



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE ENCOFRADOS METÁLICOS PARA LA FUNDICIÓN DE LOS PILARES DE UN PUENTE EMPLEANDO SOFTWARE CAD/CAE

Juan Paz-Jáuregui

Piura, diciembre de 2014

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

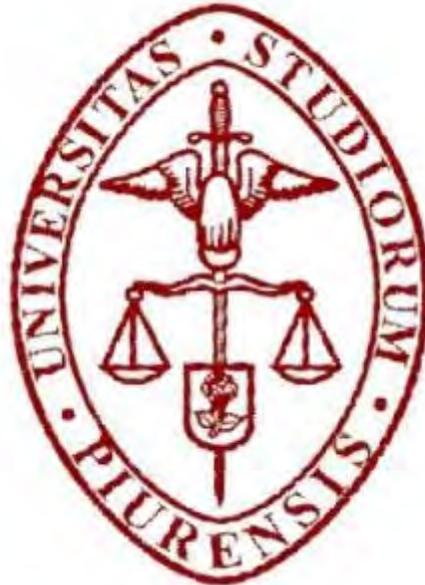
Paz, J. (2014). *Diseño de un sistema de encofrados metálicos para la fundición de los pilares de un puente empleando software CAD/CAE*. Tesis de pregrado no publicado en Ingeniería Mecánico Eléctrica. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico Eléctrica. Piura, Perú.



Esta obra está bajo [una licencia](#)
[Creative Commons Atribución-](#)
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA



“Diseño de un sistema de encofrados metálicos para la fundición de los pilares de un puente empleando software CAD/CAE”

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico Eléctrico

Juan Esteban Paz Jáuregui

Asesor: Ing. Jorge Machacuay Arevalo

Piura, Diciembre 2014

“A mis padres por su apoyo incondicional”

Prólogo

Siendo los encofrados elementos importantes en el proceso de construcción en concreto armado, y considerando que el tiempo de fabricación y el costo final de la obra dependen en gran parte del tipo de encofrado empleado, se realiza esta investigación en la cual se propone un sistema modular que pueda ser utilizado varias veces y se comparan las alternativas de construcción en metal y madera.

En la presente investigación se ha buscado establecer un proceso constructivo para la construcción de un pilar hueco que pueda ser utilizado en la construcción de un puente de gran tamaño y que será construido en segmentos de altura constante. Con este diseño se busca una alternativa que permita reducir el costo del encofrado al mismo tiempo que se reduce el tiempo de construcción y que sea un sistema seguro y liviano, que produzca un terminado perfecto en la superficie fundida ya que se trata de una estructura que quedara vista. Esta propuesta será estudiada considerando las alternativas de construcción en acero y en madera

El aporte que pretende brindar esta tesis es establecer un punto de inicio para el diseño de encofrados metálicos, teniendo en cuenta que en la actualidad se requiere de respuestas rápida de decisión considerando las técnicas y los equipos de que se dispone en una obra. Empleando las nuevas herramientas de simulación y análisis mediante elementos finitos, se establece un proceso para diseño empleando las técnicas CAD y CAE. El software utilizado para este trabajo de análisis y diseño mediante simulación matemática ha sido SolidWorks, que dispone de las facilidades de dibujo tridimensional y generación automática de elementos finitos que se resuelven en forma matricial.

Quiero agradecer a mi director de tesis el ingeniero Jorge Machacuay, por su paciencia, consejos y apoyo. A la Universidad de Piura y a todo el personal de profesores que me han acogido en sus aulas.

Índice general

Introducción.....	1
Capítulo 1 Encofrados	3
1.1 Introducción.....	3
1.2 Requerimientos y materiales para un encofrado.....	13
1.3 Clasificación de Encofrados	14
1.3.1. Encofrados Verticales.....	14
1.3.2. Encofrados Horizontales	14
1.3.3. Encofrados Especiales	14
1.4 Estado de la Ingeniería en Encofrados.....	15
Capítulo 2 Descripción del Proyecto	23
2.1 Funcionamiento del encofrado trepante.....	27
Capítulo 3 Proceso de diseño de encofrado metálico.....	33
3.1 Comportamiento del concreto.....	33
3.2 Presión lateral del concreto en un encofrado	34
3.3 Cálculo de la presión hidrostática ejercida por el concreto	36
3.4 Diseño del encofrado exterior.....	37
3.4.1. Diseño de costillas horizontales	39
3.4.2. Diseño de costillas verticales.....	43
3.5 Diseño de la lámina del encofrado.....	47
3.6 Diseño CAD encofrado exterior	53
3.7 Diseño de tirantes.....	56
3.7.1. Dimensionamiento por esfuerzo cortante de la sujeción	57
3.7.2. Cálculo a tracción de la sujeción	58
3.7.3. Diseño tirante/anclaje encofrado	61
3.8 Diseño del encofrado interior	62
3.8.1. Diseño geométrico de encofrados internos.....	62
3.9 Diseño plataforma.....	67
Capítulo 4 Cálculos y revisión asistida por computadora	71
4.1 Modelado del encofrado para simulación.....	72

4.2	Mallado del modelo	74
4.3	Condiciones de carga (cargas, restricciones, materiales).....	75
4.3.1.	Materiales.	75
4.3.2.	Cargas.	76
4.3.3.	Restricciones.....	77
4.4	Simulación	78
Capítulo 5 Análisis económico.....		85
5.1	Costo de fabricación	85
5.2	Materiales.....	85
5.3	Costeo del proceso de plegado / deformación plástica	86
5.4	Costeo del proceso de corte por plasma.....	88
5.5	Costeo del proceso de soldadura.....	90
5.5.1.	SMAW eficiencia de deposición	92
5.5.2.	GMAW eficiencia de deposición	93
5.5.3.	Costos de electrodo/gas/alambre	94
5.5.4.	Costo de soldadura MIG.....	95
5.6	Costo de pintura	97
5.7	Costo de fabricación del encofrado.....	98
5.7.1.	Costo de fabricación de elementos del encofrado triangular.....	98
5.7.2.	Costos de soldadura	103
5.7.3.	Estimación del costo de procesamiento de material o fabricación.....	105
5.8	Comparación de encofrado tradicional con sistema propuesto.....	106
5.8.1.	Encofrado tradicional (madera)	107
5.8.2.	Sistema de encofrado metálico	112
5.8.3.	Comparación de alternativas	113
Conclusiones.....		115
Bibliografía.....		117

Introducción

Una de las nuevas políticas implementadas en el Ecuador, exige que todos los proyectos de construcción realizados por el Estado o con inversión extranjera, deban emplear prioritariamente materiales o productos fabricados localmente. En este contexto, se están ejecutando varios proyectos viales y de infraestructura en los cuales se requiere construir estructuras grandes como puentes, presas, y otras obras, en las que requiere de encofrados para la fundición de las columnas, muros, vigas y en general todos los elementos estructurales fabricados en hormigón. Entre los proyectos que se están construyendo en el país se puede citar un sinnúmero de proyectos hidroeléctricos y varias carreteras. Una de esas carreteras es la conocida como la Ruta Viva, que será la carretera de integración entre la ciudad de Quito, las poblaciones de Cumbaya y Tumbaco, y que se convertirá en una solución para el tráfico de acceso y salida al nuevo aeropuerto Mariscal Sucre ubicado en Tababela. Este proyecto contempla la construcción de dos puentes, el primero sobre el río San Pedro y el segundo sobre el río Chiche. Siendo que los puentes serán construidos en hormigón armado, se presenta una propuesta de construcción de columnas huecas de gran sección, las que serían construidas con encofrados deslizantes, que ascienden conforme se vayan fundiendo las secciones inferiores. Para crear las formas de las vigas y pilares de los puentes se requiere de la fabricación de encofrados especiales cuyas formas se ajusten al diseño arquitectónico y estructural de cada elemento.

El presente trabajo trata del diseño de un sistema de encofrado doble para la fundición de los pilares huecos de estos puentes. El reto que se presenta es el de diseñar un encofrado del tipo “Slip-Form” o encofrado deslizante, tal que un mismo segmento de encofrado permita fundir todo el pilar en varias etapas de manera progresiva. Teniendo en cuenta que la geometría del pilar es hueca, se deberá conformar un sistema formado por un encofrado exterior y otro interior que se sujetan entre sí mediante barras o tirantes. En cada encofrado se colocara plataformas que permitan disponer de un área de operación de los trabajadores que facilite realizar los trabajos de armado, ajuste, hormigonado y vibrado del hormigón, y luego el desarmado y movimiento hacia la nueva posición en el nivel superior. Normalmente al hablar de encofrados para la construcción se piensa en estructuras de madera puesto que tradicionalmente los encofrados se han construido con ese material. Sin embargo, el trabajo con madera resulta muy laborioso y de mucho riesgo si se trabaja en la altura. La madera debe ser permanentemente revisada ya que generalmente con el uso y por estar en contacto con un material húmedo, se deteriora y debe ser reemplazada parcial o totalmente. Esto da origen a la generación de desperdicios y el terminado de la superficie construida no tiene la misma estética que cuando se emplea un encofrado metálico. Las piezas deben unirse mediante clavos y en algunos casos con pernos. Por otro lado, dado que

la resistencia a flexión de la madera es bastante inferior a la del acero, las secciones necesarias deben ser más grandes y por lo tanto se incrementa el peso. Un encofrado construido en madera es muy conveniente para obras pequeñas en donde se utilizará pocas veces y por lo tanto luego será desechado. El material utilizado podrá utilizarse en otro encofrado y parte será considerado como desperdicio. La fabricación de estos encofrados se lo hace generalmente a pie de obra utilizando madera de diferentes medidas y espesores, y en muchos casos utilizando tableros de madera laminada. Generalmente las obras construidas con este sistema de encofrados deben ser resanadas luego de la fundición debido a las anomalías que se forman especialmente en las uniones de los tableros. Cuando se trata de una superficie terminada como *hormigón visto*, se deberá tener mucho cuidado en controlar este defecto que presentan los encofrados de madera.

Frente a esto aparece la solución de los encofrados metálicos, estos permiten que sus elementos puedan ser fabricados en una planta en donde se dispondrá de las herramientas adecuadas para la fabricación y con el personal y equipos necesarios para realizar un adecuado control de calidad en cada proceso de fabricación. Las piezas listas se transportarán a la obra y serán directamente utilizadas. Se podrá disponer de elementos más grandes que cubran mayor superficie limitándose únicamente por su peso y por las facilidades de transporte de que se dispongan. Al ser la superficie del metal absolutamente lisa, la separación del encofrado de la superficie fundida es muy fácil de manera que no se desprenda el hormigón que aún se encuentra en un estado fresco. Luego de haber fundido una sección, y cuando el concreto haya obtenido una resistencia adecuada, el encofrado podrá ser retirado y levantado hacia una posición inmediatamente superior posiblemente ayudado por una torre grúa o un elevador.

Al comparar un encofrado de madera con uno metálico, se encuentra que los costos elevados que pueda implicar la construcción de un encofrado metálico se pueden compensar con las veces que puede ser reutilizado sin que sea necesario realizar ninguna reparación ni arreglo. En general la construcción de encofrados metálicos se justifica cuando se necesita construir obras muy grandes en las que el encofrado será utilizado varias veces como sería en el presente caso. Lo propio sucede en el caso de los moldes para construir bordillos en las calles, pozos de alcantarillados, etc.

El tiempo de fabricación de cada encofrado es generalmente largo especialmente cuando las formas a conseguir son irregulares. Eso repercute en los costos finales y especialmente en el tiempo de entrega de la obra. Por esto, se trata de estandarizar las obras para poder disponer de encofrados modulares que permitan utilizar varias veces la misma forma. En un contrato de construcción es importante considerar el tiempo de ejecución de una actividad por cuanto, mientras más pronto se la pueda cumplir, el cliente podrá poner en servicio su obra obteniendo réditos económicos con anticipación. En el caso de un puente, la obra entrará en servicio con anticipación y eso producirá ingresos anticipadamente a la institución o propietario de la obra y el beneficio al usuario final.

El trabajo a desarrollar aborda todas estas consideraciones y plantea una alternativa de diseño de estos sistemas de encofrado utilizando un software basado en el método de los elementos finitos (FEM) y además teniendo en cuenta otro punto importante que es el considerar que el diseño debe facilitar el proceso de manufactura del sistema. Se complementa el estudio con un análisis técnico comparativo entre los dos tipos de encofrado mencionados anteriormente.

Capítulo 1

Encofrados

1.1 Introducción

Formas, moldes, encofrado, cimbras, formaletas son varios de los nombres con los que se describe a los equipos o moldes necesarios para dar forma a una estructura durante su construcción.

Las primeras estructuras construidas por el hombre aparecieron en Mesopotamia y luego se extendieron al Imperio Romano y consistieron en los arcos, las bóvedas y las cúpulas, estructuras que trabajan solamente a compresión y que se construían generalmente con piedra trabada y arcilla. Los romanos utilizaron estas estructuras para construir diferentes obras como puentes, acueductos, alcantarillas y cúpulas para sus edificaciones.

Las primeras estructuras creadas por el hombre fueron el arco y la bóveda. En ellas se desarrollan únicamente fuerzas de compresión, sin embargo para su construcción necesitaban de un molde sobre el que se colocarían las piedras talladas a manera de cuñas que se comprimen unas con otras. Una vez completado el arco, el molde se podía sacar y la estructura se auto soportaba. Las formas o soportes eran proporcionadas por un sistema de puntales y tableros generalmente contruidos en madera, arcilla, ladrillos u otros materiales que les permitan moldear la forma del arco. Estos encofrados eran desarmados y retirados, y podían ser reutilizados.

Los arcos tuvieron su desarrollo empezando desde el más elementas que es arco de medio punto, hasta arcos más elegantes y esbeltos como el de herradura, el elíptico, de tres centros, el lobulado, etc.



