculita.
- Recubrimientos intumescentes, mezclas similares a la pintura, que se aplican directamente a la superficie de acero las cuales se hinchan ante el fuego, aumentando su volumen a un múltiplo de su espesor original.
- Techos suspendidos, o plafones que protegen principalmente cubiertas, celosías.

#### **5.6.5 Columnas tubulares llenas de concreto.**

Para componentes de edificios tales como columnas, con función de soporte de carga, el único criterio de comportamiento relevante es la estabilidad. En lo que a la determinación de resistencia al fuego se refiere. Dentro de las ventajas que anotamos de los perfiles tubulares, encontramos que estos pueden utilizar su hueco interno para ser rellenados con concreto, con lo que conseguimos mayor resistencia y a la vez protección contra el fuego. Entonces las columnas confeccionadas con estos perfiles resultan excelentes para nuestra propuesta rellenándolas, a continuación veremos una tabla con los tiempos que alcanzaría a responder frente al fuego con esta técnica.

Este tipo de protección frente al fuego se aplica normalmente sólo a columnas. Rellenar los perfiles tubulares con hormigón es una forma sencilla e interesante de mejorar la resistencia al fuego. La temperatura en la pared exterior de acero sin protección aumenta rápidamente. Sin embargo, mientras dicha zona va perdiendo gradualmente resistencia y rigidez, la carga se transfiere al núcleo de hormigón.

Aparte de su función estructural, el perfil tubular también actúa como un escudo contra la radiación para el núcleo de hormigón. Esto, combinado con una capa de vapor entre el acero y el núcleo de hormigón, conduce a un menor aumento de temperatura en el núcleo si se compara con estructuras de hormigón armado. Dependiendo de los requisitos de resistencia al fuego, el hormigón en el perfil tubular puede ser en masa, resistencia al fuego de hasta 60 minutos, o armado con barras o fibras de acero. Las nuevas investigaciones dirigidas a aumentar la resistencia al fuego de perfiles tubulares rellenos de hormigón se centran en la utilización de hormigón de alta resistencia.

Las columnas simplemente de acero, columnas HSS sin protección externa o relleno de hormigón, poseen sólo una resistencia al fuego limitada. Dependiendo del nivel de carga y del factor de forma puede conseguirse normalmente una resistencia al fuego de 15 a 20 minutos. Sólo en casos excepcionales se logra una resistencia al fuego de 30 minutos. Esta situación puede mejorar muchísimo aplicando aislamiento térmico a la columna.

Dependiendo del tipo y grosor del material aislante, pueden obtenerse resistencias al fuego de varias horas, aunque en la actualidad la mayoría de los requisitos se limitan a 120 minutos.

Las columnas de perfiles tubulares rellenos de hormigón tienen una capacidad portante y una resistencia al fuego mucho mayores que las de columnas vacías y sin protección. Suponiendo que el hormigón es de buena calidad, una resistencia a la compresión por encima de 20 N/mm<sup>2</sup>, y que las dimensiones de la sección transversal no son demasiado reducidas, menores de 150x150 mm, puede lograrse una resistencia al fuego de al menos 30 minutos. Los perfiles de dimensiones mayores tendrán una mayor resistencia al fuego y añadiendo armadura adicional al hormigón puede incrementarse a más de 120 minutos.

#### **5.6.6 Refrigeración de las celosías por circulación de agua.**

Este tipo de protección frente al fuego puede aplicarse a todos los tipos de perfiles tubulares, lo cual incluye celosías y miembros de entresijos. El perfil tubular actúa al mismo tiempo como estructura portante y contenedor de agua. Este sistema de protección es muy sofisticado, y necesita un diseño minucioso e instalaciones hidráulicas apropiadas.

El efecto de refrigeración consiste en la absorción del calor por el agua, en la eliminación de calor mediante su circulación y en su consumo por la vaporización del agua. En las aplicaciones prácticas estos efectos están combinados. Un sistema con relleno de agua adecuadamente diseñado limitará la temperatura media del acero a menos de 200° C.

El llenado con agua puede proporcionar una resistencia al fuego infinita suponiendo que se disponga de un suministro de agua adecuado, reduciendo considerablemente los cambios físicos en el elemento estructural, hasta el punto de ser innecesario otro tipo de protección. Este sistema tiene ventajas económicas cuando se aplica a edificios de más de 8 plantas.

### 5.6.7 Sistemas de refrigeración por agua.

Pueden utilizarse dos sistemas diferentes: elementos permanentemente rellenos o elementos llenados únicamente cuando se produzca un incendio. En este último caso, la protección depende de un sistema de detección del fuego y de un tiempo breve de llenado de agua. En los sistemas sin aprovisionamiento continuo de agua, el tiempo de resistencia al fuego que se puede alcanzar depende del contenido total de agua, incluyendo un tanque de reserva, y en la forma de la estructura calentada. En sistemas con renovación constante de agua, la resistencia al fuego es ilimitada. La refrigeración de agua por movimiento natural se utiliza principalmente para elementos verticales o inclinados para asegurar la circulación del agua.

Es necesario dotar a las paredes del perfil HSS de pequeños agujeros de drenaje, situados normalmente de dos en dos, de 10 a 15 mm de diámetro. Estos agujeros deberán realizarse en cada tramo de piso a nivel de cada suelo, con una distancia máxima en altura entre cada par de 5,0 m. Deben situarse a una distancia de entre 100 y 120 mm del extremo de cada columna. Dichos agujeros tienen como finalidad impedir que la columna reviente al verse sometida a la presión del vapor procedente del calentamiento del agua atrapada en el hormigón que contiene.

Evolución de la temperatura en una columna de SHS rellena de agua y expuesta a condiciones de fuego estándar

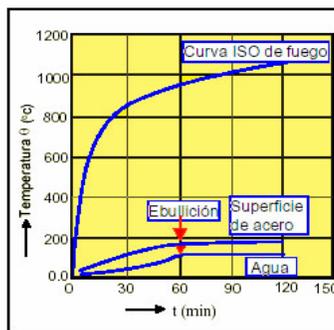


Fig. # 98. Curvas para comparar temperatura de tubulares con circulación de agua.  
Imagen tomada con fines académicos de: [www.ict.org](http://www.ict.org)

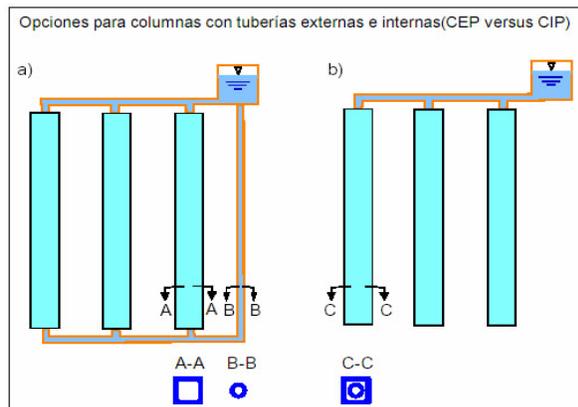


Fig. # 99. Sistemas de refrigeración de tubulares con circulación de agua.  
Imagen tomada con fines académicos de: [www.ict.org](http://www.ict.org)

#### **5.6.7.1 Elementos estructurales sin reposición de agua (UC).**

El simple llenado de una columna con agua, sin que exista previsión de suministro para reemplazar el agua perdida por la producción de vapor, llevará a un aumento de su resistencia al fuego, aunque limitado si se compara con la de la columna vacía. En las columnas que comprenden varios pisos, la resistencia al fuego puede aumentarse protegiendo externamente el tramo del piso superior y usándolo como una reserva de agua para los pisos inferiores. Sin embargo, una fuerte producción de vapor puede llevar a una pérdida adicional y crítica de agua por la irrupción de burbujas de vapor. Por lo tanto, este tipo de columna se deberá utilizar solamente para requisitos de resistencia al fuego bajos, hasta 60 minutos aproximadamente.

#### **5.6.7.2 Elementos estructurales con tubería externa (CEP).**

Este sistema cuenta con una tubería vertical que conecta la parte superior e inferior de la columna. La mezcla de agua-vapor, más ligera y que fluye hacia arriba, debe separarse en la parte superior, de forma que el agua pueda bajar a la parte inferior a través de la tubería. De esta manera se activará una circulación externa forzada de forma natural.

Además, la tubería puede conectarse con un tanque de almacenamiento de agua situado en la parte superior del edificio y que sirva para reemplazar el agua perdida a causa de la producción de vapor, y además, posiblemente, para actuar como una cámara común de separación agua/vapor. Un grupo de columnas individuales puede conectarse por su parte inferior a una tubería conectora compartida, así como a otra que se halle en la parte superior. Para un grupo de columnas de este tipo, sólo es necesaria una tubería vertical que conecte las partes inferior y superior del grupo completo de columnas,

#### **5.6.7.3 Elementos estructurales con tubería interna (CIP).**

En este sistema, se utiliza un tubo vertical interno dentro de cada columna para proporcionar un suministro de agua fría a su parte inferior. Esto promueve la circulación interna, activada de forma natural, de la mezcla agua/vapor ascendente y del agua descendente tras separarse del vapor. Así, cada columna actúa como un elemento individual sin ninguna conexión con las otras columnas. Para minimizar el número de tanques de almacenamiento de agua, las partes superiores de varias columnas pueden conectarse mediante una tubería común a un tanque de almacenamiento para todo el grupo.

#### **5.6.7.4 Sistemas mixtos.**

Los sistemas anteriormente mencionados pueden combinarse en un edificio y conectarse para que actúen como un sistema mixto integrado. Esto puede ofrecer ventajas para estructuras que contengan no sólo columnas, sino también diagonales para arriostamientos rellenas de agua, etc. En los sistemas con circulación natural anteriormente descritos, se recomienda una inclinación mínima de aproximadamente 45°. No es aconsejable utilizar instalaciones electro-mecánicas, tales como bombas, que

pueden actuar contra la circulación producida de forma natural. Esto puede provocar un fallo del sistema de refrigeración y, por lo tanto, a un colapso de la estructura rellena de agua.