Figura 1-1: Arquería del acueducto de Segovia¹



Figura 1-2: Arco de medio punto romano²

¹ Tomado de: <http://hectorsaurio.wordpress.com/2011/03/27/acueducto/>

² Tomado de: <http://www.romanicoaragones.com/MAN/01-MuseoArqueologicoNacional03.htm>

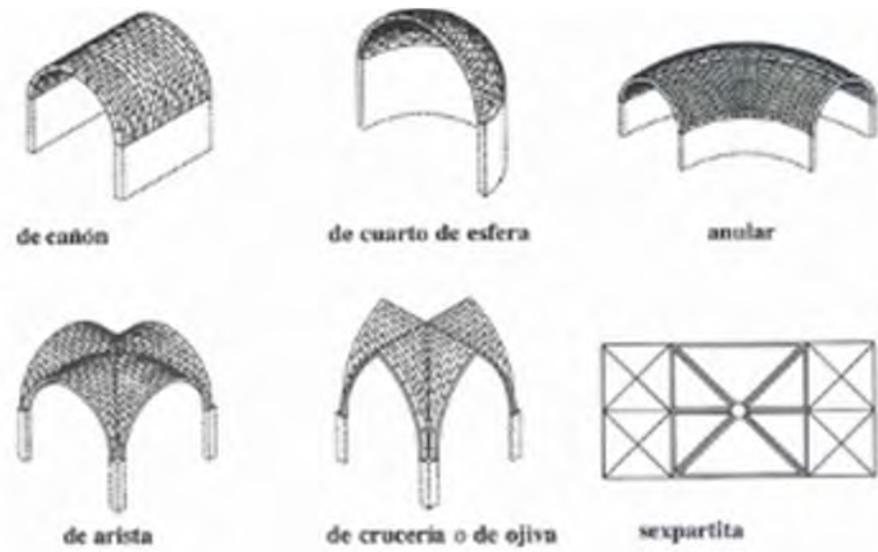


Figura 1-3: Tipos de bóveda romana³



Figura 1-4: Forma o encofrado de un arco primitivo.⁴

³ Tomado de: <http://es.wikipedia.org/wiki/Bóveda>

⁴ Tomado de: [http://es.wikipedia.org/wiki/Arco_\(arquitectura\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Arco_(arquitectura))

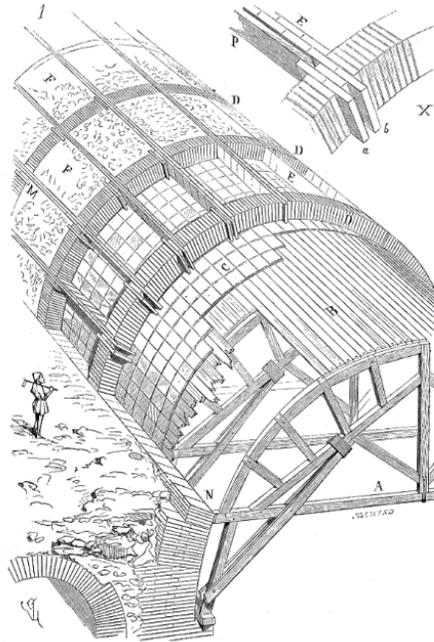


Figura 1-5: Proceso constructivo de una bóveda romana con cimbras y textiles.⁵

En la Edad Media, se construyeron un sinnúmero de edificaciones especialmente religiosas siempre con la intervención de los encofrados y andamios.



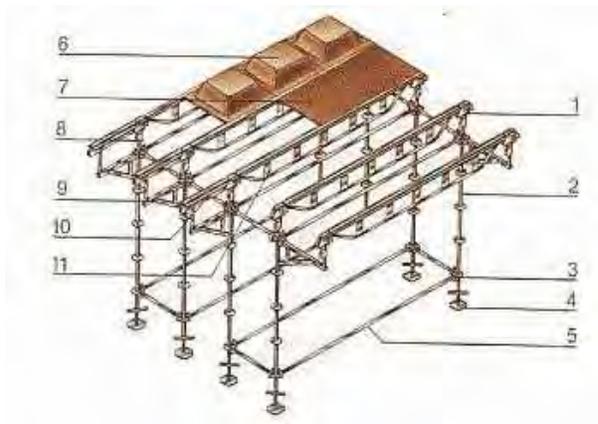
Figura 1-6: Modelos de cúpulas y arcos en las puertas.

En la Edad Moderna, y con la invención del concreto, y del hormigón armado, los encofrados tuvieron una importancia cada vez creciente pues el concreto en estado fresco

⁵ Tomado de: <http://es.wikipedia.org/wiki/Bóveda>

tiene una consistencia semilíquida y por tanto, las formas o encofrados deben diseñarse para resistir y contener el peso del material antes de que adquiera su resistencia y se solidifique o fragüe.

Con el desarrollo del hormigón armado, el hormigón pretensado y los aditivos para mejorar la calidad y reducir el tiempo de fraguado del concreto, los encofrados han debido desarrollarse haciendo que el tiempo entre el armado, la fundición, el desarmado y una nueva utilización sean más cortos. De esta manera se han desarrollado encofrados o cimbras que se pueden armar en muy poco tiempo y que pueden ser reutilizados completamente sin ningún desperdicio como generalmente sucede con el encofrado de madera.

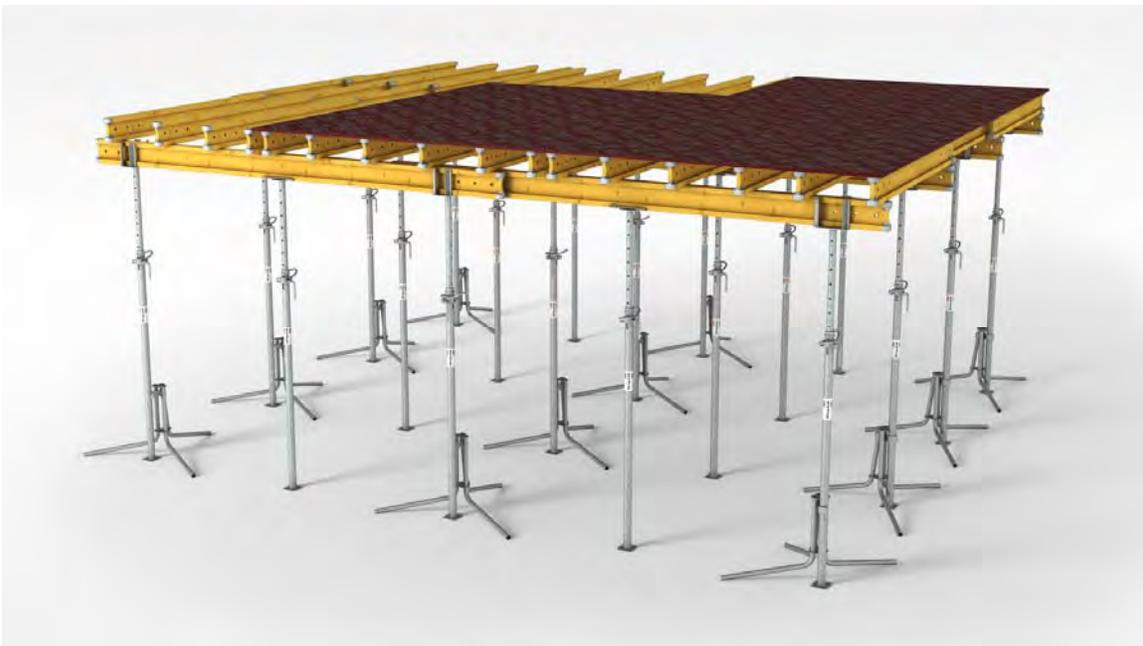


1. Cabeza del puntal.
2. Puntal
3. Collarín.
4. Base regulable.
5. Rigidizador.
6. Casetón o alivianamiento
7. Tablero metálico o de madera
8. Cabezal de recuperación
9. Ménsula
10. Viga transversal (1.0 m)
11. Viga de celosía (2 o 3 m)

Figura 1-7: Componentes de un encofrado para losas.⁶

Encofrado es el término empleado para designar a un molde permanente o temporal que permite definir y darle forma al concreto o materiales similares, con el fin de conseguir geometrías precisas tanto para aplicaciones arquitectónicas o estructurales. Debido a que cada proyecto de Ingeniería o Arquitectura es diferente, es necesario diseñar un encofrado para cada proyecto.

El nivel de esfuerzo requerido para diseñar dicho encofrado es tan importante como el diseño y cálculo de la estructura de concreto. Y por último el nivel de calidad del encofrado definirá la calidad, el costo y el tiempo de construcción de la estructura.

**Figura 1-8: Encofrado para losas PERI Multiflex.⁷**

El encofrado es muy importante debido a que resulta ser un gran componente del costo de una estructura de concreto, en muchos casos los encargados del diseño no consideran el encofrado dentro de la etapa de diseño, y en varias ocasiones para la construcción de una estructura, el tiempo y el costo invertidos en instalar, mover y remover los encofrados es mucho mayor que el empleado en armado del refuerzo y proceso de fundición del concreto. En muchas estructuras el costo del encofrado y el proceso de armado/desarmado es tan alto que el costo final de la estructura es resulta muy elevado.

⁶ Tomado de: <http://josejuanvidal.wordpress.com/page/2/>

⁷ Tomado de: <http://www.peri.com/en/solutions/products/formwork-systems/slab-formwork/multiflex.cfm>

El propósito principal del encofrado es soportar y dar forma al concreto y sujetar el refuerzo para que mantenga el recubrimiento necesario hasta que el concreto adquiriera la resistencia suficiente para soportarse por sí mismo. El diseño requiere un sistema de encofrado que sea seguro, económico y facilite el proceso de armado y desarmado en la obra, reiterando lo mencionado anteriormente que la calidad estética del proyecto depende mucho del encofrado.

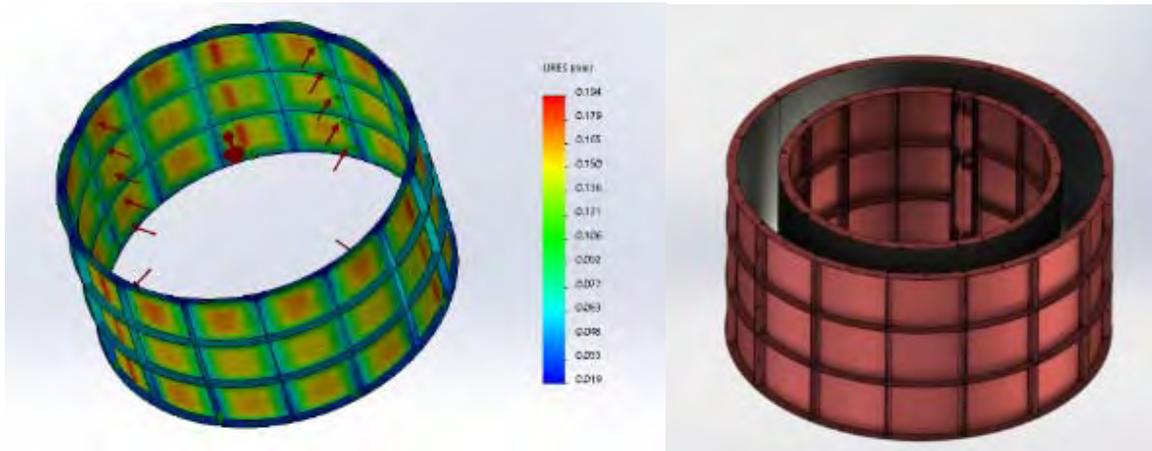


Figura 1-9: Estudio de deformación encofrado de pozo y *render* del encofrado.⁸

Se puede apreciar en la figura.2.10 dos juntas de los encofrados, una vertical que apenas resalta en el pozo fundido y la horizontal que se podría mejorar para evitar un trabajo de limpieza posterior al fraguado del concreto armado.



⁸ *Render* y diseño CAD de encofrado por Juan Esteban Paz para Metalshop, Ecuador.

Figura 1-10: Detalle de encofrado de pozo.⁹

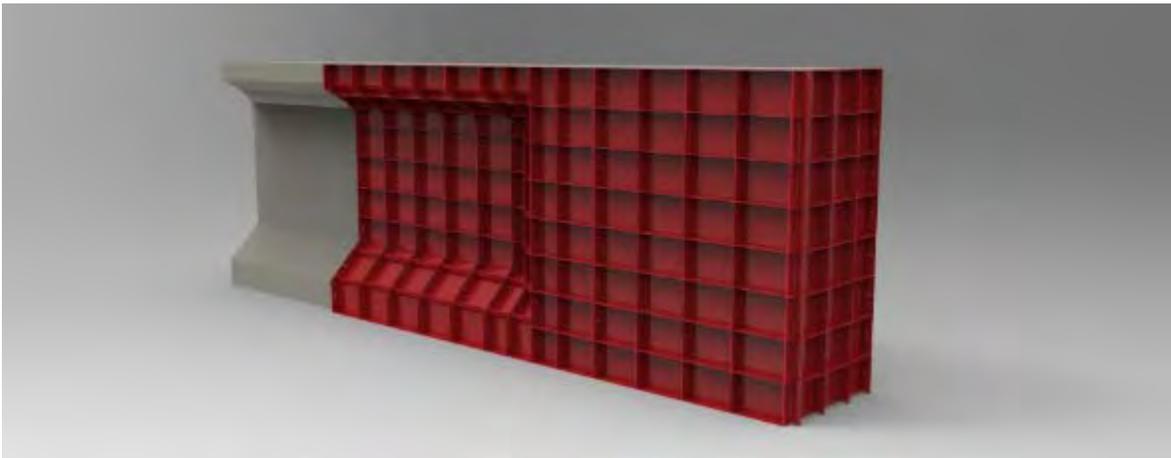


Figura 1-11: Render del diseño de encofrado para una viga post-tensada¹⁰

Para iniciar el diseño de un encofrado es necesario tener predefinida la geometría deseada del elemento, esta información es proporcionada por el diseño arquitectónico funcional y estructural. Será necesario definir si se trata de un elemento prefabricado o fundido en sitio. En el caso del primero se deberá definir el método de izaje y montaje, en este caso dependiendo de los equipos disponibles (grúas), se deberá considerar el peso del elemento y la longitud de manipulación.

Con estas premisas, el análisis de los encofrados se realizará considerando las cargas a las que estará sometido. Es aquí que con la ayuda del software CAD CAE *SolidWorks* y *SolidWorks Simulation*, se puede simular y realizar los análisis necesarios que permitan diseñar cada elemento componente del encofrado.

En la figura. 2.12 se puede apreciar la magnitud de un encofrado de viga, de la misma forma se debe buscar que las deflexiones en el encofrado sean mínimas, a la vez, debe ser de fácil armado y el acabado sea lo mejor posible con el fin de lograr un efecto estético adecuado y poder justificar la inversión en el encofrado.

Otro de los proyectos realizados con MetalShop fue el encofrado para el cabezal de una pila, los pilares construidos para los puentes o pasos elevados contemplaban en su diseño un remate cónico, de la misma forma este encofrado requiere que se asegure una deflexión mínima en la lámina y también que las uniones sean lo más limpias posible con el fin de conseguir un acabado perfecto de la superficie y reducir los resanes.

⁹ *Idem*, Proyecto de la Ruta Viva en Quito (Pozos de acceso al sistema de desagüe)

¹⁰ Render de diseño Encofrado para viga postensada por Juan Esteban Paz, para Metalshop en Proyecto Ruta Viva Quito-Ecuador.



Figura 1-12: Encofrado de viga post-tensada (fabricada y diseñada por Metalshop).¹¹



Figura 1-13: Detalle de viga desencofrada.¹²

¹¹ Ensamblaje de encofrado para viga postensada: Metalshop en Proyecto Ruta Viva Quito-Ecuador.



Figura 1-14: Detalle de viga lista para el montaje.¹³

En las figuras 2.13 y 2.14 se pueden apreciar el acabado de las vigas

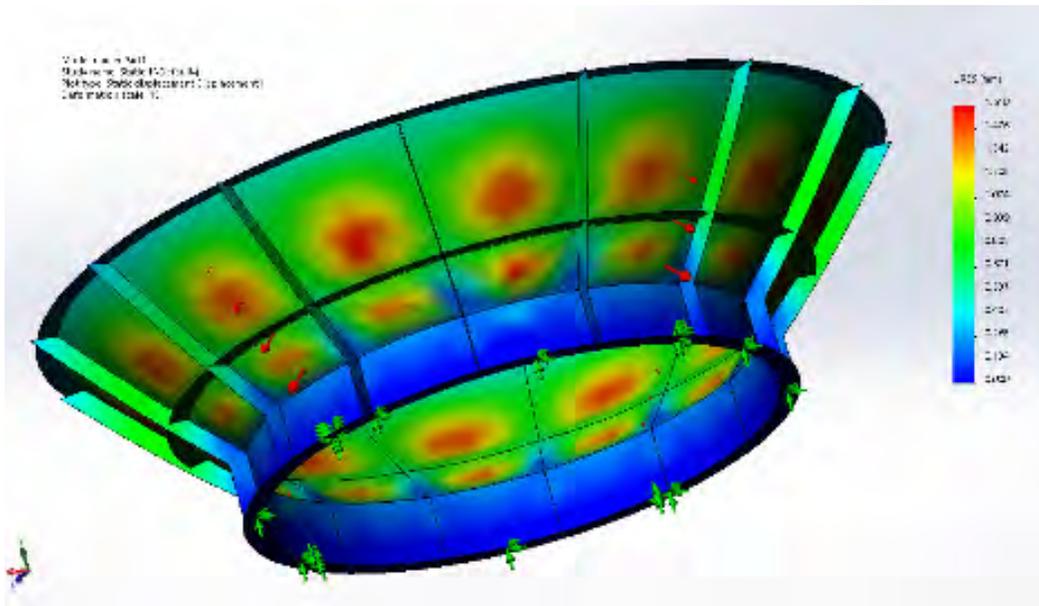


Figura 1-15: Estudio de deflexión de la lámina de encofrado.¹⁴

¹² Viga desencofrada: Metalshop en Proyecto Ruta Viva Quito-Ecuador.

¹³ Viga desencofrada: Metalshop en Proyecto Ruta Viva Quito-Ecuador.

1.2 Requerimientos y materiales para un encofrado

Un buen encofrado deberá cumplir con los siguientes requerimientos¹⁵:

- Debe soportar todos los tipos de cargas muertas y vivas presentes sin desarrollar deformaciones considerables.
- Su construcción debe ser lo suficientemente rígida y contar con refuerzos horizontales y verticales que permitan mantener la forma deseada durante el proceso de fundición.
- Las juntas en el encofrado deben ser impermeables para evitar filtraciones de concreto en el proceso de fundición.
- El proceso de encofrado y desencofrado debe permitir remover varias piezas en las secuencias deseadas sin dañar el concreto.
- El material del encofrado debe ser barato y de fácil disponibilidad en el mercado, y ser adecuado para reutilizarse.
- El encofrado debe ajustarse con precisión a la forma del elemento y desmoldarse con facilidad.
- Debe ser lo más liviano posible sin perder resistencia.
- El material del encofrado debe mantener su forma cuando no está en uso.
- Debe asentarse en una base firme y libre de movimiento.

A lo largo de los tiempos se ha implementado varios materiales para construir encofrados, según la complejidad y la magnitud de cada proyecto se facilita la selección de estos:

Para un encofrado que prevé un reusó muy alto (generalmente los proyectos grandes), se prefiere emplear acero, debido a que los elementos que componen el encofrado podrán ser más grandes resultando en menos piezas para el proceso de armado y desarmado del mismo.

Para trabajos de pequeña magnitud es muy probable que un encofrado de madera sea suficiente, y por último para trabajos en sitio se prefiere emplear encofrados plásticos o de aluminio modulares.

Entre los problemas grandes que presenta un encofrado de madera se puede indicar que el acabado de la superficie no es óptimo y por otro lado, la reutilización es muy limitada debido a que el momento de desmontaje del encofrado hay siempre daños o roturas en la madera.

Por otro lado un encofrado de acero se puede desmoldar y limpiar con mucha facilidad y la reutilización es casi ilimitada.

¹⁴ Diseño de Encofrado para terminal de columna por Juan Esteban Paz, para Metalshop en Proyecto Ruta Viva Quito-Ecuador.

¹⁵ K. Baxi, Chirag, “Formwork, A Concrete Quality Tool”, en 36th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES: 14 - 16 August 2011, Singapore, Article Online Id: 100036029

1.3 Clasificación de Encofrados¹⁶

Por el tipo de terminado de la superficie

- Encofrados para hormigón visto.
- Encofrados para hormigón para revestir o enlucir.

Por el número de usos

- Encofrados recuperables
- Encofrados perdidos

Por su forma:

- Encofrados planos
- Encofrados Curvos

Por sus materiales

- Encofrados de madera
- Encofrados metálicos
- Encofrados de plástico
- Encofrados de cartón
- Encofrados de aluminio

Por su orientación

- Encofrados Verticales
- Encofrados horizontales
- Encofrados inclinados

1.3.1. Encofrados Verticales

Predomina la presión de la masa de hormigón sobre las paredes laterales.

1.3.2. Encofrados Horizontales

Las tensiones fundamentales corresponden al propio peso del hormigón, encofrados de Suelos, losas de puentes, vigas, etc.

1.3.3. Encofrados Especiales

En esta categoría están los encofrados con formas complejas que generalmente son de difícil ejecución, requieren materiales especiales o métodos de sujeción especiales.

¹⁶ Marlon Valarezo A., “Diseño y Construcción de Encofrados ACI347” en Inspección de Obras de Concreto,

Moldes con grandes extensiones planas. La resistencia del encofrado al peso o presión del hormigón es secundaria, tablas horizontales para losas prefabricadas.

Moldes para formas especiales, como vigas de hormigón pretensado, viguetas, elementos prefabricados decorativos, bovedillas, escaleras, tetrápodos, rampas, espirales, etc.

1.4 Estado de la Ingeniería en Encofrados.

Existen varios fabricantes de encofrados metálicos a nivel mundial, que han desarrollado encofrados que se adaptan a diversos tamaños de columnas o vigas pero la idea de fabricar un producto localmente que cumpla los requerimientos de cada proyecto siempre resulta mucho más conveniente para un proyecto específico.

Uno de los sistemas de encofrado para pilares más complicado que se ha construido fue el empleado en el levantamiento del viaducto de Milau en Francia, este puente es el más alto del mundo con el pilar más alto que tiene 245m de elevación.



Figura 1-16: Inicio del proceso de fundición del pilar (Viaducto Milau - Francia).¹⁷

¹⁷ Russell Stanley, “The Formwork to the Milau Viaduct”, Presentación, de PERI Ltd. Noviembre 2007 Irlanda

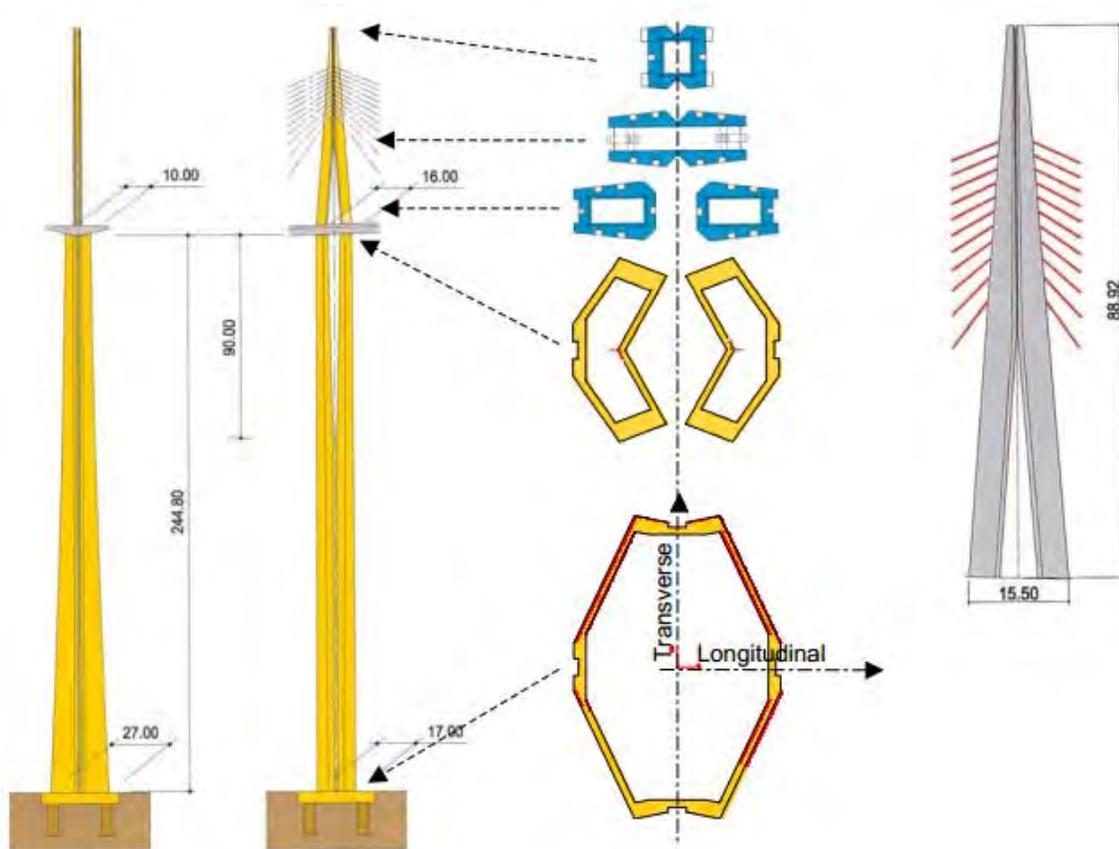


Figura 1-17: Detalle del pilar del viaducto de Milau.¹⁸

Debido a la magnitud de la sección de este pilar el proceso de elevación del encofrado se realiza con un sistema hidráulico que tiene conectados varios pistones a lo largo del perímetro de este, de tal manera que se pueda elevar el encofrado de manera uniforme en toda la sección.

Otra complicación para este pilar fue que la sección era variable, pero todos los elementos manufacturados debería ser en la mayor medida modulares, de tal manera que solo con secciones complementarias se pueda formar las geometrías requeridas entonces, con la menor cantidad de piezas posibles podrían lograr todas las secciones a medida que se eleva el encofrado.

¹⁸ "The Design and construction of the Milau Viaduct", SteelBridge, Steel bridges extend structural limits, 2004 Milau.



Figura 1-18: Detalle del sistema hidráulico¹⁹



Figura 1-19: Encofrado para una columna de sección variable²⁰

¹⁹ Russell Stanley, “The Formwork to the Milau Viaduct”, Presentación, de PERI Ltd. Noviembre 2007 Irlanda

²⁰ *Idem.*



Figura 1-20: Viaducto de Milau – Francia.²¹

A continuación se presenta un Ejemplo más simple de encofrado con el mismo principio de funcionamiento (Jump Form o Climbing Formwork). Este es un modelo estándar del fabricante PERI,



Figura 1-21: Esquema del sistema *climbing formwork*.²²

²¹ Russell Stanley, “The Formwork to the Milau Viaduct”, Presentación, de PERI Ltd. Noviembre 2007 Irlanda

²² “Climbing Systems CB 240 and CB 160”, PERI, Enero 2011, www.peri.com

Este sistema cuenta con tres plataformas, (desde abajo) la primera es una plataforma para acabado, en este nivel se corrige las desigualdades formadas por las uniones de los encofrados para conseguir el acabado deseado en la pared de concreto, el segundo nivel es la plataforma de encofrado, en este nivel se ensambla y asegura el encofrado para luego armar el último nivel desde el cual se verterá el concreto.

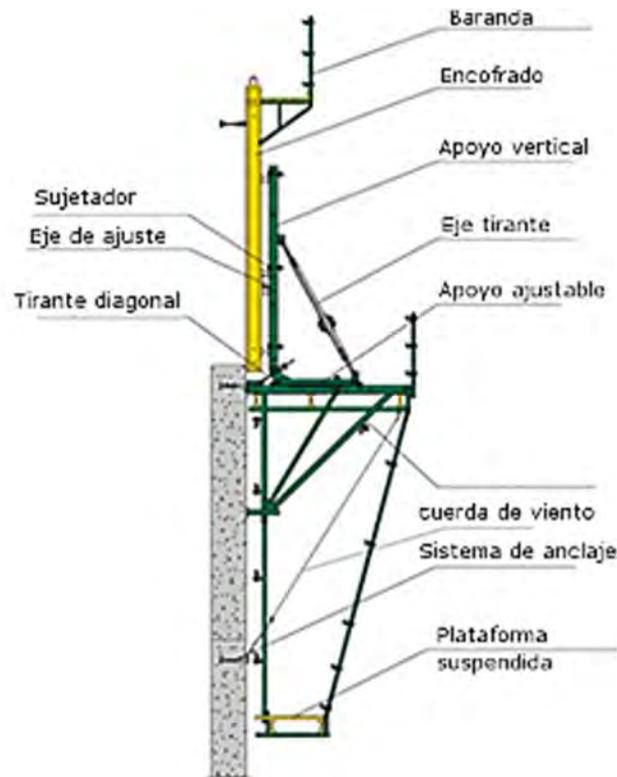


Figura 1-22: Componentes del *climbing formwork*-²³

Todas las cargas se soportan con anclajes en el concreto que ya está fraguado y tiene la resistencia necesaria para sostener la estructura. No es necesaria la instalación de andamios para soportar el sistema.

Se prevé que un vertido puede cubrir una altura de hasta 6 metros, y los componentes del encofrado se pueden desprender para desencofrar una distancia de 0.6m

²³ “Climbing Systems CB 240 and CB 160”, PERI, Enero 2011, www.peri.com

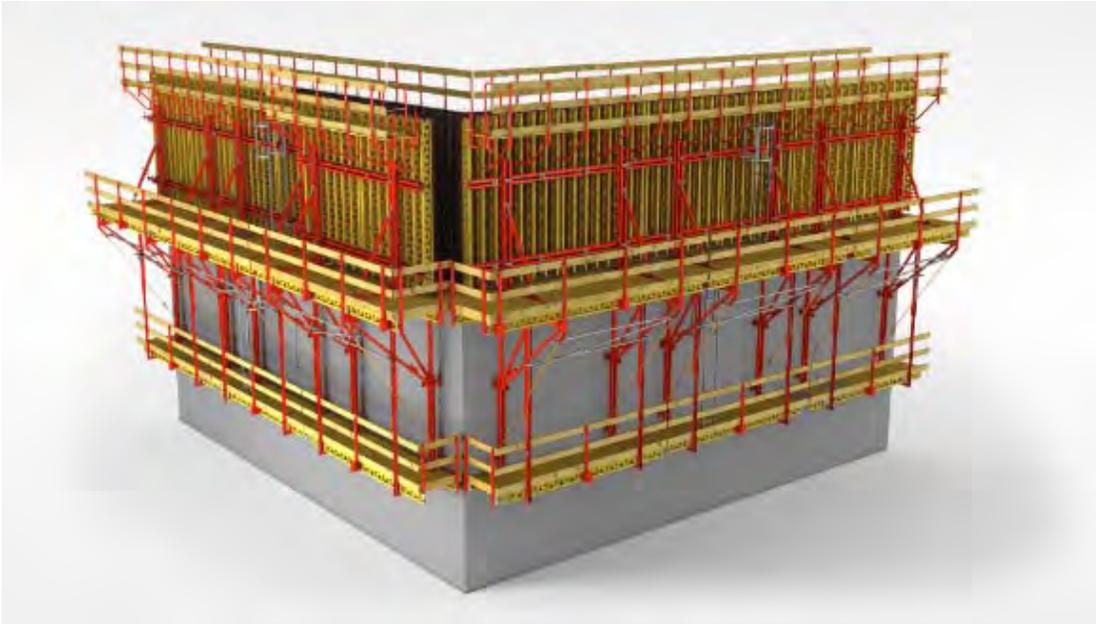


Figura 1-23: Peri CB climbing formwork.²⁴

El encofrado se adhiere firmemente al concreto con la ayuda de los anclajes (en la base del encofrado) para evitar dislocaciones y derrames.