### **5.6.8 Protección contra la corrosión interna.**

Investigaciones acerca de la corrosión interna de los perfiles estructurales, han arrojado como resultado que cuando no están rellenos de agua, se muestra que la corrosión interna no se da si los perfiles tubulares quedan sellados, es decir que en el proceso de unión mediante soldadura no se dejaron poros por donde penetre la humedad y oxígeno. Incluso en aquellos perfiles tubulares que no se han sellado herméticamente, la corrosión es limitada. En lo que respecta a la condensación, en un perfil imperfectamente sellado, para evitarla se pueden realizar agujeros de drenaje en una zona hacia donde el agua tienda por gravedad.

Cuando están rellenos de agua, como es nuestro caso a aplicar, la corrosión interna se resuelve fácilmente debido a que debemos garantizar un cierre hermético gracias a un correcto proceso de unión mediante soldadura, consiguiendo que no hayan fugas de agua y que no circule aire.

Una vez este herméticamente garantizada toda la soldadura, se le añaden sustancias químicas al agua utilizada para el llenado, para de esta manera impedir la corrosión interna. Para inhibir la corrosión interna se le añade al agua, nitrato potásico ( $KNO_3$ )<sup>64</sup>. Es un sólido cristalino de color blanco, inoloro, completamente soluble en agua, que dentro de sus cualidades esta la absorción de humedad. Se descompone por debajo del punto de ebullición a  $400^\circ C$  con formación de oxígeno. Para evitar que el agua se congele, se le añade carbonato potásico ( $K_2CO_3$ ).

### **5.6.9 Productos alternativos para el llenado de perfiles tubulares.**

Aunque ya desde los años 70's, se viene implementando estos sistemas de protección frente al fuego, por ejemplo en el edificio para las oficinas de la United States Steel, en Pittsburgh, Estados Unidos<sup>65</sup>; hoy día contamos con productos químicos alternativos que pueden absorber el calor producido en un incendio y que es transmitido por las paredes de los perfiles a estos. Nos referimos a agentes pasivos de protección contra incendios como agentes gelatinosos y/o espumosos que han tenido aplicación en la combustión de incendios, y que por sus cualidades de absorción calórica pueden ser aptos para sustituir e inclusive mejorar las condiciones de refrigeración del agua.

Esperamos dejar abierta una puerta más para la investigación en este campo, su documentación e implementación nos han generado esta inquietud, estamos a la espera de nuevas innovaciones al respecto para continuarla desarrollando.

---

<sup>64</sup> Wardenier, J. Perfiles Tubulares en aplicaciones estructurales. Instituto para la Construcción Tubular. España. 2002. Pág. 2.7.

<sup>65</sup> Franz Hart. Atlas de la construcción Metálica. Pág. 250

***CONCLUSIONES Y  
PROPUESTA ESTRUCTURAL***

## 6.0 CONCLUSIONES

A lo largo del documento descubrimos el complejo proceso de elección estructural para un proyecto de edificación habitacional. Informamos sobre las opciones tradicionales y mostramos el contexto donde el acero empieza a ser considerado como opción y clama por la aplicación de las nuevas tecnologías que se han desarrollado sobre ésta técnica estructural alrededor del mundo.

A la vez planteamos los factores sobre la conveniencia de la construcción metálica, confrontada con otras técnicas estructurales especialmente la del concreto reforzado. La decisión final es particular, depende de las peculiares condiciones de un proyecto, cuyas condicionantes pueden ser totalmente distintas a las de otros, y nos exige una evaluación objetiva de todas las opciones para cada caso y, solo así tomar la decisión que “ad hoc” satisfaga dichas condicionantes.

La solución de un proyecto de edificación habitacional es complejo, la seguridad y la calidad espacial son dos de los factores que deben primar sobre otros, que no son de menor importancia pero si vitales para que germinen y se lleven a cabo, uno de estos es precisamente el factor económico, sin él no serian pródigos, puesto que se trata de una industria que invierte recursos y de su retorno depende al mismo tiempo su continuidad.

Nuestra propuesta consiste en satisfacer todas las condicionantes mediante la implementación de estructuras livianas de acero, las cuales nos permiten mejorar la calidad de las edificaciones habitacionales, proponiendo espacios libres de elementos estructurales y de mayor área habitable gracias a las menores dimensiones de los elementos estructurales; igualmente nos permiten acrecentar las utilidades económicas, producto del incremento del área vendible, y del aumento en la velocidad de construcción concebida por la prefabricación automatizada y por nuestro innovador sistema de montaje que se reduce en disponer todas las piezas estructurales a nivel de cimentación, preensamblarlas y erigir todos los pisos en un solo proceso que finalizará con la conformación total del edificio.

Consideramos que nuestros aportes, además de innovadores son fáciles de implementar con la actual tecnología, y satisfacen nuestros objetivos planteados de incrementar la seguridad tanto de los procesos como la de la edificación misma, y de hacer financieramente atractivo este sistema para los inversionistas, gracias a que garantizamos el pronto retorno de su inversión y la recuperación del incremento de los costos iniciales del presupuesto metálico comparado con las estructuras de concreto reforzado e inclusive con los sistemas tradicionales en acero.

Dentro de la técnica de construcción metálica, son las estructuras livianas de acero, concebidas mediante los perfiles tubulares, las que nos permiten conseguir nuestros objetivos, ya que éstas brindan excelentes propiedades de comportamiento, seguridad y economía, maximizando las propiedades de este material; que además por sus advenimientos auguran su éxito y permanencia; el acero nanoestructurado permitirá el incremento de sus propiedades y una disminución acentuada de su peso.

Establecidas estas premisas, resta plantear nuestro sistema de celosías tubulares alternadas, que busca solucionar, como han de ser éstas estructuras livianas y automatizadas, al describir su morfología; que como vimos, se hacen eficientes en gran medida por la geometría que rige la disposición de sus perfiles tubulares. La abolición de las desventajas detectadas son un aporte más, la protección frente al fuego de nuestro sistema, basado en la circulación de agua dentro de los perfiles, además de abolir los sobrecostos económicos de esta actividad, nos permite ofrecer un tiempo ilimitado de resistencia frente a altas temperaturas.

## **6.1 PROPUESTA ESTRUCTURAL**

### **6.1.1 Celosías Tubulares Alternadas, Livianas y Automatizadas.**

Hemos definido nuestro sistema con sus principales cualidades, al reducir su peso y automatizar sus procesos de prefabricación y montaje. Su conformación sistémica, responde a las respuestas planteadas frente a cada aspecto negativo de la construcción metálica actual, quisimos bosquejar la integración de estas en un nuevo sistema estructural que maximiza la geometría y minimiza los tiempos de construcción.

### **6.1.2 Conceptos estructurales aplicados.**

Nuestro punto de partida es el sistema de celosías alternadas o “staggered truss”, el cual encontramos dentro de nuestra investigación, como el más eficiente para edificaciones habitacionales de mediana altura, precisamente el caso de nuestro objeto de investigación. De ésta manera la estructura final resultante será un prototipo regido por los requerimientos de análisis, diseño y cálculo estructural, normatizados para este sistema, e incluidos en paquetes de software especializados en estructuras, que como el ETABS, contiene todas las premisas y condicionantes para resolver sus condicionantes.

No ha sido nuestra intención, la creación de una nueva metodología para el cálculo de nuestro sistema, no solo por la responsabilidad y la especialidad que ello conlleva y que no es nuestro campo, sino por que nuestro objetivo es interpretar y adaptar dicho sistema con técnicas que resuelvan las fallas detectadas durante la investigación acerca de la construcción metálica. La integración de procesos para su fabricación, montaje y

protección contra el fuego son nuestra intervención, actividades que no comprometen la seguridad estructural del objeto final, si no que son los medios para llegar a él.

A continuación discriminaremos nuestra intervención en cada proceso, y los aportes benéficos que obtenemos con ellos.

### 6.1.3 Análisis y diseño estructural.

La herramienta básica que utilizaremos en esta etapa, es el programa ETABS, en la red (World Wide Web) se consiguen demos que nos permiten familiarizarnos con sus herramientas y resolver totalmente pequeños modelos, hasta conseguir resolver íntegramente todos sus elementos y conexiones con los perfiles sugeridos.

Esta etapa puede realizarse fácilmente con ésta herramienta, tan solo toma 3 pasos para obtener un anteproyecto estructural de nuestra edificación. El proceso se inicia con la digitalización de los datos básicos del volumen de nuestra edificación, tales como cantidad de ejes estructurales, distancia entre ellos, número de pisos y su altura típica, además de la especificación del tipo de unidad que vamos a manejar, por ejemplo toneladas/metro.