Figura 1-24: Vista de plataforma de encofrado PERI CB climbing formwork.²⁵

²⁴ “Climbing Systems CB 240 and CB 160”, PERI, Enero 2011, www.peri.com

²⁵ *Idem.*

Para poder formar una pared se requiere encofrados en ambos lados y unos tirantes que ayuden a compensar las cargas entre ambos encofrados, PERI emplea un sistema de tirantes con conos plásticos que permiten asegurar que no existirán derrames de concreto por los sitios de anclaje, a continuación se presenta un detalle de estos:



Figura 1-25: Sistema de tirantes PERI CB formwork.²⁶

Como especificaciones de las plataformas se presenta el siguiente diagrama de PERI, que muestra las variaciones estimadas en las cargas para las plataformas.

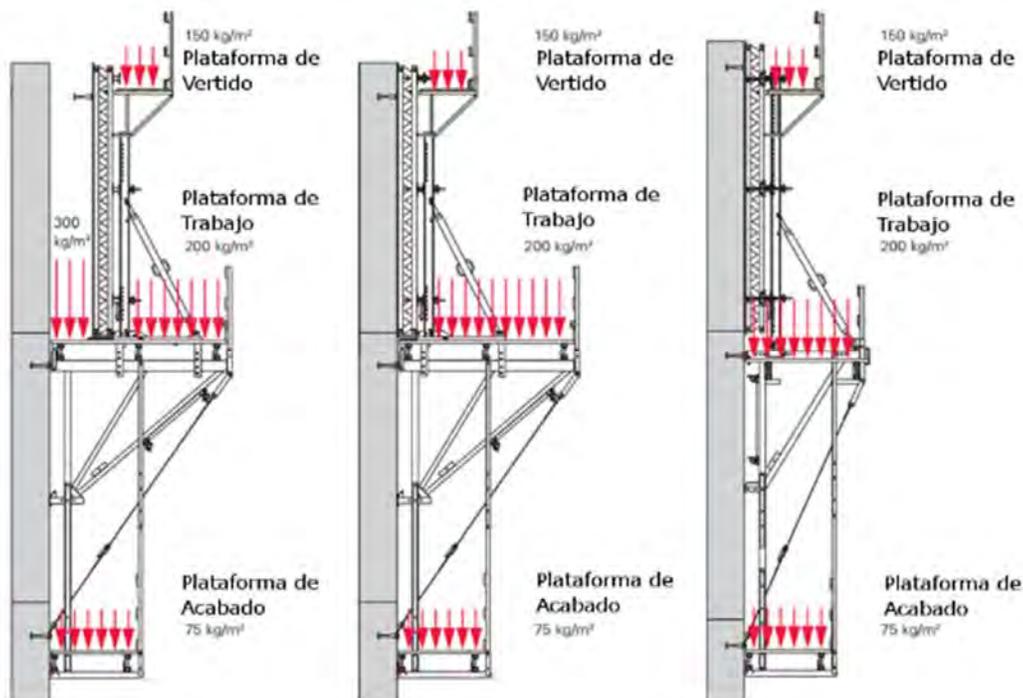


Figura 1-26: Esquema de cargas distribuidas en plataformas.²⁷

²⁶ “Climbing Systems CB 240 and CB 160”, PERI, Enero 2011, www.peri.com

²⁷ *Idem.*

A diferencia del sistema empleado en la construcción del viaducto de Milau este encofrado requiere de una grúa para ascender al siguiente nivel, por lo tanto su construcción está realizada en varios segmentos en el perímetro de encofrado, en el siguiente esquema se puede apreciar las divisiones en la pared que representan las distintas etapas de vertido del concreto, se puede apreciar los anclajes

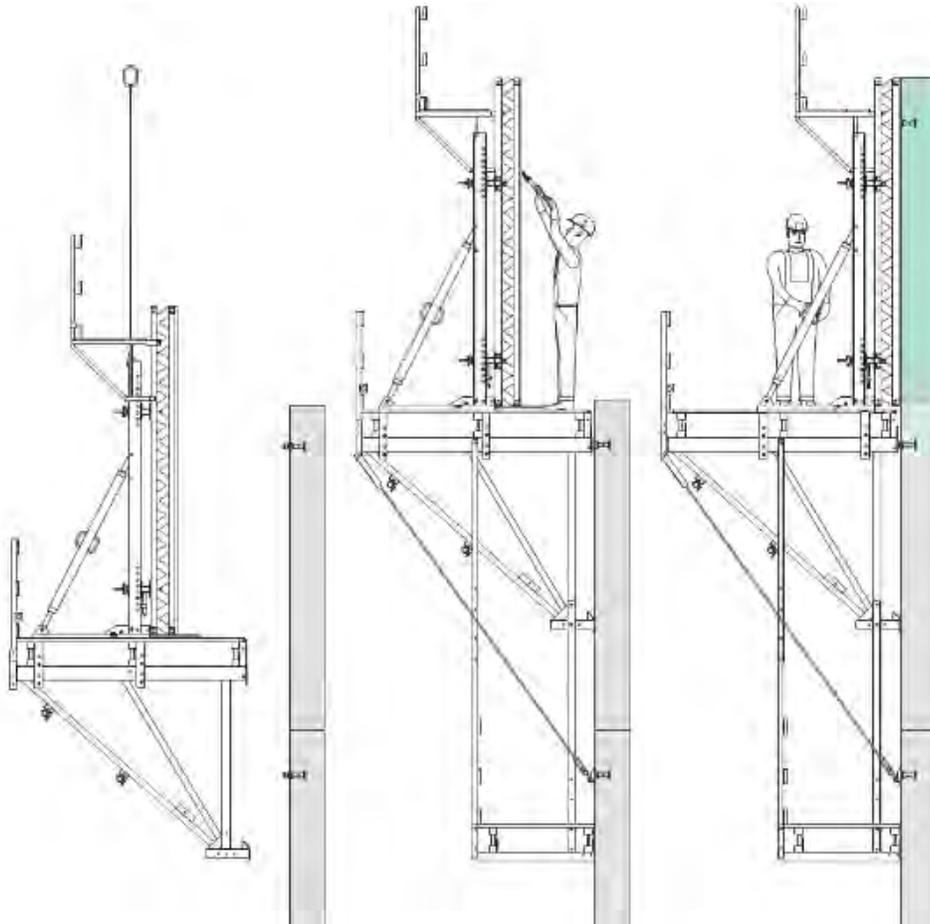


Figura 1-27: Esquema de funcionamiento *climbing formwork*.²⁸

La diferencia del *Climbing Formwork* con el *slip form* es el tipo de movimiento, el *slip form* tiene un movimiento continuo por medio de una riel anclada a la pared y el *climbing* o *jumping form* sube saltando, se mueve de etapa en etapa. La decisión para escoger entre uno u otro dependerá en gran medida del perímetro a encofrar y de la magnitud total de la obra.

²⁸ “Climbing Systems CB 240 and CB 160”, PERI, Enero 2011, www.peri.com

Capítulo 2

Descripción del Proyecto

El proyecto consiste en el diseño de un encofrado deslizante para conformar los pilares de un puente en (Quito-Ecuador). El diseño y construcción del puente está a cargo de la compañía española Grupo Puentes, esta obra es parte del proyecto Ruta Viva que proveerá a Quito de una carretera directa hacia el nuevo aeropuerto Mariscal Sucre en Tababela.

Entonces el punto de partida del diseño es la sección del pilar diseñada previamente para el puente que se muestran a continuación en las figura 2.1 y figura 2.2.

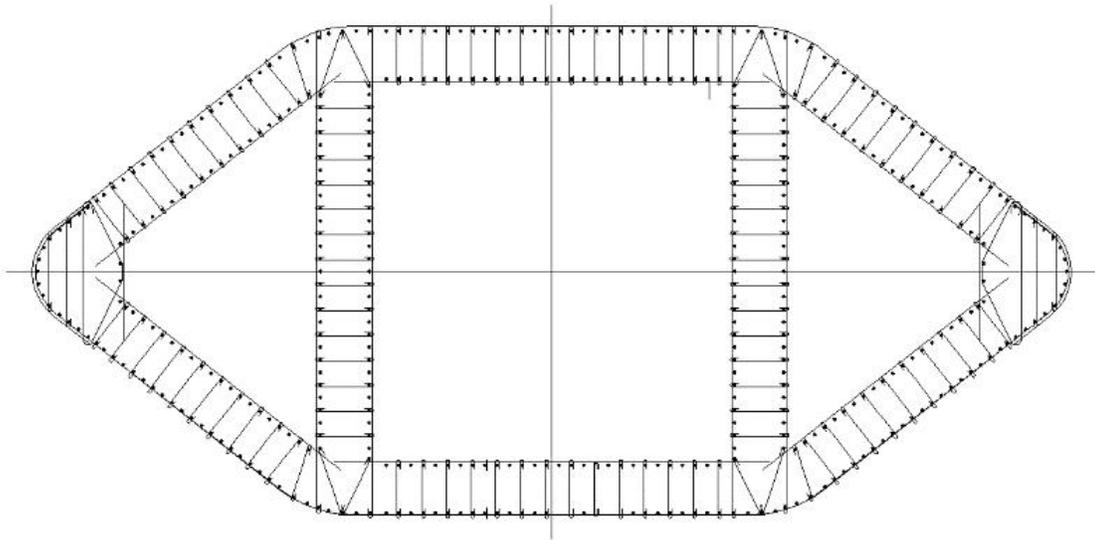


Figura 2-1: Detalle de la sección del pilar con el armado de acero.²⁹

²⁹ Información extraída de los planos proporcionados por la constructora Grupo Puentes.

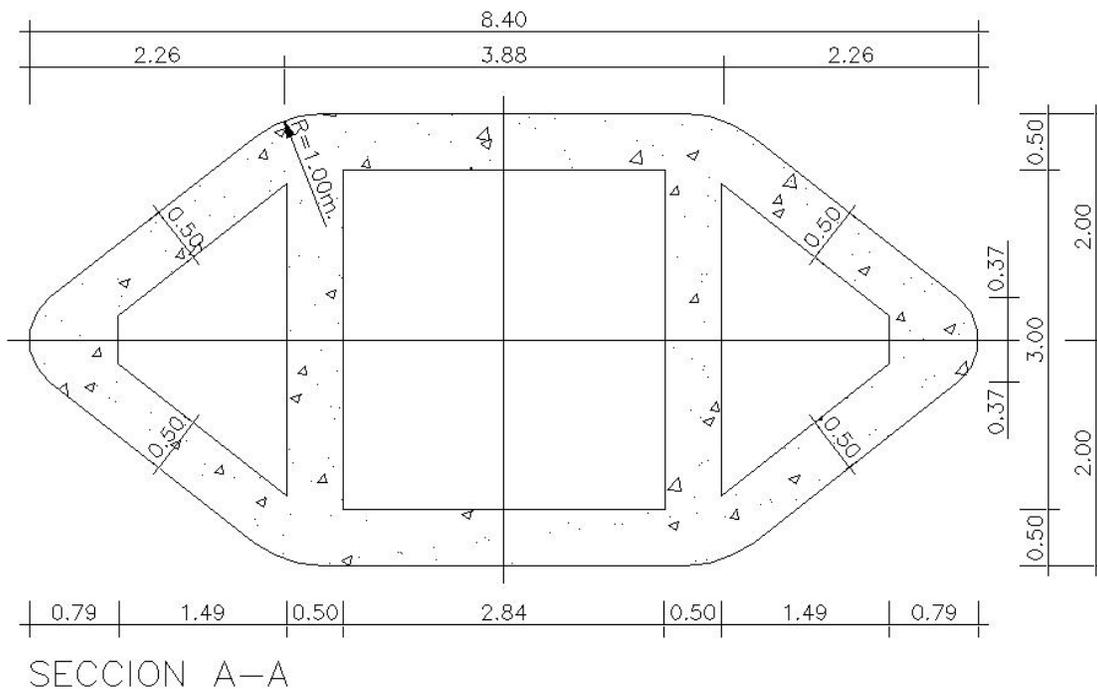


Figura 2-2: Detalle geométrico de la sección del pilar.³⁰

Los pilares medirán 24 y 30 metros respectivamente, estas serán construidas en secciones de 3 metros longitudinales esto implica que el encofrado debe reubicarse en el pilar subiendo 3 metros en cada intervalo, para esto debe preverse un elemento que permita anclar el encofrado y logre soportar el peso de los 3 metros de estructura del encofrado

Como se explicó en los capítulos anteriores, la carga predominante en este tipo de encofrados es la presión hidrostática correspondiente al peso del concreto y una presión adicional que se presenta en el proceso de vertido y vibrado.

Es muy importante que el encofrado mantenga su forma, esto quiere decir que las deformaciones o deflexiones deben ser mínimas o nulas

Otro factor importante a considerar es que el constructor planea realizar el armado de hierro o ferralla en tierra plana y posteriormente con ayuda de una grúa ubicarlo en la posición específica para la fundición de una nueva sección, al requerir de una grúa para el montaje de la armadura del pilar es lógico pensar que el manejo del encofrado será también con la misma grúa, para esto hace falta el diseño de una plantilla de ferralla que facilita en una gran medida el proceso de armado metálico.

³⁰ Información extraída de los planos proporcionados por la constructora Grupo Puentes.