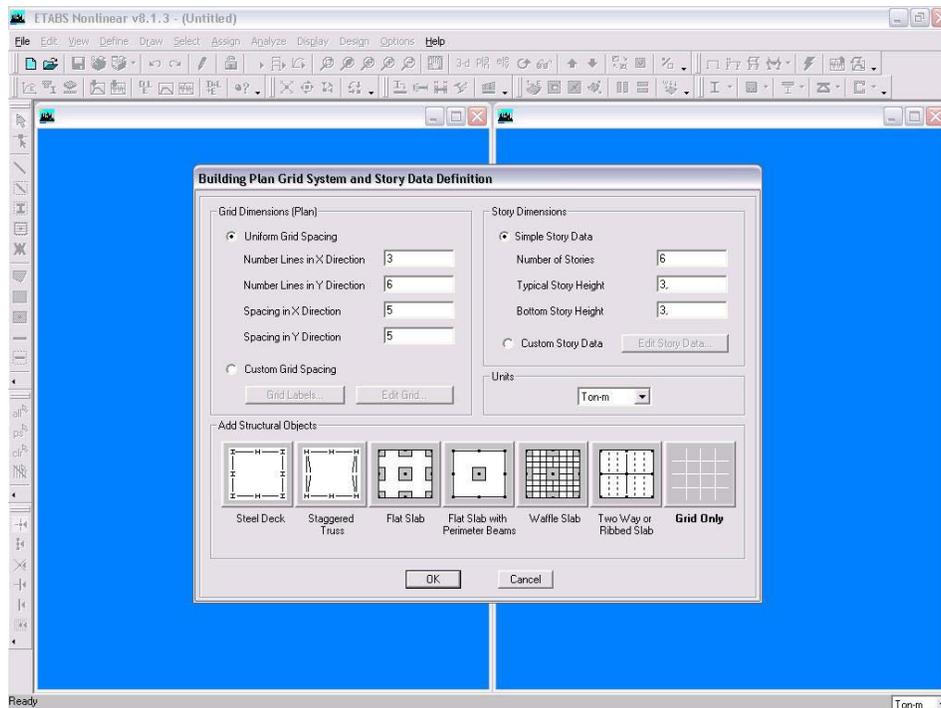


Fig.# 100. Ventana para la entrada de datos básicos para el diseño estructural según el sistema “staggered truss”

Reproducción fotográfica tomada con fines educativos de: Computers and Structures, Inc., Berkeley, California. 2003

Una vez completamos toda la información de la volumetría de la edificación, basta con seleccionar el sistema con que vamos a resolver dicha estructura; como ya indicamos el sistema “staggered truss” ha sido elegido, por consiguiente debemos seleccionar la casilla referente a este sistema de entre otros sistemas optativos que también se resuelven con este software. Para este caso demostrativo, hemos optado por una geometría sencilla de una edificación contenida en volumen de 6 pisos de alto, con 10 mts. sobre el eje X, y 40 mts sobre el eje Y.

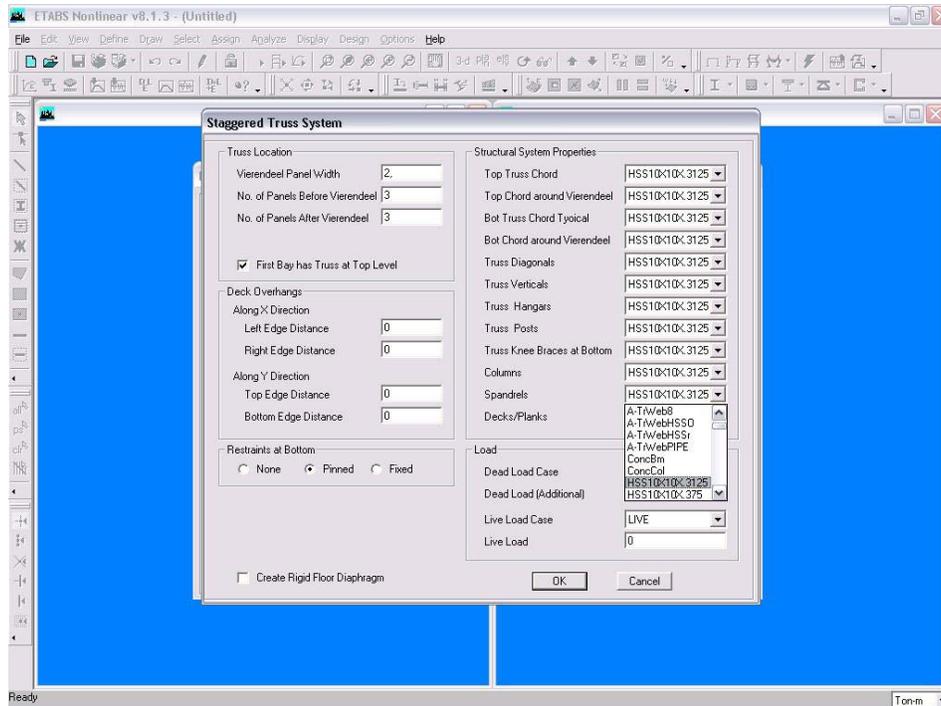


Fig. # 101. Ventana para la entrada de perfiles estructurales y aperturas vierendeel según el sistema “staggered truss”. ETABS.

Reproducción fotográfica tomada con fines educativos de: Computers and Structures, Inc., Berkeley, California. 2003

El siguiente paso consiste en especificar los elementos con que vamos a desarrollar la totalidad de la estructura, y demás elementos típicos del sistema staggered, especialmente las aperturas en las celosías para permitir la circulación o corredores dentro de la edificación, que como vimos se efectúan mediante aberturas tipo vierendeel. Definimos el ancho y el número de tableros de celosía dispuestos a los lados de éstas. El programa tiene en su base de datos, gran cantidad de elementos estructurales estándar; sin embargo hemos comprobado las ventajas de los perfiles tubulares HSS, por consiguiente elegimos estas categorías para la solución de cada pieza estructural, para que luego cuando se efectúen los cálculos, se nos especifique las referencias de cada una de ellas como resultado.

Esta información es suficiente para que ETABS, nos presente una solución estructural que cumpla fielmente las premisas del sistema staggered truss, obviamente este primer anteproyecto es susceptible de cambios, bien sea arquitectónicos o estructurales. Continuando con nuestro proceso, podremos visualizar la totalidad de la estructura en múltiples vistas, inclusive en tercera dimensión; advirtiendo que desde esta etapa podemos obtener los perfiles tubulares sugeridos.

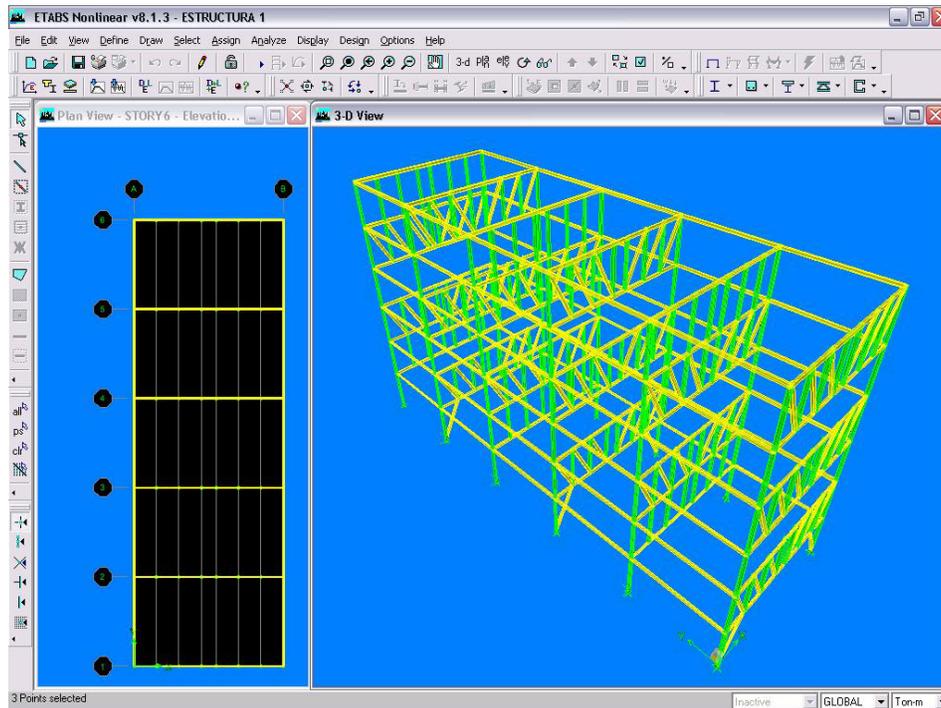


Fig. # 102. Visualización en tercera dimensión y en planta de la estructura propuesta según el sistema “staggered truss”. ETABS.

Reproducción fotográfica tomada con fines educativos de: Computers and Structures, Inc., Berkeley, California. 2003

Después de realizar las correspondientes evaluaciones de cargas y, de que se realicen los ajustes necesarios efectuados automáticamente por ETABS, obtendremos finalmente la estructura completa y podremos continuar con los procesos pertinentes al trabajo con estructuras metálicas, especificados con anterioridad.

#### 6.1.4 Fabricación.

La posibilidad de prefabricación de la estructura es una gran ventaja. La integración de sistemas CAD-CAN, como vimos ya es una realidad, que sumado a la sencillez de las

piezas tubulares y de sus conexiones necesarias para la conformación de nuestro esqueleto final es otra cualidad que nos permite obtener ventajas adicionales.

Una vez obtuvimos la especificación de las piezas estructurales, y al hacer un despiece de las mismas, encontramos que éste proceso de fabricación se simplifica a la elaboración de tres subsistemas; el de una sola serie de celosías todas iguales y con conexiones soldadas; al alistamiento de unos pocos elementos sueltos, que conforman las columnas alternadas con las anteriores, y que coinciden verticalmente con el marco principal de las mismas celosías; y por último los elementos del entrepiso metálico, que está conformado por vigas principales y secundarias en perfiles tubulares sobre las que se soldan las laminas de “steel deck”.

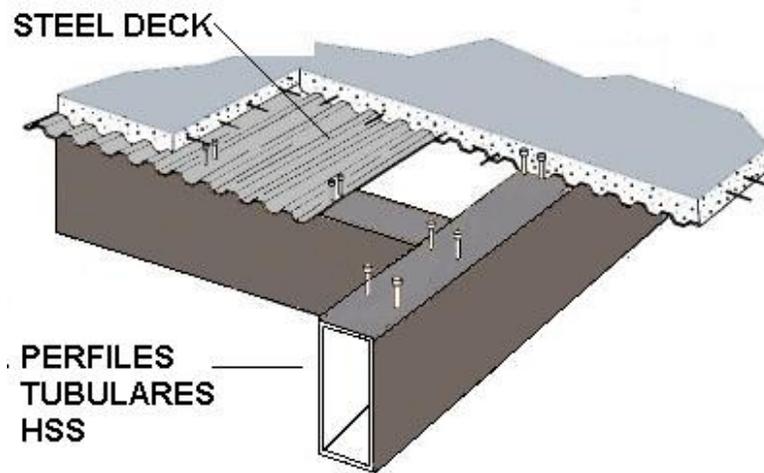


Fig. # 103. Sistema de entrepiso con perfiles tubulares rectangulares RHS, y steel deck.

Debido a la sencillez de los elementos estructurales, estos procesos se puede automatizar fácilmente con la tecnología que contamos, especialmente con la integración de técnicas digitales adaptadas a las máquinas cotidianas para estos usos. Los cortes de los tubulares para nuestro sistema son por lo tanto repetitivos, sus uniones son soldadas repetitivamente con las mismas condiciones para el armado de las celosías; y los demás elementos individuales se resuelven con el alistamiento de sus conexiones para ser acoplados finalmente con sistemas de “brida” en su posición final y ser atornillados.

Para el proceso de elaboración de cada pieza, se transfiere toda la información de la base de datos a etiquetas con códigos de barras, que además de identificarlas nos ayudaran para establecer su posición final y especificaciones. El orden de fabricación y despacho es establecido con anterioridad y también queda contenido en la base de datos.

### 6.1.5 Herramientas y equipos empleados.

Es importante recalcar el uso del equipo y herramientas que vamos a utilizar para concretar nuestro sistema estructural. Los equipos de cómputo son vitales para integrar sistemas de CAD-CAN, que traduzcan el diseño y los cálculos del programa ETABS, con el diseño arquitectónico elaborado con tecnología CAD, a las máquinas tradicionales con que hoy contamos, tales como cortadoras, fresadoras, pulidoras y soldadores de arco abierto. Para el montaje utilizaremos gatos hidráulicos sobre pilares, similares a los utilizados para elevar las losas de concreto del sistema lift slab, igualmente computarizados, y “brazos” hidráulicos para cargar y descargar las piezas. Como sistema de identificación de las piezas estructurales implantaremos un sistema común de lectores de barras, manuales como los usados en supermercados al momento de facturar las mercancías, esto para estar acorde a nuestra realidad y no incrementar costos.

### 6.1.6 Transporte de la estructura al sitio de obra.

De acuerdo al orden de fabricación establecido, son etiquetadas y despachadas tanto las celosías preensambladas, como los demás elementos de entrepiso, y las columnas tubulares. La descarga de los mismos es especialmente importante cada vez que desde el camión, los elementos pasan a su posición final dentro del sistema, tan solo que a nivel de cimentación, y solo alcanzarán su altura final en el ensamble total de la estructura.

### 6.1.7 Ensamble estructural automatizado.

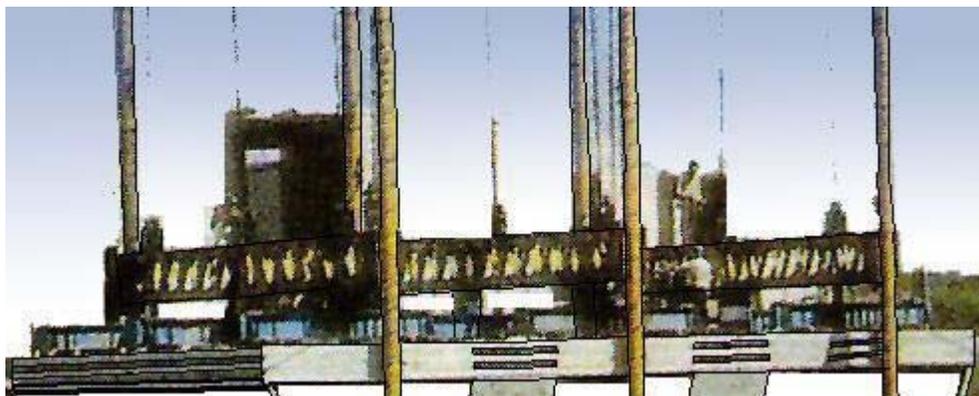


Fig. # 104. Propuesta de Montaje automatizado, Primera etapa. Empaquetado de la totalidad de la estructura a nivel 0.

Todos los elementos estructurales (entrepisos, celosías y columnas) están dispuestos a nivel de cimentación para ser desplegados y elevados a su posición final.

Quizás nuestra mayor aportación consiste en disponer a nivel de cimentación, todas las piezas estructurales preensambladas y dispuestas horizontalmente, conformando paquetes o “sándwich” de piso a piso, para que por medio de gatos hidráulicos sobre pilares de sostén, previamente instalados, se vayan desplegando lentamente de abajo hacia arriba, tanto celosías como columnas, teniendo como elemento de referencia el entrepiso inmediatamente próximo, consiguiendo el desempaquetamiento de todos los pisos hasta llegar a conformar la totalidad de la estructura.

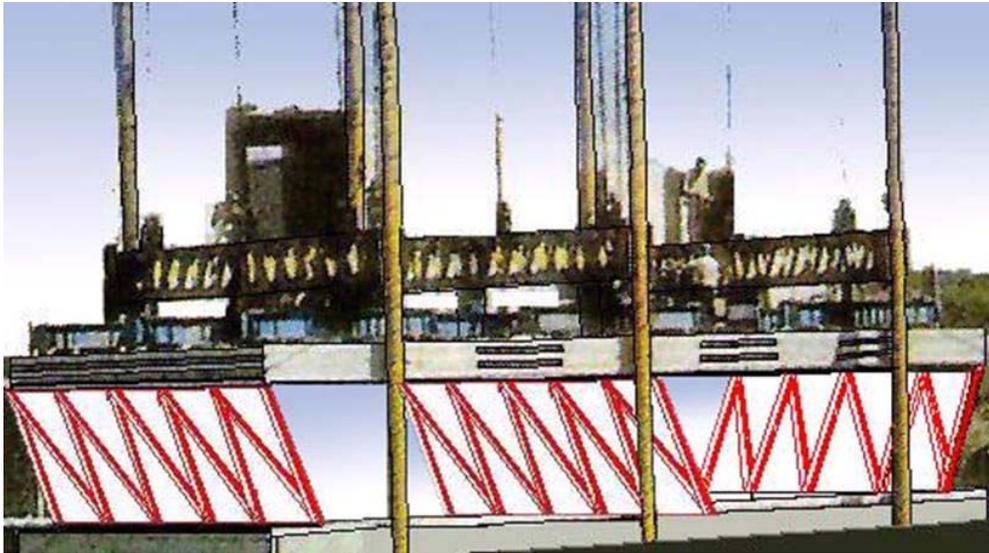


Fig. # 105. Propuesta de Montaje automatizado, Segunda etapa. Despliegue de elementos estructurales.

Las celosías se van desplegando hasta quedar en posición vertical y ser aseguradas con el sistema de entrepiso inferior.

Es importante recalcar que es un solo proceso de montaje para conformar la totalidad de la estructura. Según llegan al sitio de obra, se van desmontando y se disponen automáticamente por el brazo hidráulico en un orden preestablecido, desde las columnas del primer nivel, los entrepisos con sus vigas y láminas de acero, seguido por las celosías del segundo nivel con las columnas alternadas, y así sucesivamente. Desde el vehículo de transporte mediante este brazo mecánico se identifican las piezas y mediante el código de barras, se obtiene datos sobre su posición, y se desplazan a su posición final horizontal a nivel 0, donde son inmediatamente aseguradas en su puesto.

Las celosías son preaseguradas mediante bisagras que permitirán que estos elementos escualizen y se desplieguen, para así pasar de una posición totalmente horizontal a una final vertical. Una técnica similar fue utilizada en los años 70, para elevar muros estructurales en concreto reforzado, utilizando gatos hidráulicos, la factibilidad mecánica de nuestro sistema de montaje queda resuelta una vez que constatamos que fueron lo suficientemente fuertes para elevar cargas tan elevadas como muros estructurales en concreto reforzado, resultando proporcionalmente más fácil de elevar nuestras livianas celosías tubulares.

Actualmente este tipo de gatos han integrado elementos de posicionamiento, y sus movimientos son lentos y coordinados, a medida que se desplazan se efectúan las correcciones necesarias para la correcta nivelación de los pisos. Una vez se ha completado de desempaquetar un piso, se aseguran los gatos mientras que manualmente se atornillan las columnas y celosías respectivamente en su posición, para continuar sucesivamente con los pisos superiores, adquiriendo más seguridad y rigidez al tener los pisos inferiores armados y asegurados.

### **6.1.8 Resistencia ilimitada frente al fuego:**

Gracias a que nuestras celosías y vigas de entrepiso están confeccionadas totalmente con perfiles tubulares, especialmente rectangulares para facilitar las conexiones, es fácil instalar un sistema de refrigeración con agua como el que detallamos en el capítulo anterior.

Nosotros quisimos modificar la geometría básica del staggered truss para asegurar la verticalidad de las columnas perimetrales; simplemente al igual que como originalmente se requiere que los tirantes superiores e inferiores de las celosías sean continuos, nosotros aplicamos la misma regla para los paralelos perimetrales de las mismas, de ésta manera los elementos cortos serán las diagonales, y podemos conectar en el perímetro todas las columnas.

Esta variación la efectuamos con el fin de que estas sean rellenas de concreto para obtener los beneficios de esta técnica ya descrita, y dejar una tubería de cobre en su interior que interconectará los tubulares del entrepiso y el marco y las diagonales de las celosías, elementos que estarán llenos de agua con nitrato potasio “KNO<sub>3</sub>”, para inhibir la corrosión interna, estos serán interconectados mediante válvulas, ubicadas en sus extremos, y pequeños tubos de cobre para interconectarlos con el elemento próximo, así hasta hacerlo con toda la estructura.

Con esta técnica como descubrimos, logramos la suficiente resistencia requerida frente al fuego, sin embargo seguimos las recomendaciones y coincidimos en que no es difícil ni incrementa los costos, interconectar este sistema de circulación de agua, con un tinaco destinado originalmente para el abastecimiento de agua potable para el consumo humano, su adaptación consiste en sellarlo perfectamente y adaptársele válvulas tanto para la salida del vapor como para el control de la presión del sistema. Como ésta interconexión solo trabajara en el momento de una calamidad provocada por incendio, el vapor que éste generará al calentar el agua, producirá la fuerza necesaria para la circulación de agua fría por todo el sistema, ya que ésta asumirá y consumirá la energía calórica expedida en uno de estos casos fortuitos.