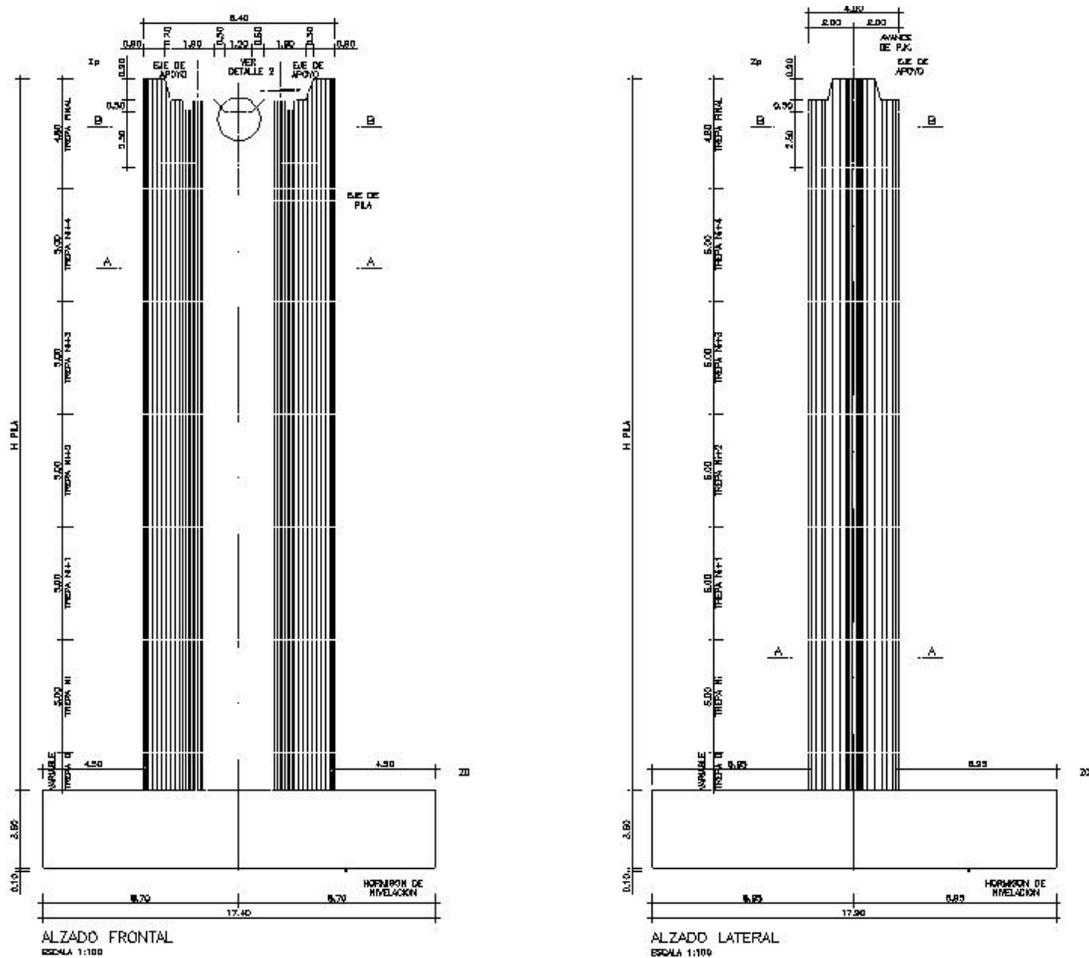


Figura 2-3: Detalle del pilar.³¹

El constructor estima que la construcción de ambos pilares se realice de la siguiente forma por lo tanto se estima 6 ó 5 niveles de encofrado.

Para una construcción de esta magnitud el constructor deberá disponer de una torre grúa y de un equipo de bombeo de hormigón. El acero armado, mallado o ferralla para cada segmento que se fundirá será preparado al nivel del suelo y luego será ubicado o montado en el pilar. De esta manera se evita accidentes con los obreros en el trabajo en altura. Una vez colocada la armadura, el proceso de encofrado y fundición deberán realizarse con la misma claridad para evitar tiempos muertos. El tiempo de fraguado del concreto podría ser reducido adicionando aditivos acelerantes para así poder desencofrar en un tiempo corto de (2 ó 3 días).

Considerando que el encofrado tenga una altura de 3.0m que resulta en elementos bastante manejables y con una altura que permite realizar una buena tarea de vibrado en el concreto

³¹ Información extraída de los planos proporcionados por la constructora Grupo Puentes.

vertido, se presenta las siguientes tablas en las que se indica los avances estimados en la construcción de las columnas, estas serán construidas en 11 y 9 etapas de fundición respectivamente. Esto constituye el número de usos que se requiere del encofrado.

Tabla 2-1: Tabla de trepas de pilas calzada derecha e izquierda.³²

H. Pila= 30.725m												
Pila 1	Trepas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Altura	1.825	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1.9
	Acumulada	1.825	4.825	7.825	10.825	13.825	16.82	19.82	22.82	25.82	28.82	30.72
							5	5	5	5	5	5

H. Pila= 24.900m										
Pila 2	Trepas	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Altura	1	3	3	3	3	3	3	3	2.9
	Acumulada	1	4	7	10	13	16	19	22	24.9

³² Información extraída de los planos proporcionados por la constructora Grupo Puentes.

2.1 Funcionamiento del encofrado trepante

Con el fin de poder explicar el funcionamiento de la solución planteada, se adelantará esquemas del sistema terminado con las cuales se podrá detallar los componentes que requiere el diseño y a su vez proponer una secuencia de operación para cuando entre en funcionamiento el sistema de encofrado.

En general el diseño presenta tres tipos de elementos.

1. Anillos
2. Encofrado
3. Plataforma

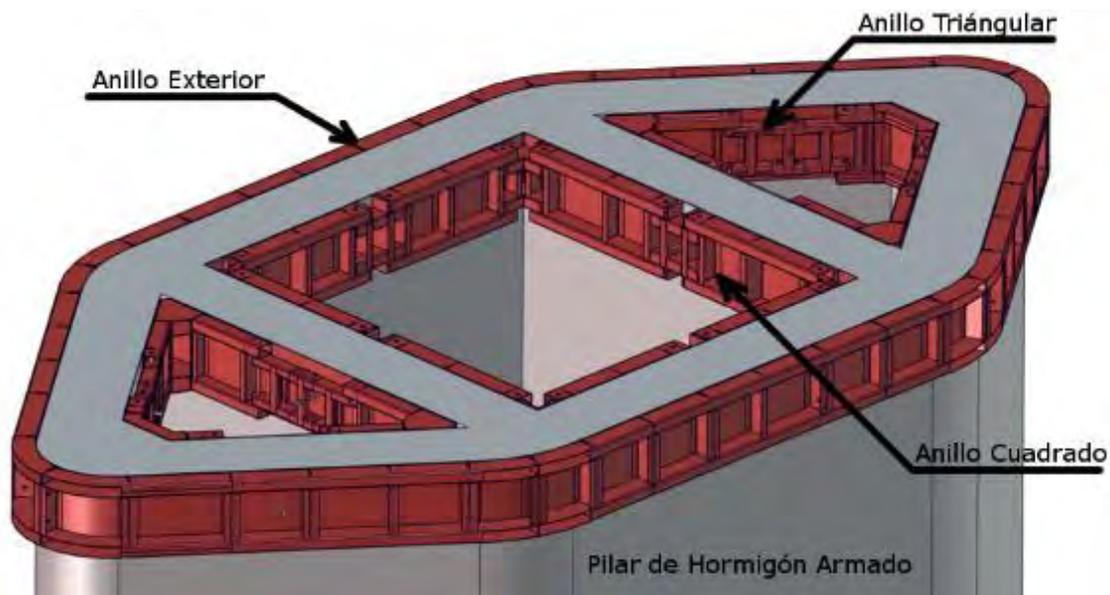


Figura 2-4: Nivel de anillos anclados en el pilar.

Los anillos hacen referencia a una geometría muy similar a la del encofrado con la diferencia de que tiene una altura mucho menor y está pensada para soportar la plataforma de trabajo, este elemento permite anclarse a la estructura de hormigón armado durante el proceso de su construcción. Estos anillos a su vez se pueden dividir en tres tipos de componentes, anillo exterior, dos anillos triangulares y un anillo cuadrado. Esta sección también funciona como encofrado en una etapa de la construcción.

La plataforma es una estructura que se ancla en los anillos con el fin de crear un área dentro de la cual se pueda trabajar con seguridad y comodidad en las alturas requeridas.

El encofrado es una sección con una altura mucho mayor a la de los anillos que permite crear superficies de moldeo mucho mayores.

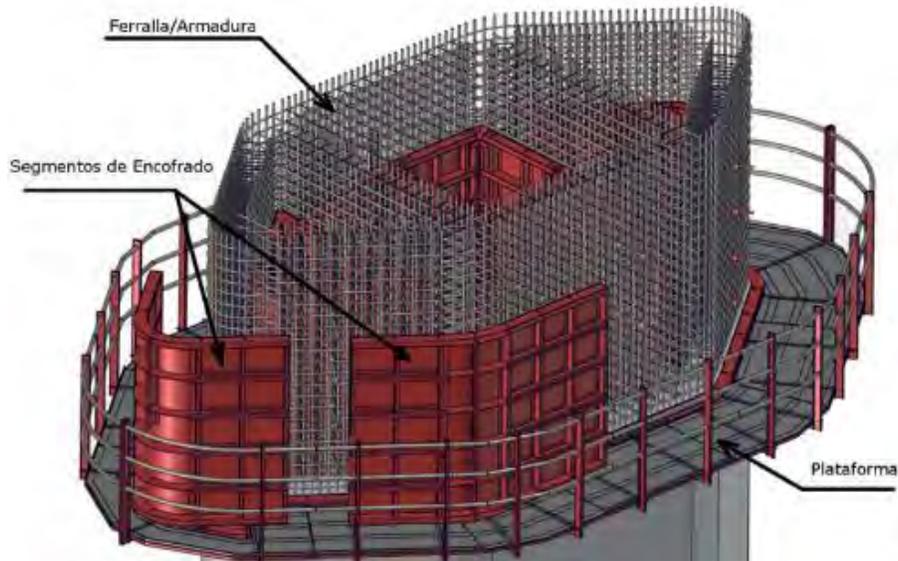


Figura 2-5: Esquema componentes del sistema.

Siendo que el proceso de armado se inicia en el suelo, la utilización de un anillo para montar una plataforma no sería necesaria para la primera etapa, de tal manera que se iniciaría directamente con una sección de encofrado.

Teniendo en cuenta que para el siguiente tramo se requiere de una plataforma, por lo tanto cada nivel fundido o avanzado consistirá en un conjunto de encofrado y anillo de tal manera que el anillo pueda soportar la nueva plataforma, y el encofrado pueda ir avanzando.

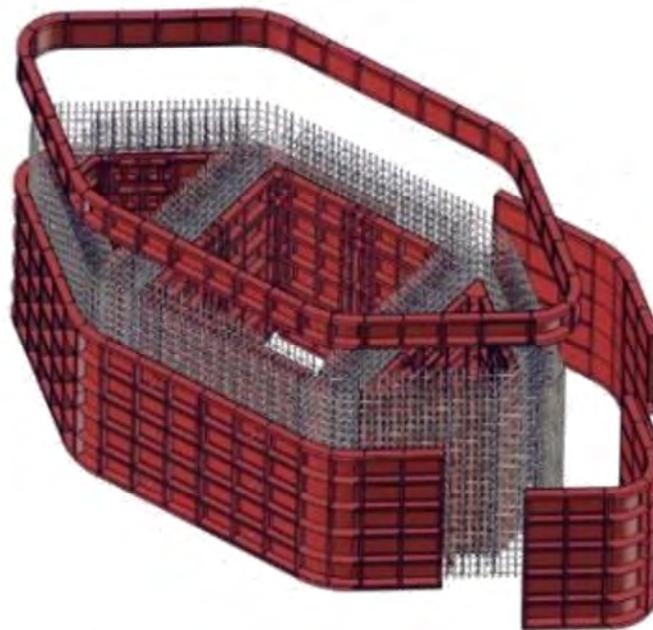


Figura 2-6: Primera etapa armado encofrado + anillo

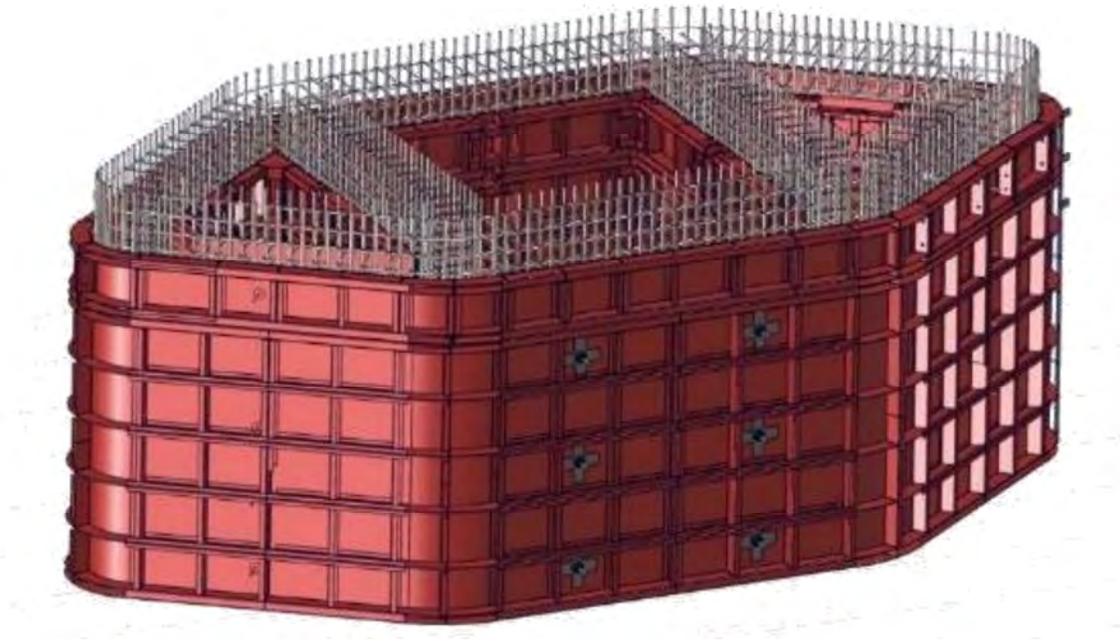


Figura 2-7: Primera etapa armada

Una vez armado el primer nivel de encofrado se debe montar la plataforma para iniciar el vertido de concreto.

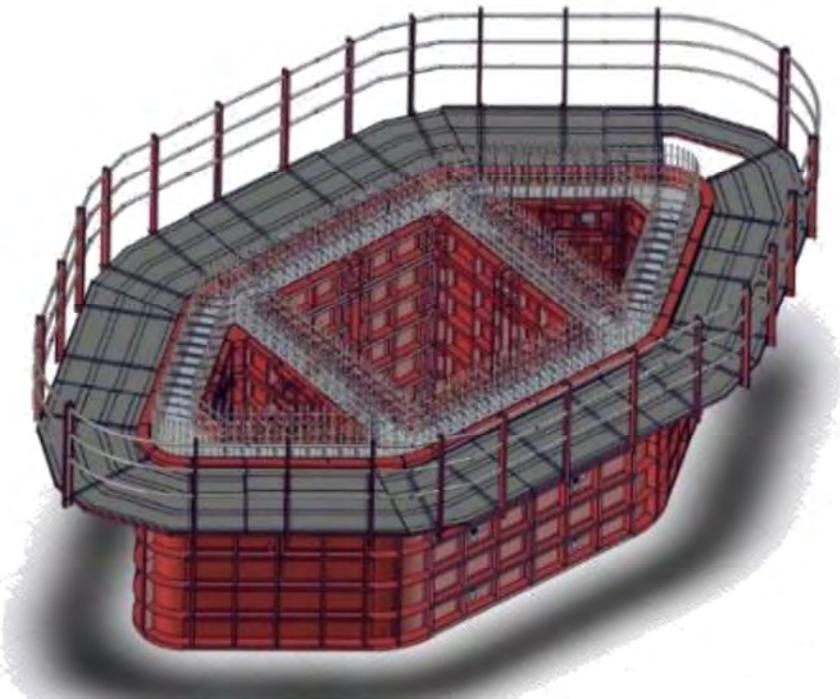


Figura 2-8: Plataforma primer nivel fraguada

Una vez fundido el primer nivel de hormigón, se debe retirar el encofrado empleado previamente e instalarlo para el nuevo nivel, en este punto se aumenta un segundo anillo con plataforma al ensamblaje.