Como fue descrito, dentro del proceso de fabricación de la estructura debemos asegurar la perfecta unión de las piezas tubulares, consiguiendo además de que no se derrame el

agua, el total hermetismo al interior de los perfiles de la estructura, minimizando la circulación de oxígeno dentro de estos, para que no aparezca corrosión y humedades.

### **6.1.9 Acabados y sistemas divisorios:**

Una vez se haya conseguido desplegar y erguir toda nuestra estructura de perfiles tubulares de acero, se continua el proceso con el ensamblado y asegurado final de todos los elementos. El sistema de entrepiso “steel deck”, estará en condiciones de recibir el concreto para la losa de refuerzo una vez se realicen las instalaciones hidráulicas, sanitarias y demás que tengan lugar.

Aquí comienza la finalización de nuestra etapa estructural, al fundir la losa de compresión sobre las láminas colaborantes de acero o “steel deck”, y de igual forma las columnas perimetrales. De ésta manera al finalizar el proceso de fraguado, todos los elementos habrán conformado finalmente nuestra estructura y estarán en condiciones de asumir las solicitaciones para los que fueron diseñados.

Los sistemas de acabados y muros divisorios pueden ser los tradicionales, ésta es otra de las ventajas del sistema. Consideramos que es importante encontrar los sistemas de fachada y demás que mejor se adapten al mismo, sin embargo dejamos a disposición del usuario interesado, y de la continuación de nuestra investigación que realizaremos sobre el mismo sistema, para escoger ésta solución; no sin antes aclarar que aunque en la normatividad, generalizan las cargas muertas con que se debe calcular, los ahorros adicionales que consigamos en el peso de estos elementos se traducirá también en ahorros de los demás procesos.

## 6.2 Corolario.

Finalmente es menester nuevamente recalcar que se pueden llegar a resolver problemas estructurales análogos con soluciones bien disímiles, propias de cada técnica y material constructivo, que marcan con su sello distintivo las edificaciones habitacionales que con ellos se solventan. El concreto reforzado, uno de los materiales estructurales de más implantación en nuestro entorno, y el acero, son y han expuesto sobradamente su capacidad e importancia por separado en este campo.

Cuando descubrimos las tipologías estructurales del acero y las comparamos con las del concreto reforzado constatamos que son forzosamente muy diferentes, dado que sus características como materiales resistentes también lo son y mucho. Las características diferenciales de uno y otro material les hacen disponer de campos propios y exclusivos de utilización, y se convirtió en nuestro derrotero en descubrir como el acero dentro del rango de edificaciones de mediana altura, podía ser una opción factible de ser implementado

Consideramos que bajo condiciones de requerimientos normales para la solución de edificaciones habitacionales, el material estructural más adecuado es el acero; con el cual podemos concebir estructuras seguras y duraderas de mejor comportamiento antisísmico, al mismo tiempo que mejoramos la calidad del espacio resolviéndolo con mayores luces que aportan adaptabilidad y flexibilidad a los diseños, proveyendo si se requiere la modificación posterior de la estructura.

El proceso de industrialización que ha alcanzado el acero es superior, con el se consigue elevar al máximo el grado de prefabricación y nos permite implantar la tecnología actual de automatización para su fabricación y montaje, puesto que éste tolera un mayor nivel de precisión en su elaboración, facilitando el montaje, lo cual mejora la velocidad de construcción, reduciendo notablemente los plazos, y dentro de la actual tendencia de sostenibilidad, el acero consigue cuotas óptimas hasta de 100% reciclable.

Posteriormente nos propusimos encontrar el sistema y los perfiles adecuados para solucionar las grandes desventajas de la construcción metálica, indagamos que tipología estructural en acero permite la consecución de nuestro objetivo, encontrando que la geometría juega un papel importante, y las celosías son la solución que permite cubrir mayores luces; su comportamiento frente a las cargas actuantes es mas eficiente ya que sus elementos trabajan únicamente a tracción o a compresión, y para nuestro objetivo de concebir estructuras livianas, esta tecnología constituye la tipología estructural más ligera y diáfana.

Consecuentemente dentro de la amplia gama de perfiles estructurales disponible para la construcción, buscamos cual de ellos se adecua mejor al comportamiento frente a cargas de una celosía. Los perfiles tubulares, especialmente los rectangulares RHS en nuestro caso, constituyen el perfil de mayor resistencia al pandeo, ideal por tanto para elementos sometidos a esfuerzos de compresión, permite la utilización de elementos más largos en las celosías, reduce el número de sus uniones, sin rigidizadores ni cartelas, simplificando

notablemente su fabricación, dota al sistema de gran estabilidad, facilita su manipulación y transporte, reduciendo los costos de fabricación, transporte, montaje y protección de la celosía ya que su superficie exterior a proteger es menor, oponiendo mayor resistencia al fuego desde su forma misma.

Adoptamos entonces la técnica estructural de celosías alternadas resueltas con perfiles tubulares, las cuales además de ser livianas, permitían adaptar sistemas para incrementar sus beneficios, como en el caso de la resistencia frente al fuego, solucionada con la refrigeración por circulación de agua dentro de estos perfiles, y la automatización de procesos que mejoran el montaje y ensamble de la estructura, una de las tareas que incidía en el incremento de los costos, y que solucionamos logrando que en un solo proceso pre-ensambláramos la totalidad de la estructura a nivel de cimentación para que progresivamente se fuera desplegando hasta quedar totalmente articulada.

La sencillez y efectividad de nuestro sistema conlleva a obtener inigualables ventajas, la fácil automatización de sus procesos, asegura que consigamos los objetivos planteados inicialmente de calidad y seguridad. Aportamos entonces la conjugación de todas las ventajas antes expuestas en un solo sistema, donde las celosías son ligeras y las columnas esbeltas y de dimensión reducida, maximizando la estabilidad necesaria para resistir el pandeo debido a la compresión. El relleno de hormigón incrementa la capacidad portante y la esbeltez, por la resistencia al fuego de ésta sección mixta, que combinada con la circulación de agua dentro de los perfiles, sobrepasamos los requerimientos exigidos sin incrementar los costos. La durabilidad de las estructuras tubulares de acero es inmejorable, carece de puntos de acumulación de suciedad y humedad que, a la larga, producen corrosión. El interior queda perfectamente protegido al cerrar los extremos en las uniones y producir una atmósfera inerte. Así la necesidad de mantenimiento se reduce a la mínima expresión.

Consideramos que éste proceso de investigación puede ser el comienzo de una serie de aplicaciones estructurales, que llevarán a los agentes que intervienen en ésta práctica a incluir ésta nueva opción de celosías tubulares de acero livianas y automatizadas como sistema estructural para sus edificaciones, solucionando el déficit habitacional gracias a las superioridades que nos permitirán construir edificaciones dignas de ser habitadas, de mejor calidad espacial y de mayor rentabilidad económica para las empresas.

Cada vez que en nuestra vida aparece un nuevo avance, éste tiene su origen en la voluntad de una persona que lo ha entendido posible y lo propone para que sea real. El temor al cambio, a lo nuevo y a lo desconocido es un paradigma que el hombre supera constantemente en su carrera de progreso. Los sistemas tradicionales nos dan la confianza de lo conocido y sin embargo nos sitúan en el pasado. Nuestra visión prospectiva sobre el uso de estructuras tubulares para edificaciones habitacionales resultan ser más económicas al ser más ligeras, más fáciles de montar y fabricar por su automatización, simplificando soluciones técnicamente complejas e inabordables con otros materiales y sistemas. Esperamos haber conseguido generar inquietud sobre esta técnica, haber llenado el vacío documental acerca de su implementación, y que nuestra propuesta genere la semilla de cambio.

## ***BIBLIOGRAFIA***

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- |     |   |  |   |                                |
|-----|---|--|---|--------------------------------|
| 1)  | American Institute of Steel Construction.   | <b>Steel Construction: A Manual for Architects, Engineers and Fabricator of Building and Otrhers Structures.</b> | Edit:<br>American Institute of Steel Construction.  | <b>New York: 2001</b>          |
| 2)  | Arango, Silvia.                             | <b>El Metal en la Arquitectura Latinoamericana.</b>  | Revista PROA # 400                                  | <b>Bogotá, Febrero de 1991</b> |
| 3)  | Aycardi, Luis Guillermo                     | <b>Es realmente Costosa la estructura de Acero?.</b>   | Revista PROA # 400                                  | <b>Bogotá, Febrero de 1991</b> |
| 4)  | Brockenbrough, Roger. Merritt, Frederick.   | <b>"Structural Steel Designer's Handbook"</b>  | McGRAW-HILL, INC.                                   | <b>New York, 1999.</b>         |
| 5)  | Echeverry, Diego, et al                     | <b>Vivienda De Interés Social: Inventario de sistemas</b>  | Dep. de Ing. Civil y Ambiental. U. de los Andes     | <b>Bogotá, 2000</b>            |
| 6)  | Fedestructuras.                             | <b>Arquitectura y Construcción Metálica.</b>   | Revista PROA # 400                                  | <b>Bogotá, Febrero de 1991</b> |
| 7)  | Fedestructuras.                             | <b>Argumentos a favor de la construcción metálica</b>  | Revista PROA # 400                                  | <b>Bogotá, Febrero de 1991</b> |
| 8)  | Franz Hart, Walter Henn, Hansjürgen Sontag. | <b>El Atlas de la construcción metálica</b>  | Editorial Gustavo Gill, S. A.                       | <b>Barcelona, 1976</b>         |
| 9)  | Gate, Konrad.                               | <b>Edificios con Estructura Metálica hoy.</b>  | Edit. Libros Técnicos                               | <b>Barcelona: , 1970-99.</b>   |
| 10) | Iglesias, Gorka. Chica, José Antonio.       | <b>Guía De Diseño, Para Estructuras En Celosía Resueltas Con Perfiles Tubulares De Acero</b>                     | Editado por: Instituto para la Construcción Tubular | <b>Madrid, 2004</b>            |

- |     |                          |  |   |   |
|-----|--------------------------|--|---|---|
| 11) | Koch, Carl C.            | <b>Nanostructured Materials. Processing, Properties and Potential Applications.</b>                      | William Andrew Publishing                                       | <b>New York, 2002.</b>                      |
| 12) | Morales, Jaime           | <b>Creencias y mitos de la construcción metálica.</b>  | Revista PROA # 400  | <b>Bogotá, Febrero de 1991</b>              |
| 13) | Saldarriaga Roa, Alberto | <b>El Metal, una presencia oculta en la Arquitectura Colombiana.</b>                                     | Revista PROA # 400  | <b>Bogotá, Febrero de 1991</b>              |
| 14) | Schwartz, Mel.           | <b>Encyclopedia Of Smart Materials</b>   | John Wiley & Sons,  | <b>New York, 2002</b>                       |
| 15) | Urdaneta H , Germán      | <b>Concreto Vs. Acero: a manera de paralelo.</b>   | Revista Construdata, Informe Especial.                          | <b>Bogotá, Junio 2002</b>                   |
| 16) | Uribe Escamilla, Jairo   | <b>Recorrido Histórico por la construcción metálica en el mundo y su desarrollo en Colombia.</b>         | ENACERO, memorias del primer encuentro del acero en Colombia.   | <b>Cartagena, Septiembre de 2001</b>        |
| 17) | Valencia, Gabriel        | <b>Pasado y Presente de la Arquitectura Metálica en el mundo.</b>  | Revista PROA # 400  | <b>Bogotá, Febrero de 1991</b>              |
| 18) | Vargas Caicedo, Hernando | <b>La construcción metálica en Colombia en Época Reciente: apuntes para una agenda de investigación.</b> | ENACERO, memorias del primer encuentro del acero en Colombia.   | <b>Cartagena, Septiembre de 2001</b>        |
| 19) | Vargas Caicedo, Hernando | <b>Cambio Técnico En La Edificación Colombiana En El Siglo XX</b>  | Sociedad Colombiana de Arquitectos                              | <b>Bogotá, SCA BIENAL 2000, capitulo VI</b> |
| 20) | Vargas Caicedo, Hernando | <b>Apuntes Para Una Historia De Las Construcciones Metálicas.</b>  | Visuales, Facultad de Arquitectura Universidad La Gran Colombia | <b>Enero-Junio 2001, Bogotá</b>             |

- 21) Wardenier, Jaap      **Perfiles Tubulares  
en Aplicaciones Estructurales**      Universidad  
Tecnológica  
de Delft  
Holanda. ICT      **Madrid, 2002**
- 22) Wei-Wen Yu.      **Cold-Formed Steel Design.**      John Wiley &  
Sons.      **New York,  
2000**
- 23) Zamora Restrepo,  
Jorge Antonio.      **Se imponen las Estructuras  
Metálicas.**      Revista  
Colombia  
Construye #  
65. ACIC      **Bogotá,  
ACIC 2001**
- 24)      REVISTAS      PAGINA WEB  
CONSULTADAS
- Architect Journal      [www.ajplus.co.uk](http://www.ajplus.co.uk)  
Architectural Record      [www.architecturalrecord.com](http://www.architecturalrecord.com)  
Architectural Review      [www.arplus.com](http://www.arplus.com)  
Architecture      [www.architecturemag.com](http://www.architecturemag.com)  
Architecture Magazine      [www.thru.to/architecture](http://www.thru.to/architecture)  
Building Desing and  
Construction      [www.bdcmag.com](http://www.bdcmag.com)  
Cadalyst      [www.cadalyst.com](http://www.cadalyst.com)  
Canadian Architecture      [www.cdnarchitect.com](http://www.cdnarchitect.com)  
Canadian Home  
Workshop      [www.canadianhomeworkshop.com](http://www.canadianhomeworkshop.com)  
Computer Aided Desing      <http://www.elsevier.com/located/cud>  
Desing Lines      [www.levolux.com](http://www.levolux.com)  
Housing Finance      [www.housingfinance.org](http://www.housingfinance.org)  
Injternational  
Landscape architecture      [www.asla.org](http://www.asla.org)  
Riba Journal      [www.riba.journal.com.uk](http://www.riba.journal.com.uk)
- 25)      COMPAÑIAS Y  
ORGANIZACIONES
- American Institute of  
Steel Cosntruction      [www.aisc.org](http://www.aisc.org)  
(AISC)  
Graycor      [www.graycor.com](http://www.graycor.com)  
Sky High      [www.skyscraperpage.com](http://www.skyscraperpage.com)  
Steel Constructions      [www.steelconstructions.com](http://www.steelconstructions.com)  
Steel Expert      [www.steelexpert.com](http://www.steelexpert.com)  
Steel Joist Stándar  
Institute      [www.steeljoist.org](http://www.steeljoist.org)

***ANEXOS***

## TUBOS ESTRUCTURALES RECTANGULARES.

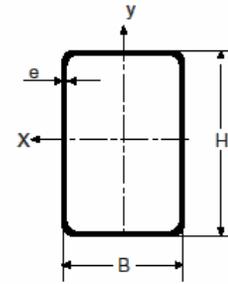
### Características Generales.

## TUBES STRUCTURELS RECTANGULAIRES.

### Caractéristiques générales.

## RECTANGULAR STRUCTURAL TUBES.

### General Characteristics.

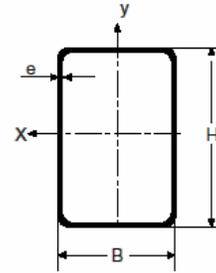


DIMENSIONES DIMENSIONS DIMENSIONS		MASA MASSE WEIGHT p (Kg/m)	SECCION SECTION CROSS-SECTION A (cm <sup>2</sup> )	EJE X X-AXIS AXE-X				EJE Y Y-AXIS AXE-Y				MODULO DE TORSION MODULE DE TORSION TORSIONAL MODULUS I <sub>t</sub> (cm <sup>4</sup> )
H × B (mm)	e (mm)			MOMENTO DE INERCIA MOMENT D'INERTIE MOMENT OF INERTIA I (cm <sup>4</sup> )	MODULO ELASTICO MODULE DE ELASTIQUE ELASTIC MODULUS W (cm <sup>3</sup> )	MODULO PLASTICO MODULE DE PLASTICITE PLASTIC MODULUS S (cm <sup>3</sup> )	RADIO DE GIRO RAYON DE ROTATION TURNING RADIUS C <sub>t</sub> (cm)	MOMENTO DE INERCIA MOMENT D'INERTIE MOMENT OF INERTIA I (cm <sup>4</sup> )	MODULO ELASTICO MODULE DE ELASTIQUE ELASTIC MODULUS W (cm <sup>3</sup> )	MODULO PLASTICO MODULE DE PLASTICITE PLASTIC MODULUS S (cm <sup>3</sup> )	RADIO DE GIRO RAYON DE ROTATION TURNING RADIUS C <sub>t</sub> (cm)	
50X30	2.5	2,817	3,59	11,30	4,52	5,70	1,77	5,05	3,37	3,98	1,19	11,74
	3,0	3,303	4,21	12,83	5,13	6,57	1,75	5,70	3,80	4,58	1,16	13,53
	4,0	4,198	5,35	15,25	6,10	8,05	1,69	6,69	4,46	5,58	1,12	16,53
60X20	2.5	2,817	3,59	13,80	4,60	6,18	1,96	2,31	2,31	2,75	0,80	6,96
	3,0	3,303	4,21	15,62	5,21	7,11	1,93	2,56	2,56	3,14	0,78	7,87
	4,0	4,198	5,35	18,42	6,14	8,68	1,86	2,90	2,90	3,75	0,74	9,24
60X40	2.5	3,602	4,59	22,07	7,36	9,06	2,19	11,74	5,87	6,84	1,60	25,14
	3,0	4,245	5,41	25,38	8,46	10,53	2,17	13,44	6,72	7,94	1,58	29,28
	4,0	5,454	6,95	30,99	10,33	13,16	2,11	16,28	8,14	9,89	1,53	36,67
	5,0	6,560	8,36	35,33	11,78	15,38	2,06	18,43	9,21	11,52	1,48	42,85
70X30	2.5	3,602	4,59	26,62	7,61	9,79	2,41	6,95	4,63	5,36	1,23	18,62
	3,0	4,245	5,41	30,57	8,74	11,38	2,38	7,90	5,26	6,20	1,21	21,53
	4,0	5,454	6,95	37,23	10,64	14,20	2,31	9,42	6,28	7,66	1,16	26,53
	5,0	6,560	8,36	42,30	12,08	16,56	2,25	10,49	6,99	8,84	1,12	30,45
70X50	2,0	3,562	4,54	31,48	8,99	10,80	2,63	18,76	7,50	8,58	2,03	37,45
	3,0	5,187	6,61	44,05	12,59	15,40	2,58	26,10	10,44	12,21	1,99	53,62
	4,0	6,710	8,55	54,67	15,62	19,48	2,53	32,22	12,89	15,41	1,94	68,07
	5,0	8,130	10,36	63,46	18,13	23,06	2,48	37,20	14,88	18,20	1,90	80,77
80X40	2,0	3,562	4,54	37,36	9,34	11,61	2,87	12,72	6,36	7,17	1,67	30,88
	3,0	5,187	6,61	52,25	13,06	16,54	2,81	17,56	8,78	10,16	1,63	43,88
	4,0	6,710	8,55	64,79	16,20	20,91	2,75	21,49	10,74	12,77	1,59	55,24
	5,0	8,130	10,36	75,11	18,78	24,74	2,69	24,59	12,30	15,02	1,54	64,97
80X60	2,0	4,190	5,34	49,53	12,38	14,73	3,05	31,87	10,62	12,11	2,44	61,22
	3,0	6,129	7,81	70,05	17,51	21,16	3,00	44,89	14,96	17,37	2,40	88,35
	4,0	7,966	10,15	87,92	21,98	26,99	2,94	56,12	18,71	22,12	2,35	113,12
	5,0	9,700	12,36	103,28	25,82	32,24	2,89	65,66	21,89	26,38	2,31	135,53
80X70	2,0	4,504	5,7	55,61	13,90	16,29	3,11	45,35	12,96	14,88	2,81	78,31
	3,0	6,600	8,4	78,94	19,74	23,47	3,06	64,26	18,36	21,43	2,76	113,44
	4,0	8,594	10,9	99,48	24,87	30,03	3,01	80,84	23,10	27,40	2,72	145,86
	5,0	10,485	13,4	117,36	29,34	35,99	2,96	95,21	27,20	32,81	2,67	175,54
90X50	2,0	4,190	5,34	57,88	12,86	15,74	3,29	23,37	9,35	10,50	2,09	53,37
	3,0	6,129	7,81	81,85	18,19	22,60	3,24	32,74	13,10	15,03	2,05	76,67
	4,0	7,966	10,15	102,71	22,82	28,82	3,18	40,71	16,28	19,09	2,00	97,70
	5,0	9,700	12,36	120,60	26,80	34,41	3,12	47,37	18,95	22,70	1,96	116,47