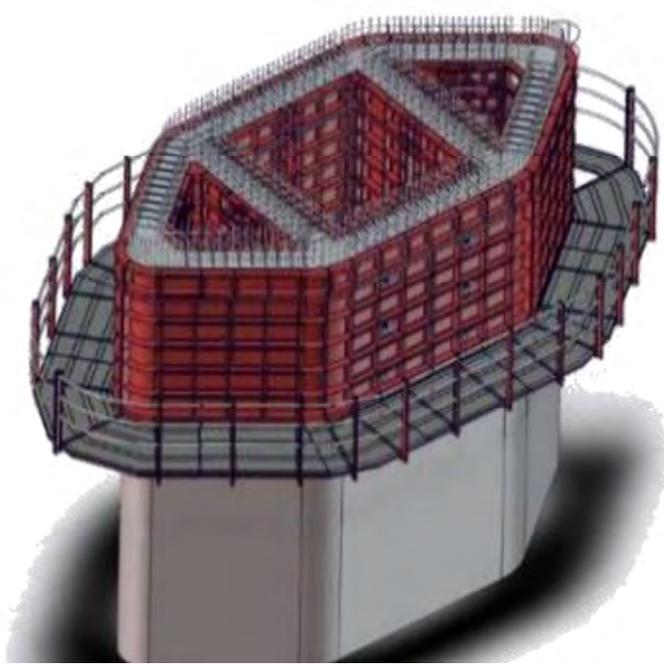


Figura 2-9: Segundo nivel encofrado

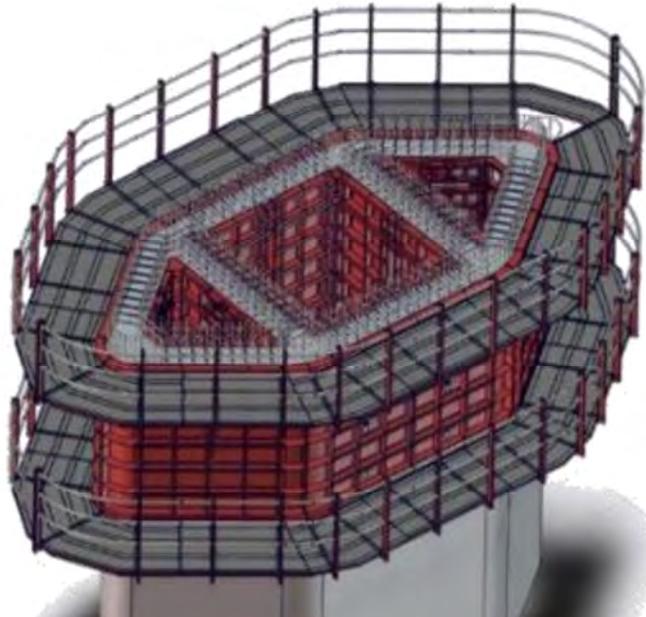


Figura 2-10: Segundo nivel fundido

Una vez fundido el segundo nivel se debe retirar nuevamente el encofrado utilizado previamente y adicionando un tercer anillo, ensamblar el tercer nivel de encofrado.

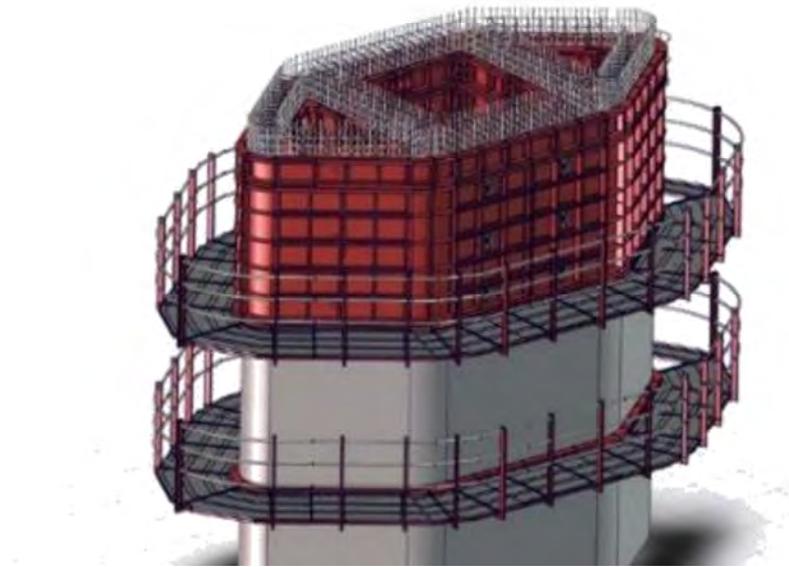


Figura 2-11: Armado del tercer nivel

Una vez ensamblado el tercer nivel se requiere trasladar la plataforma inferior al nivel superior para iniciar el proceso de vertido.

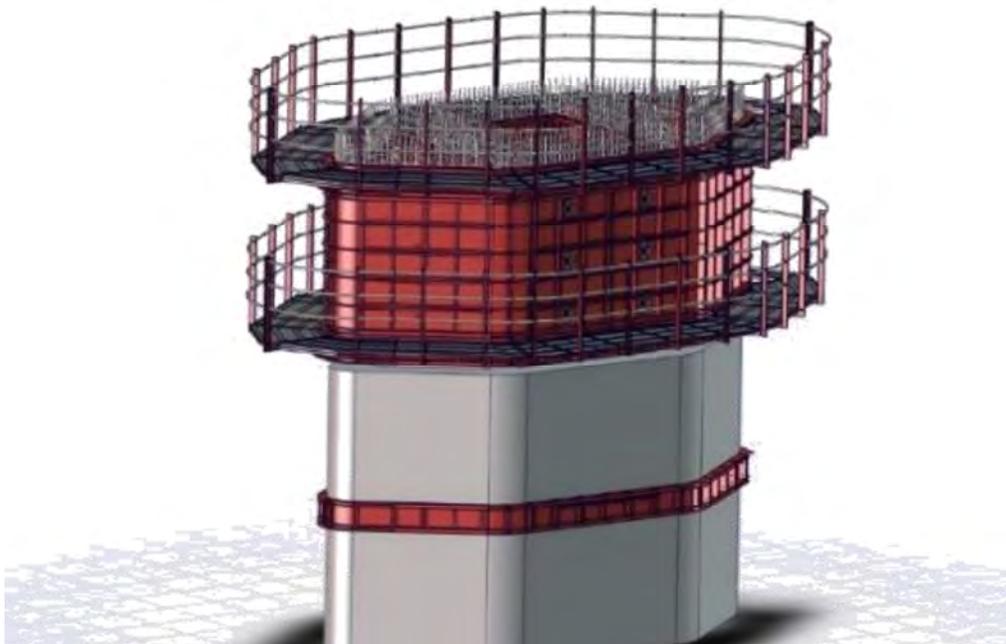


Figura 2-12: Plataforma del tercer nivel

Una vez fundido el tercer nivel el proceso ya es repetitivo entre las figuras 2.11 y 2.12.

Capítulo 3

Proceso de diseño de encofrado metálico

El primer paso es calcular la presión hidrostática del concreto durante el proceso de vertido.

3.1 Comportamiento del concreto¹

El concreto es una mezcla de arena y ripio o agregado que se une mediante una pasta de cemento y agua, existen cinco tipos principales de cemento usados en mezclas de concreto:

Tipo I – Cemento portland ordinario.

Tipo II – Baja temperatura de fraguado y resistente a sulfatos.

Tipo III – Endurecimiento rápido y resistencia temprana.

Tipo IV – Bajo calor de hidratación.

Tipo V – Resistente a sulfatos.

Generalmente la mezcla de concreto incluye aditivos líquidos, sólidos, polvos o químicos para modificar sus propiedades frente a una mezcla normal de cemento, agregado, arena y agua. Ellos permiten acelerar o retardar el tiempo de fraguado, reducir la permeabilidad o incrementar la resistencia, aumentar el contenido de aire y mejorar la trabajabilidad.

Cuando el concreto está fresco sus propiedades están entre las de un líquido y un sólido, se lo describe como un semilíquido o un material plástico; con el paso del tiempo, el concreto pierde su plasticidad y se transforma en un sólido, este proceso permite que el concreto se acople a la forma del encofrado o molde.

Este proceso de transformación de semilíquido a sólido se inicia con el fraguado del cemento que tiene lugar luego de 30 min de haber sido vertido como resultado se genera calor en el concreto, esto continúa por varias horas especialmente si la temperatura es baja, posteriormente se desarrollan fricciones internas entre las partículas de agregado en el concreto que empieza a restringir su movimiento a medida que el concreto se seca.

¹ Robert L. Perifoy, Garold D., Capítulo 3. *Formwork for Concrete Structures 4E*, Oberlender, 2011

3.2 Presión lateral del concreto en un encofrado ²

La presión que ejerce el concreto está determinada principalmente por (varios o todos) los factores siguientes:

- Velocidad de vertido de concreto en el encofrado
- Temperatura del concreto
- Peso o densidad del concreto.
- Tipo de cemento o mezcla empleada
- Velocidad de endurecimiento del concreto
- Método de colocación
- Profundidad de vertido
- Altura del encofrado

Según la normativa ACI 347 una pared es un elemento estructural con al menos una dimensión plana mayor a 6.5 ft (1.98 m), esto quiere decir que el encofrado del proyecto deberá calcularse para soportar una presión modelada como una pared con la siguiente fórmula para alturas de vertido de concreto menores a 6.5 ft. (Altura de encofrado real, sección afectada por la presión hidrostática del concreto)

$$P_m = w \cdot h \quad (3-1)$$

Donde:

$$P_m = \text{Presión lateral máxima lb/ft}^2$$

$$w = \text{Peso unitario de concreto fresco, lb/ft}^3$$

$$h = \text{altura de concreto vertido, ft}$$

Para cuando la altura de vertido supera los 6.5 ft el ACI plantea dos ecuaciones.

La primera ecuación se emplea para una altura total menor a 14ft (4.27 m), siempre que la velocidad de vertido vertical no supere los 7 ft/hora (2.13 m/hora)

$$P_m = C_w \cdot C_c [150 + 9000R/T] \quad (3-2)$$

Donde:

$$P_m = \text{Presión lateral máxima lb/ft}^2$$

$$C_w = \text{Coeficiente de peso unitario}$$

$$C_c = \text{Coeficiente de composición química}$$

$$R = \text{velocidad de llenado de concreto en el encofrado ft/hr}$$

$$T = \text{temperatura del concreto en el encofrado } ^\circ\text{F}$$

* El valor mínimo de P_m es de 600. C_w , pero en ningún caso será mayor a wh .

² Robert L. Perifoy, Garold D., Capítulo 3. *Formwork for Concrete Structures 4E*, Oberlender, 2011

Aplica a concreto con un asentamiento de 7 in o menos. El asentamiento del concreto es una medida de la consistencia del concreto es una medida de la fluidez del concreto debido a la cantidad de agua que contiene. (a menor cantidad de agua el concreto es más seco y tiene un menor asentamiento).

Aplica para una vibración normal interna a una profundidad de 4 ft o menos. La vibración interna se emplea con el fin de asegurar que el concreto llene el molde o encofrado. Se produce con un dispositivo mecánico.

La segunda ecuación se aplica para todas las paredes con velocidades de vertido entre 7 y 15 ft/hora y para paredes donde la velocidad de vertido es menor que 7 ft/hora y la altura de vertido excede los 14 ft.

$$P_m = C_w \cdot C_c [150 + 43400/T + 2800R/T] \quad (3-3)$$

Donde:

P_m = Presión lateral máxima lb/ft²

C_w = Coeficiente de peso unitario

C_c = Coeficiente de composición química

R = velocidad de llenado de concreto en el encofrado ft/hr

T = temperatura del concreto en el encofrado °F

***El valor mínimo de P_m es de 600. C_w , pero en ningún caso será mayor a wh .**

Aplica a concreto con un asentamiento de 7 in o menos.

Aplica para una vibración normal interna a una profundidad de 4 ft o menos.

El Comité 347 del ACI recomienda que para fundiciones de paredes con velocidades de vertido mayores a 15 ft/hora se aplicará para el cálculo de la presión lateral la fórmula de la presión hidrostática fórmula (3-1), más una tolerancia mínima del 25% debido a la presión de bombeo si el concreto es bombeado desde la base de la estructura o encofrado.

Tabla 3-1 Valores del coeficiente de peso unitario C_w

Peso del concreto	Valor de C_w
Menos de 140 lb/ft ³ (2240 Kg/m ³)	0.5 [1+(w/145 lb/ft ³)], pero no menor a 0.8
140 a 150 lb/ft ³	1.0
Más de 150 lb/ft ³ (2400 Kg/m ³)	w/145 lb/ft ³

$$\text{Equivalencia } 1\text{lb/ft}^3 = 16.02 \text{ Kg/m}^3$$

Tabla 3-2 Valores del coeficiente de composición química C_c

Tipo de cemento o mezcla	Valor de C_c
Tipo I, II y III sin retardantes	1
Tipo I, II y III con retardante	1.2
Otro tipo de mezclas conteniendo menos de un 70% de caída o 40% de ceniza sin retardante	1.2
Otro tipo de mezclas conteniendo menos de un 70% de caída o 40% de cenizas volátiles con retardante	1.4
Mezclas conteniendo más de 70% de caída o 40% de cenizas volátiles	1.4

3.3 Cálculo de la presión hidrostática ejercida por el concreto³

Según las condiciones anteriores la presión hidrostática máxima deberá estar dentro de estos límites.

$$Pm_{min} = 600.Cw = 600 \text{ lb/ft}^2$$

$$Pm_{max} = \omega.h = 150 * 16.4 = 2460 \text{ lb/ft}^2$$

$$\omega = 150 \text{ lb/ft}^3 \quad (2400 \text{ Kg/m}^3)$$

$$R = 5 \text{ ft/h} \quad (1.52 \text{ m/h})$$

$$T = 80 \text{ }^\circ\text{F} \quad (26.7 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$h = 16.4 \text{ ft} \quad (5 \text{ m})$$

$$C_w = 1$$

=1

Para estos datos se debe emplear la fórmula (3-3).

$$Pm = 1 \left[150 + \frac{43400}{80} + \frac{2800x5}{80} \right] = 867 \text{ lb/ft}^2 = 41.51 \text{ KPa}$$

$$600.Cw = 600 \text{ lb/ft}^2 < 867 \text{ lb/ft}^2 < wh = 2460 \text{ lb/ft}^2$$

Debido a que este valor esta entre los límites se emplea como presión máxima desarrollada. Es importante conocer a que altura se presenta esta presión con un perfil hidrostático.

El valor máximo de presión ocurrirá a una profundidad de:

$$Pm = wh \rightarrow h = P_m/\omega = 867/150 = 5.78 \text{ ft} = 1.76 \text{ m}$$

³ Robert L. Perifoy, Garold D., Capítulo 3. *Formwork for Concrete Structures 4E*, Oberlender, 2011

Teniendo en cuenta que el segmento a encofrar tendrá una altura de 3 metros, la presión ejercida por el concreto en el encofrado será la presión hidrostática máxima desarrollada de 41.51 kPa.