**TUBOS ESTRUCTURALES RECTANGULARES.**  
**Características Generales.**

**TUBES STRUCTURELS RECTANGULAIRES.**  
**Caractéristiques générales.**

**RECTANGULAR STRUCTURAL TUBES.**  
**General Characteristics.**

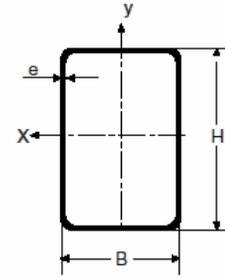


DIMENSIONES DIMENSIONS DIMENSIONS		MASA MASSE WEIGHT p (Kg/m)	SECCION SECTION CROSS- SECTION A (cm <sup>2</sup> )	EJE X X-AXIS AXE-X				EJE Y Y-AXIS AXE-Y				MODULO DE TORSION MODULE DE TORSION MODULUS I <sub>t</sub> (cm <sup>4</sup> )
H × B (mm)	e (mm)			MOMENTO DE INERCIA MOMENT D'INERTIE MOMENT OF INERTIA I (cm <sup>4</sup> )	MODULO ELASTICO MODULE DE ELASTIQUE ELASTIC MODULUS W (cm <sup>3</sup> )	MODULO PLASTICO MODULE DE PLASTICITE PLASTIC MODULUS S (cm <sup>3</sup> )	RADIO DE GIRO RAYON DE ROTATION TURNING RADIUS C <sub>t</sub> (cm)	MOMENTO DE INERCIA MOMENT D'INERTIE MOMENT OF INERTIA I (cm <sup>4</sup> )	MODULO ELASTICO MODULE DE ELASTIQUE ELASTIC MODULUS W (cm <sup>3</sup> )	MODULO PLASTICO MODULE DE PLASTICITE PLASTIC MODULUS S (cm <sup>3</sup> )	RADIO DE GIRO RAYON DE ROTATION TURNING RADIUS C <sub>t</sub> (cm)	
90X60	2.0	4,504	5,74	65,62	14,58	17,50	3,38	35,24	11,75	13,27	2,48	72,51
	3.0	6,600	8,41	93,21	20,71	25,21	3,33	49,77	16,59	19,08	2,43	104,81
	4.0	8,594	10,95	117,51	26,11	32,26	3,28	62,40	20,80	24,36	2,39	134,44
	5.0	10,485	13,36	138,68	30,82	38,66	3,22	73,24	24,41	29,13	2,34	161,39
90X70	2.0	4,818	6,14	73,37	16,30	19,26	3,46	49,98	14,28	16,24	2,85	93,20
	3.0	7,071	9,01	104,57	23,24	27,82	3,41	71,00	20,29	23,44	2,81	135,25
	4.0	9,222	11,75	132,32	29,40	35,70	3,36	89,57	25,59	30,04	2,76	174,23
	5.0	11,270	14,36	156,77	34,84	42,91	3,30	105,80	30,23	36,06	2,71	210,13
	6.0	13,214	16,83	178,07	39,57	49,46	3,25	119,82	34,23	41,51	2,67	242,91
100X40	2.0	4,190	5,34	65,38	13,08	16,54	3,50	15,61	7,81	8,69	1,71	41,47
	3.0	6,129	7,81	92,34	18,47	23,75	3,44	21,67	10,84	12,38	1,67	59,05
	4.0	7,966	10,15	115,70	23,14	30,26	3,38	26,69	13,35	15,65	1,62	74,53
	5.0	9,700	12,36	135,60	27,12	36,09	3,31	30,76	15,38	18,52	1,58	87,92
100X50	2.0	4,504	5,74	74,98	15,00	18,50	3,62	25,67	10,27	11,46	2,12	61,59
	3.0	6,600	8,41	106,46	21,29	26,66	3,56	36,06	14,42	16,44	2,07	88,56
	4.0	8,594	10,95	134,14	26,83	34,10	3,50	44,95	17,98	20,93	2,03	112,99
	5.0	10,485	13,36	158,19	31,64	40,84	3,44	52,45	20,98	24,95	1,98	134,87
100X60	2.0	4,818	6,14	84,59	16,92	20,46	3,71	38,60	12,87	14,43	2,51	84,08
	3.0	7,071	9,01	120,57	24,11	29,57	3,66	54,65	18,22	20,79	2,46	121,67
	4.0	9,222	11,75	152,58	30,52	37,94	3,60	68,68	22,89	26,60	2,42	156,27
	5.0	11,270	14,36	180,77	36,15	45,59	3,55	80,83	26,94	31,88	2,37	187,86
	6.0	13,214	16,83	205,30	41,06	52,54	3,49	91,20	30,40	36,64	2,33	216,44
100X80	2.0	5,446	6,94	103,80	20,76	24,38	3,87	73,87	18,47	20,97	3,26	134,59
	3.0	8,013	10,21	148,81	29,76	35,39	3,82	105,64	26,41	30,40	3,22	196,12
	4.0	10,478	13,35	189,47	37,89	45,62	3,77	134,17	33,54	39,15	3,17	253,79
	5.0	12,840	16,36	225,94	45,19	55,09	3,72	159,61	39,90	47,24	3,12	307,55
	6.0	15,098	19,23	258,39	51,68	63,82	3,67	182,10	45,53	54,67	3,08	357,38
110X70	3.0	8,013	10,21	169,62	30,84	37,43	4,08	84,48	24,14	27,46	2,88	180,67
	4.0	10,478	13,35	216,01	39,27	48,25	4,02	107,01	30,57	35,32	2,83	233,32
	5.0	12,840	16,36	257,62	46,84	58,27	3,97	126,96	36,28	42,56	2,79	282,14
	6.0	15,098	19,23	294,63	53,57	67,50	3,91	144,47	41,28	49,19	2,74	327,11
120X40	2.0	4,818	6,14	104,07	17,34	22,28	4,12	18,50	9,25	10,21	1,74	52,32
	3.0	7,071	9,01	148,04	24,67	32,16	4,05	25,79	12,89	14,60	1,69	74,56
	4.0	9,222	11,75	186,89	31,15	41,21	3,99	31,90	15,95	18,53	1,65	94,23
	5.0	11,270	14,36	220,81	36,80	49,45	3,92	36,93	18,46	22,02	1,60	111,35
	6.0	13,214	16,83	249,97	41,66	56,89	3,85	40,97	20,49	25,08	1,56	125,97