La distribución de presión en el encofrado tendría la siguiente forma:

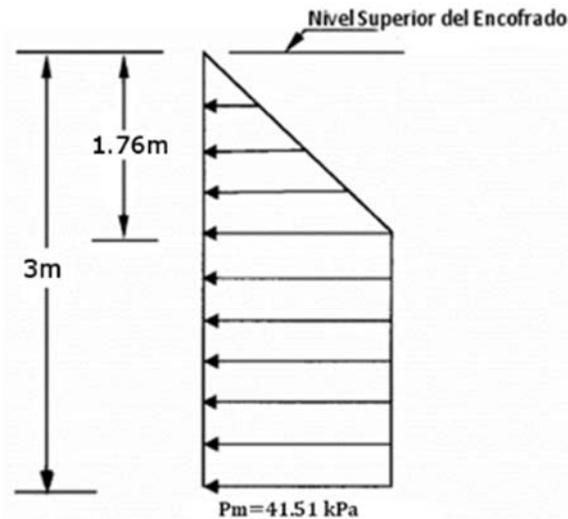
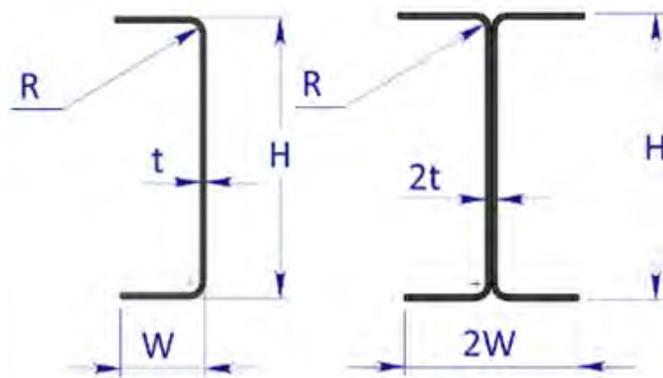


Figura 3-1: Distribución de presión sobre el encofrado.

Cabe aclarar que esta presión se ejerce para ambos lados de la pared del encofrado, esto permitirá más adelante un mecanismo de soporte entre los segmentos de una pared.

3.4 Diseño del encofrado exterior

Partiendo de que la construcción de todo el encofrado se planea realizar con láminas de acero plegadas en frío se prevé utilizar dos geometrías de perfil principalmente un canal C plegado y una I construida con dos perfiles C



Donde:

H: Alto del Perfil

W: Ancho del perfil plegado

R: Radio Interno de Pliegue

t: Espesor del Material

Figura 3-2: Esquema de perfiles empleados para el diseño (izq. perfil C, der. perfil I).

De la misma forma se debe planificar las geometrías de los elementos para lograr facilitar el proceso constructivo y a su vez asegurar las tolerancias geométricas del diseño. A continuación se presenta un esquema con el concepto constructivo, la idea es que se pueda armar los elementos sin mayor labor de mano de obra en el proceso. Los destajes que se puede apreciar en las costillas permiten que todo encaje en su lugar previo el proceso de soldadura.

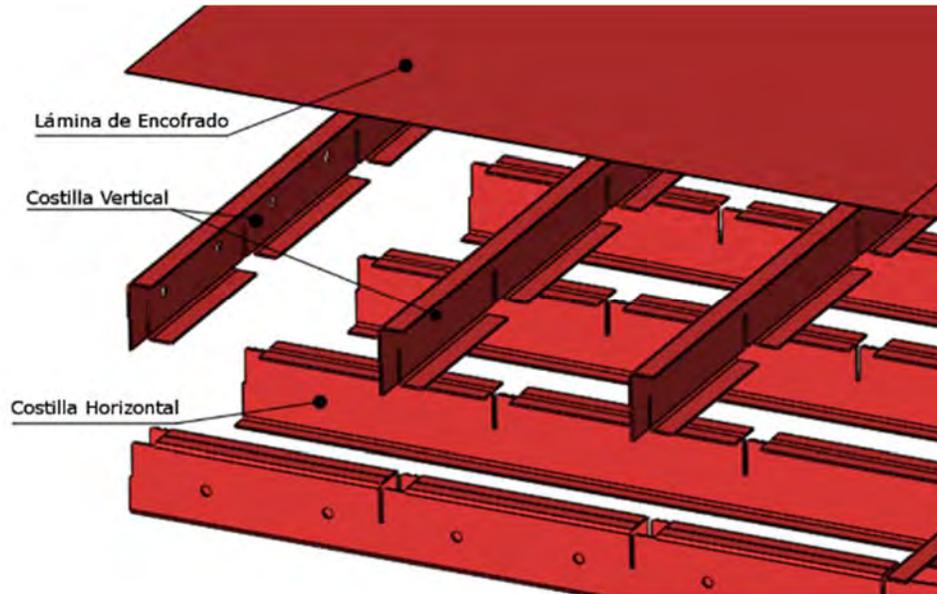


Figura 3-3: Esquema constructivo del encofrado.

Para facilitar los cálculos posteriores se procede a parametrizar las ecuaciones de las propiedades de la sección.

PERFIL C (Referencia punto medio de la arista derecha H/2)

	Area	X	Y
F	$(W - t - R)t$	$\left(\frac{W - t - R}{2}\right) + t + R$	$\frac{H - t}{2}$
W	$(H - 2(t + R))t$	$\frac{t}{2}$	0
A	$\frac{\pi}{4}((R + t)^2 - R^2)$	$\frac{4(R + t)}{3\pi} - \frac{4R}{3\pi}$	$\frac{H}{2} - \frac{4(H + R)}{3\pi} + \frac{4R}{3\pi}$

$$Area = 2AF + AW + 2AA$$

$$Q_x = 2AF \cdot XF + 2AA \cdot XA + AW \cdot XW$$

$$Q_y = 2AF \cdot YF + 2AA \cdot YA + AW \cdot YW$$

PERFIL I (Referencia punto medio de las aristas de las dos C)

	Area	X	Y
F	$(W - t - R)t$	$\left(\frac{W - t - R}{2}\right) + t + R$	$\frac{H - t}{2}$
W	$(H - 2(t + R))t$	$\frac{t}{2}$	0
A	$\frac{\pi}{4}((R + t)^2 - R^2)$	$\frac{4(R + t)}{3\pi} - \frac{4R}{3\pi}$	$\frac{H}{2} - \frac{4(H + R)}{3\pi} + \frac{4R}{3\pi}$

$$Area = 2AF + AW + 2AA$$

$$Qx = 4AF \cdot XF + 4AA \cdot XA + AW \cdot XW - AW \cdot XW$$

$$Qy = 4AF \cdot YF + 4AA \cdot YA + AW \cdot YW$$

3.4.1. Diseño de costillas horizontales

Teniendo en cuenta que el punto con mayor deformación estará en el plano medio de la sección. Una primera aproximación para el diseño será considerar que el encofrado es una pared plana y que está construido con las costillas horizontales en forma de anillos con alguna de las secciones previamente indicadas (Se definirá el tipo de perfil y su geometría posteriormente) La aproximación consiste en considerar la mitad de uno de estos anillos transversales como una viga simplemente apoyadas con una carga distribuida producto de la presión ejercida por el concreto obtenida previamente.

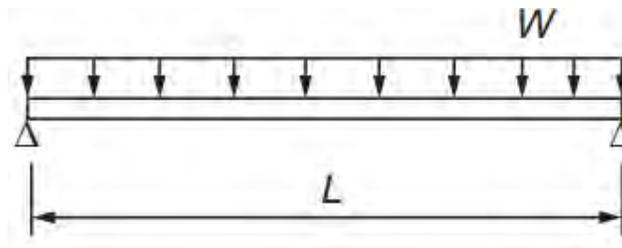


Figura 3-4: Viga simplemente apoyada con carga distribuida.

Para esto, de las figuras 2.1 y 2.2 (sección del pilar) se toma los siguientes datos:

$$Separación\ entre\ apoyos\ deseada = L' = 1.4\ m$$

$$Numero\ de\ Tirantes = 20\ m / 1.4\ m = 14.28 \rightarrow 14$$

$$Separación\ entre\ apoyos = L = 20\ m / 14 = 1.43\ m$$

$$Altura\ de\ la\ sección\ encofrada = 3\ m$$

Definiendo el espaciamiento vertical entre las costillas horizontales, se puede obtener el valor de carga distribuida que deberá soportar la viga.

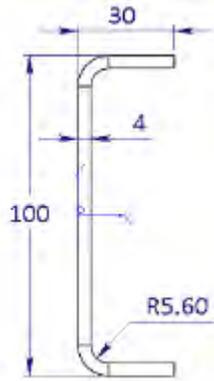
$$Espaciamiento\ vertical\ entre\ costillas\ (ev) = 0.5\ m$$

$$\text{Num de costillas horizontales} = \frac{3m}{0.5} = 6 \text{ costillas}$$

$$\text{Carga distribuida} = w = Pm * ev = 41.51 \text{ kPa} \cdot 0.5m = 20.755 \text{ kN/m}$$

Definiendo
propiedades

la sección de la costilla se puede obtener las
de la sección:



SECCIÓN TIPO C 100X30X4

ALTO	100	m
ANCHO	30	mm
ESPESOR	4	mm
RADIO	5.6	mm
AREA	581.90	mm ²
QX	12120.29	mm ³
IXX	817575.35	mm ⁴

Figura 3-5: Sección viga C 100x30x4 mm

Conociendo las propiedades de la sección se puede realizar el análisis de la viga mencionada anteriormente.

$$V_{max} = \frac{wL}{2} = 14.8 \text{ kN}$$

$$\tau_{max} = \frac{VQ}{It} = 55.0 \text{ MPa}$$

$$M_{max} = \frac{wL^2}{8} = 5.3 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{max}^2 + 3\tau_{max}^2} = 338.124 \text{ MPa}$$

$$\Delta_{max} = \frac{5wL^4}{384EI} = 6.91 \times 10^{-18} \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{max} &= \frac{M_{max}c}{I} = \frac{M_{max} h/2}{I} \\ &= 324.43 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que las propiedades mecánicas del acero A36 son:

$$s_u = 58 \text{ksi} = 400 \text{MPa}$$

$$s_y = 36 \text{ksi} = 250 \text{MPa}$$

$$\tau_y = 0.577s_y = 144 \text{MPa}$$

$$E = 200 \text{GPa}$$

$$\rho = 7850 \text{kg/m}^3$$

Además considerando un esfuerzo admisible recomendado por la AISC se puede obtener un factor de seguridad.

$$\text{Factor de seguridad}^4 = 1.66$$

Claramente los esfuerzos en la primera sección seleccionada se acercan bastante a los valores del material, se procede a iterar una solución a partir de distintas geometrías de sección.

$$\text{Esfuerzo admisible} = \frac{s_y}{FS} = \frac{250 \text{MPa}}{1.66} = 151 \text{Mpa}$$

Tabla 3-3: Sección tipo C (L=1.43m)

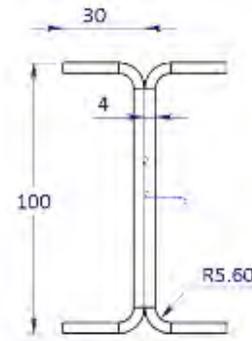
	I	II	III
Alto	100	125	150
Ancho	30	40	40
Espesor	4	4	4
Radio	5.6	5.6	5.6
Area (mm²)	582	681.90	862
Qx (mm³)	12120	15354.09	24268
Ixx (mm⁴)	817575	1427017.44	2664941
σ_{max} (MPa)	324.43	194.93	149
τ_{max} (MPa)	55.00	43.70	34
σ_{eq} (MPa)	338.12	209.11	160

Con el fin de tener un punto de comparación se estudiará un análisis similar con perfiles I, que como se ha mencionado anteriormente se construirá a partir de dos perfiles C como se muestra en la figura 3.6.

⁴ El esfuerzo admisible según el código AISC para esfuerzo de flexión debe ser menor a $0.6S_y$

SECCIÓN TIPO I 100X30X4

ALTO	100	mm
ANCHO	30	mm
ESPESOR	4	mm
RADIO	5.6	mm
AREA	1163	mm ²
QX	24240	mm ³
IXX	1635150	mm ⁴

**Figura 3-6: Sección tipo I.****Tabla 3-4: Sección tipo I (L=1.43m).**

	I	II	III
Alto	100	125	100
Ancho	30	30	50
Espesor	4	4	4
Radio	5.6	5.6	5.6
Area (mm ²)	1164	1363.81	1723.81
Qx (mm ³)	24241	30708.19	48535.80
Ixx (mm ⁴)	1635151	2854034.88	5329882.64
σ_{max} (MPa)	162	116	114.69
τ_{max} (MPa)	27	20	31
σ_{eq} (MPa)	169	121	127

Tabla 3-5: Comparación de factores de seguridad y pesos.

	I	II	III	
C	Area (mm ²)	581.90	681.90	861.90
	σ_{eq} (MPa)	338.12	209.11	160.35
	FoS	0.74	1.20	1.56
I	Area	1164	1363.81	1723.81
	σ_{eq} (MPa)	162	116	114.69
	FoS	1.54	2.15	2.18

Considerando el Esfuerzo admisible por flexión en las iteraciones de la sección C solo cumple la condición el elemento (III), mientras que en la sección I todos cumplen la condición. Sin embargo el área (peso) de las secciones I es mayor en los tres casos que el perfil C III, por lo tanto conviene seguir el diseño con el perfil C.

Otro dato que ayuda en la decisión es el incremento de peso del perfil C.III al I.I es de 35% sin resultar en un mayor factor de seguridad

Para completar los datos del Perfil C 150x40 mostrados en las tablas de comparación hace falta el cálculo de la deflexión del elemento bajo la carga aplicada.

$$\Delta_{max} = \frac{5wL^4}{384 EI} = \frac{5 * 20753 N/m * 1.43^4}{384 * 200000 MPa * 5329882 mm^4} = 2.12 mm$$

Se puede estimar el peso que representa el conjunto de las costillas horizontales.

$$\text{Perímetro} = 20m$$

$$\text{Área sección} = 862mm^2$$

$$\text{Número de costillas} = (2 \text{ anillo}, 6 \text{ encofrado}) = 8$$

$$\text{Peso costillas horizontales} = \frac{862 mm^2}{1000^2} * 20 m * \frac{7850 kg}{m^3} = 135.33 kg$$

3.4.2. Diseño de costillas verticales.

Partiendo de que el soporte de las costillas verticales en la parte inferior es un arriostre y que en cada costilla horizontal está apoyando simplemente a la costilla vertical se puede con la ayuda del *software* SolidWorks calcular el momento máximo, cortante máximo y deflexión máxima desarrolladas.

De la misma forma se analizará en un inicio solo perfiles C con el fin de evitar el sobrepeso que puede generar un perfil I.

Partiendo de que la separación entre costillas verticales es de 0.5 m y con el dato de la presión hidrostática máxima desarrollada se puede obtener un valor para la carga distribuida, en realidad será el mismo valor que el empleado en la sección anterior.

$$\text{Carga distribuida} = w = Pm * eh = 41.51 kPa * 0.5 m = 20.755 kN/m$$

Si en la sección de encofrado que tiene una longitud de 2.4 m la separación entre costillas horizontales es de 0.5m entonces la costilla vertical tendrá 4 apoyos generados por las costillas horizontales y uno por el anillo. Para poder estudiar este elemento se debe partir la viga en estos puntos como se muestra en la figura 3.7.