**TUBOS ESTRUCTURALES RECTANGULARES.**  
**Características Generales.**

**TUBES STRUCTURELS RECTANGULAIRES.**  
**Caractéristiques générales.**

**RECTANGULAR STRUCTURAL TUBES.**  
**General Characteristics.**



DIMENSIONES DIMENSIONS DIMENSIONS		MASA MASSE WEIGHT p (Kg/m)	SECCION SECTION CROSS- SECTION A (cm <sup>2</sup> )	EJE X X-AXIS AXE-X				EJE Y Y-AXIS AXE-Y				MODULO DE TORSION MODULE DE TORSION TORSIONAL MODULUS I <sub>t</sub> (cm <sup>4</sup> )
H x B (mm)	e (mm)			MOMENTO DE INERCIA MOMENT D'INERTIE MOMENT OF INERTIA I (cm <sup>4</sup> )	MODULO ELASTICO MODULE DE ELASTIQUE ELASTIC MODULUS W (cm <sup>3</sup> )	MODULO PLASTICO MODULE DE PLASTICITE PLASTIC MODULUS S (cm <sup>3</sup> )	RADIO DE GIRO RAYON DE ROTATION TURNING RADIUS C <sub>t</sub> (cm)	MOMENTO DE INERCIA MOMENT D'INERTIE MOMENT OF INERTIA I (cm <sup>4</sup> )	MODULO ELASTICO MODULE DE ELASTIQUE ELASTIC MODULUS W (cm <sup>3</sup> )	MODULO PLASTICO MODULE DE PLASTICITE PLASTIC MODULUS S (cm <sup>3</sup> )	RADIO DE GIRO RAYON DE ROTATION TURNING RADIUS C <sub>t</sub> (cm)	
120x60	2.0	5,446	6,94	131,92	21,99	27,00	4,36	45,33	15,11	16,75	2,56	107,88
	3.0	8,013	10,21	189,12	31,52	39,18	4,30	64,40	21,47	24,21	2,51	156,34
	4.0	10,478	13,35	240,74	40,12	50,49	4,25	81,25	27,08	31,08	2,47	201,12
	5.0	12,840	16,36	286,97	47,83	60,95	4,19	95,99	32,00	37,38	2,42	242,23
	6.0	15,098	19,23	328,01	54,67	70,57	4,13	108,77	36,26	43,12	2,38	279,67
120x80	3.0	8,955	11,41	230,20	38,37	46,20	4,49	123,43	30,86	35,02	3,29	255,47
	4.0	11,734	14,95	294,59	49,10	59,77	4,44	157,29	39,32	45,23	3,24	331,24
	5.0	14,410	18,36	353,14	58,86	72,45	4,39	187,78	46,94	54,74	3,20	402,27
	6.0	16,982	21,63	406,06	67,68	84,25	4,33	215,03	53,76	63,55	3,15	468,54
	7.0	19,121	24,36	438,27	73,04	92,65	4,24	232,45	58,11	69,98	3,09	529,42
120x100	3.0	9,897	12,61	271,27	45,21	53,22	4,64	205,28	41,06	47,03	4,04	367,01
	4.0	12,990	16,55	348,43	58,07	69,05	4,59	263,24	52,65	60,98	3,99	477,84
	5.0	15,980	20,36	419,31	69,88	83,95	4,54	316,27	63,25	74,09	3,94	582,86
	6.0	18,866	24,03	484,11	80,68	97,93	4,49	364,56	72,91	86,38	3,89	682,04
	7.0	21,319	27,16	527,77	87,96	108,47	4,41	397,70	79,54	95,74	3,83	776,17
140x60	3.0	8,955	11,41	278,08	39,73	49,98	4,94	74,16	24,72	27,63	2,55	191,92
	4.0	11,734	14,95	355,59	50,80	64,63	4,88	93,81	31,27	35,56	2,51	247,13
	5.0	14,410	18,36	425,89	60,84	78,30	4,82	111,16	37,05	42,88	2,46	297,97
	6.0	16,982	21,63	489,19	69,88	91,01	4,76	126,34	42,11	49,60	2,42	344,46
	7.0	19,121	24,36	524,93	74,99	99,79	4,64	135,69	45,23	54,44	2,36	384,95
140x80	3.0	9,897	12,61	334,40	47,77	58,20	5,15	141,23	35,31	39,64	3,35	317,07
	4.0	12,990	16,55	429,60	61,37	75,51	5,10	180,42	45,10	51,31	3,30	411,60
	5.0	15,980	20,36	517,06	73,87	91,80	5,04	215,94	53,99	62,24	3,26	500,51
	6.0	18,866	24,03	597,00	85,29	107,09	4,98	247,96	61,99	72,43	3,21	583,80
	7.0	21,319	27,16	648,87	92,70	118,41	4,89	269,87	67,47	80,20	3,15	661,38
140x100	3.0	10,839	13,81	390,71	55,82	66,42	5,32	233,52	46,70	52,85	4,11	459,63
	4.0	14,246	18,15	503,61	71,94	86,39	5,27	300,12	60,02	68,66	4,07	599,26
	5.0	17,550	22,36	608,23	86,89	105,30	5,22	361,44	72,29	83,59	4,02	732,06
	6.0	20,750	26,43	704,81	100,69	123,17	5,16	417,65	83,53	97,66	3,97	857,99
	7.0	23,517	29,96	772,81	110,40	137,03	5,08	458,36	91,67	108,76	3,91	978,81
150x50	3.0	8,955	11,41	298,55	39,81	51,43	5,12	52,65	21,06	23,49	2,15	150,22
	4.0	11,734	14,95	381,39	50,85	66,47	5,05	66,16	26,47	30,13	2,10	192,14
	5.0	14,410	18,36	456,29	60,84	80,48	4,99	77,87	31,15	36,20	2,06	230,05
	6.0	16,982	21,63	523,47	69,80	93,48	4,92	87,89	35,16	41,72	2,02	263,99
	7.0	19,121	24,36	559,30	74,57	102,31	4,79	93,75	37,50	45,62	1,96	291,81

## TUBOS ESTRUCTURALES RECTANGULARES.

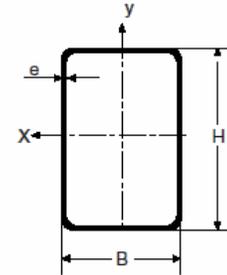
### Características Generales.

## TUBES STRUCTURELS RECTANGULAIRES.

### Caractéristiques générales.

## RECTANGULAR STRUCTURAL TUBES.

### General Characteristics.



DIMENSIONES DIMENSIONS		MASA MASSE WEIGHT $\rho$ (Kg/m)	SECCION SECTION CROSS- SECTION A (cm <sup>2</sup> )	EJE X X-AXIS AXE-X				EJE Y Y-AXIS AXE-Y				MODULO DE TORSION MODULE DE TORSION TORSIONAL MODULUS I <sub>t</sub> (cm <sup>4</sup> )
H x B (mm)	e (mm)			MOMENTO DE INERCIA MOMENT D'INERTIE MOMENT OF INERTIA I (cm <sup>4</sup> )	MODULO ELASTICO MODULE DE ELASTIQUE ELASTIC MODULUS W (cm <sup>3</sup> )	MODULO PLASTICO MODULE DE PLASTICITE PLASTIC MODULUS S (cm <sup>3</sup> )	RADIO DE GIRO RAYON DE ROTATION TURNING RADIUS C <sub>r</sub> (cm)	MOMENTO DE INERCIA MOMENT D'INERTIE MOMENT OF INERTIA I (cm <sup>4</sup> )	MODULO ELASTICO MODULE DE ELASTIQUE ELASTIC MODULUS W (cm <sup>3</sup> )	MODULO PLASTICO MODULE DE PLASTICITE PLASTIC MODULUS S (cm <sup>3</sup> )	RADIO DE GIRO RAYON DE ROTATION TURNING RADIUS C <sub>r</sub> (cm)	
150x70	3,0	9,897	12,61	363,39	48,45	60,25	5,37	111,43	31,84	35,50	2,97	276,37
	4,0	12,990	16,55	466,68	62,22	78,15	5,31	141,90	40,54	45,88	2,93	357,69
	5,0	15,980	20,36	561,45	74,86	94,98	5,25	169,30	48,37	55,56	2,88	433,62
	6,0	18,866	24,03	647,95	86,39	110,76	5,19	193,76	55,36	64,55	2,84	504,14
	7,0	21,319	27,16	702,56	93,67	122,33	5,09	210,29	60,08	71,38	2,78	568,52
150x100	4,0	14,874	18,95	594,60	79,28	95,67	5,60	318,57	63,71	72,50	4,10	661,63
	5,0	18,335	23,36	719,20	95,89	116,73	5,55	384,02	76,80	88,34	4,05	808,68
	6,0	21,692	27,63	834,69	111,29	136,68	5,50	444,19	88,84	103,30	4,01	948,34
	7,0	24,616	31,36	917,44	122,33	152,36	5,41	488,68	97,74	115,27	3,95	1082,81
	8,0	27,665	35,24	1008,13	134,42	169,16	5,35	535,65	107,13	127,85	3,90	1205,89
150x120	4,0	16,130	20,55	679,89	90,65	107,35	5,75	483,04	80,51	92,25	4,85	891,21
	5,0	19,905	25,36	824,37	109,92	131,23	5,70	584,72	97,45	112,70	4,80	1092,37
	6,0	23,576	30,03	959,17	127,89	153,96	5,65	679,23	113,20	132,13	4,76	1284,79
	7,0	26,814	34,16	1060,70	141,43	172,38	5,57	751,51	125,25	148,02	4,69	1472,84
	8,0	30,177	38,44	1169,61	155,95	191,88	5,52	827,66	137,94	164,69	4,64	1646,36
160x60	3,0	9,897	12,61	389,86	48,73	61,99	5,56	83,91	27,97	31,05	2,58	228,15
	4,0	12,990	16,55	500,35	62,54	80,38	5,50	106,38	35,46	40,04	2,54	293,96
	5,0	15,980	20,36	601,52	75,19	97,66	5,44	126,33	42,11	48,38	2,49	354,68
	6,0	18,866	24,03	693,64	86,71	113,84	5,37	143,91	47,97	56,08	2,45	410,35
	7,0	21,319	27,16	749,81	93,73	125,55	5,25	155,47	51,82	61,86	2,39	459,52
160x80	3,0	10,839	13,81	463,81	57,98	71,41	5,80	159,03	39,76	44,26	3,39	380,34
	4,0	14,246	18,15	597,71	74,71	92,86	5,74	203,54	50,89	57,39	3,35	494,10
	5,0	17,550	22,36	721,69	90,21	113,16	5,68	244,11	61,03	69,74	3,30	601,34
	6,0	20,750	26,43	836,01	104,50	132,32	5,62	280,89	70,22	81,31	3,26	702,06
	7,0	23,517	29,96	913,78	114,22	146,97	5,52	307,28	76,82	90,42	3,20	796,66
160x90	3,0	11,310	14,41	500,79	62,60	76,12	5,90	206,79	45,95	51,31	3,79	465,40
	4,0	14,874	18,95	646,39	80,80	99,10	5,84	265,54	59,01	66,66	3,74	606,16
	5,0	18,335	23,36	781,77	97,72	120,91	5,79	319,52	71,00	81,16	3,70	739,70
	6,0	21,692	27,63	907,19	113,40	141,56	5,73	368,91	81,98	94,82	3,65	866,01
	7,0	24,616	31,36	995,77	124,47	157,68	5,64	405,31	90,07	105,75	3,60	986,57
160x120	4,0	16,758	21,35	792,44	99,06	117,82	6,09	509,97	84,99	96,89	4,89	979,51
	5,0	20,690	26,36	962,02	120,25	144,16	6,04	617,81	102,97	118,45	4,84	1201,20
	6,0	24,518	31,23	1120,75	140,09	169,28	5,99	718,25	119,71	138,97	4,80	1413,54
	7,0	27,913	35,56	1241,74	155,22	189,81	5,91	796,26	132,71	155,93	4,73	1621,54
	8,0	31,433	40,04	1371,23	171,40	211,50	5,85	877,92	146,32	173,65	4,68	1813,87