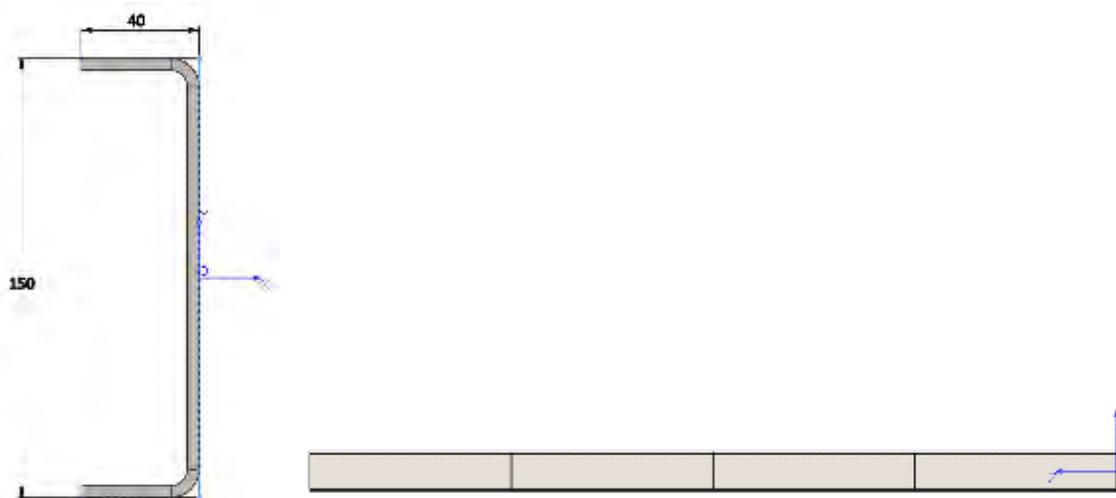


Figura 3-7: Esquema del elemento a analizar.

Aplicando las siguientes condiciones o restricciones en la simulación se puede aproximar el comportamiento del elemento.

- Carga distribuida $w=20.755 \text{ kN/m}$
- Apoyos fijos
- Empotramiento

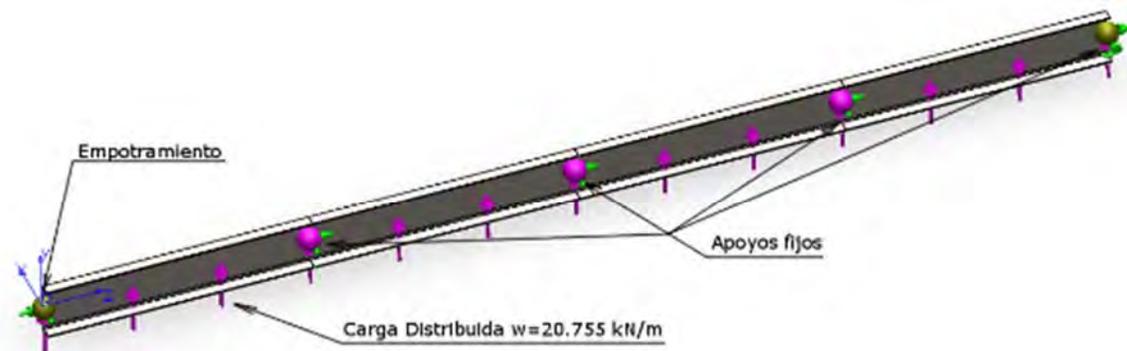


Figura 3-8: Condiciones y restricciones de la simulación.

Se puede obtener los diagramas de fuerza cortante y de momento flector para este elemento.

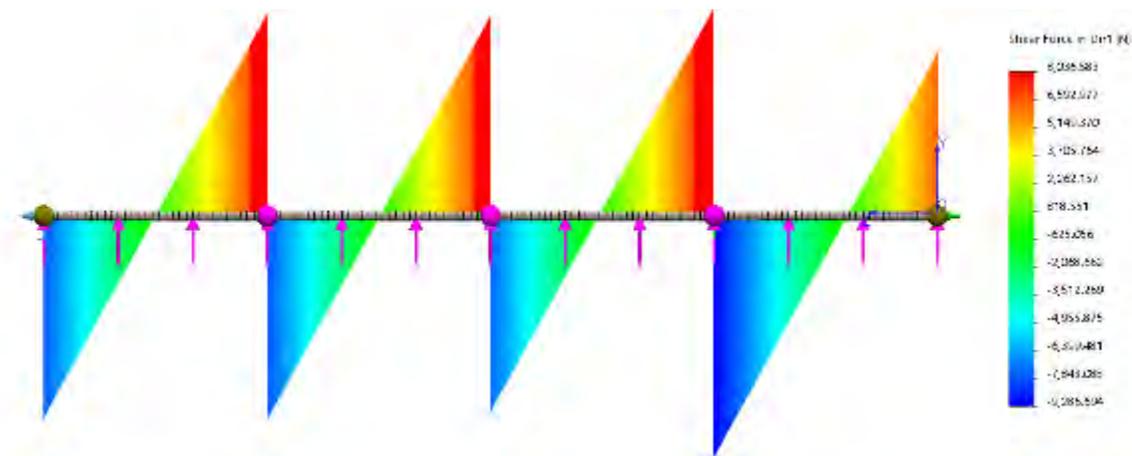


Figura 3-9: Diagrama de fuerza cortante.

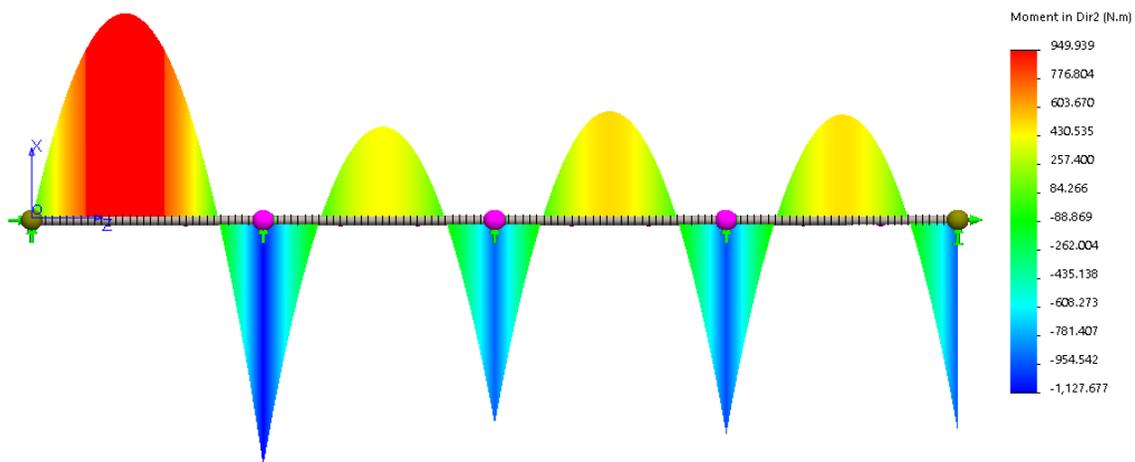


Figura 3-10: Diagrama de momento flector.

Es importante tener en cuenta que los valores mostrados en los diagramas anteriores se mantendrán sin importar el perfil de la viga, el perfil de la viga definirá el nivel de esfuerzos al que está sometido cada elemento.

De las figuras 3.9 y 3.10 se obtienen los siguientes datos:

$$\text{Fuerza cortante máxima: } V_{max} = 9.206 \text{ kN}$$

$$\text{Momento flector máximo: } M_{max} = 1.127 \text{ kN.m}$$

Siendo el esfuerzo admisible para momento flector de 150 MPa.

$$150 \text{ MPa} \geq \frac{M_{max}}{Ix/c} \rightarrow \frac{Ix}{c} = S_x \geq \frac{1.194 \text{ kN.m}}{150 \text{ MPa}} = 7.96 \times 10^{-6} \text{ m}^3 = 7513 \text{ mm}^3$$

Se procede a buscar un perfil adecuado al módulo de sección S_x , con la ayuda del Software SolidWorks se puede calcular las propiedades de distintos perfiles.

Perfil	B Ala	H Alma	Espesor	Área (mm ²)	Ix (mm ⁴)	c (mm)	Sx (mm ³)	Cumple
C	40	150	4	861.90	2515545.88	75.00	33540.61	Si
C	40	100	4	661.90	933520.70	50.00	18670.41	Si
L	40	100	4	530.95	580491.52	61.80	9393.07	Si
L	40	75	4	430.95	277737.13	45.74	6072.08	No
L	40	85	4	470.95	380970.81	53.72	7091.79	No
L	40	90	4	490.95	441273.15	56.43	7819.83	Si
L	40	95	4	510.95	507696.83	59.12	8587.56	Si

Se puede apreciar que un perfil igual al de las costillas horizontales estaría demasiado sobredimensionado, mientras que empleando un perfil L 95x40x4 se reduce el peso del elemento en un 75% lo cual significará una vez más una optimización de materiales y costos.

Una vez seleccionado el perfil adecuado se complementa el estudio del elemento con cálculos de esfuerzos en el elemento.

Datos adicionales requeridos para el cálculo:

$$Q = 9218.66 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} c}{Ix} = \frac{1.127 \text{ kN.m} \cdot 59.12 \text{ mm}}{507696.83 \text{ mm}^4} = 131.24 \text{ MPa}$$

$$\tau_{max} = \frac{VQ}{It} = \frac{9.206 \text{ kN} \cdot 9218.66 \text{ mm}^3}{507696.83 \text{ mm}^4 \cdot 4 \text{ mm}} = 41.79 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{max}^2 + 3\tau_{max}^2} = 149.87 \text{ MPa}$$

3.5 Diseño de la lámina del encofrado.

Considerando que la lámina del encofrado estará sujeta a las costillas fijamente (soldada), se puede realizar un cálculo de la deflexión de un segmento de lámina que queda sin soporte, cuando a esta se le aplica una presión igual a la hidrostática máxima generada por el vertido de concreto calculada previamente.

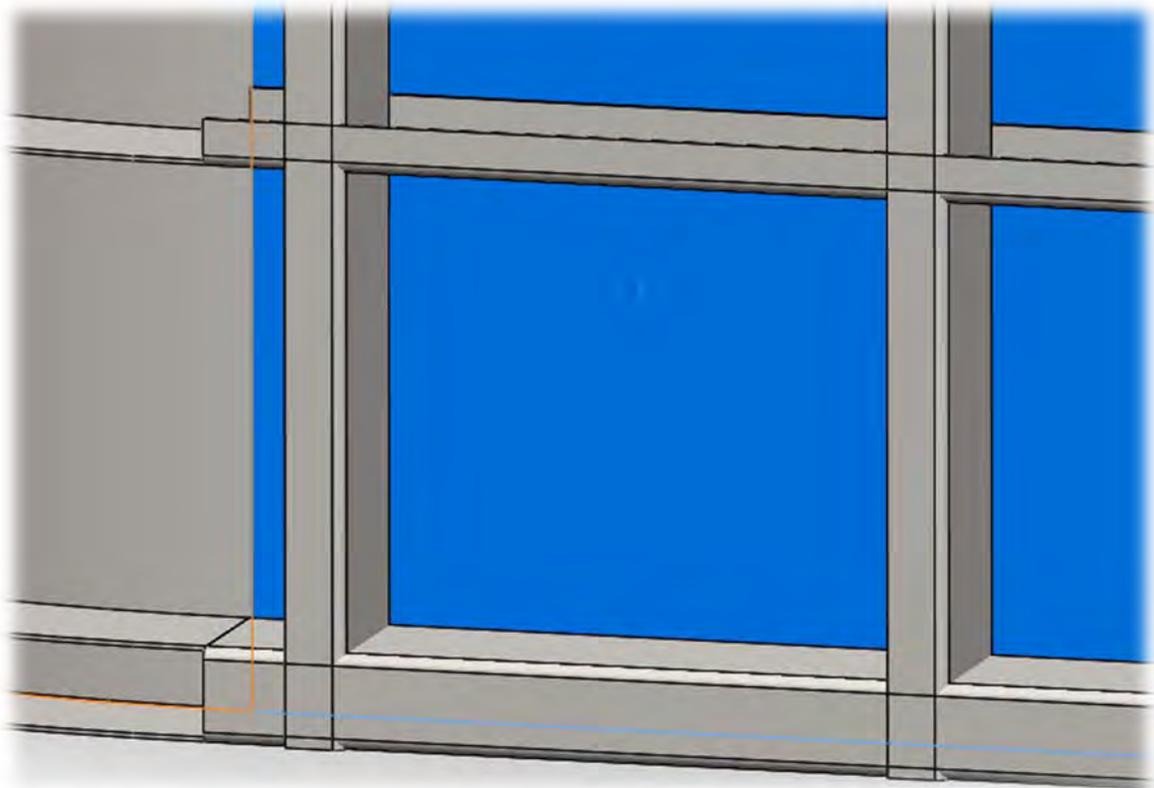


Figura 3-11: Esquema de sujeción de la lámina.

Por lo tanto sabiendo que los perfiles tienen una rigidez mucho mayor a la de la lámina, se considera que no se da una deflexión en los puntos de apoyo, y a su vez será máxima en el punto central de la lámina, para el análisis de esfuerzos en láminas existen distintos modelos matemáticos, dependiendo de unas relaciones geométricas principalmente, entre ellos:

- **Modelo de membrana:** empleado para láminas extremadamente delgadas, cuyo comportamiento está dominado por los efectos de la membrana, estructuras inflables, y textiles (paracaídas, velas, carpas, etc.)
- **Modelo von-Kármán:** para láminas o placas plegadas muy delgadas en las que los efectos de deflexión y membrana interactúan para contrarrestar las deflexiones laterales finitas. (Modelo importante para un análisis post pandeo)

- **Modelo de Kirchhoff:** para placas plegadas delgadas con pequeñas deflexiones, con energía cortante despreciable y con los efectos de la membrana y flexión desacoplados.
- **Modelo Reissner-Mindlin:** para placas delgadas y moderadamente gruesas, en las cuales los efectos transversales de esfuerzos cortantes de primer orden se consideran. (El modelo de Reissner fue propuesto para el análisis estático de placas moderadamente gruesas, mientras que el de Mindlin tenía como propósito estudiar de una manera más precisa las vibraciones en placas.

(Colorado, University of, Spring 2013)

El modelo de Kirchhoff parece ser el más adecuado, por lo que se detallará con mayor profundidad su teoría.

El modelo de Kirchhoff se puede aplicar a láminas o placas elásticas que cumplan con las siguientes condiciones:

- La placa es delgada en el sentido que su espesor es pequeño en comparación a su longitud característica, pero no tan delgada para que la deflexión lateral sea comparable con el espesor.
- El espesor de la placa es uniforme o varía lentamente de tal manera que se pueda despreciar los esfuerzos en tres dimensiones.
- La placa es simétrica en la fabricación respecto a la superficie media.
- Las cargas transversales aplicadas se distribuyen sobre superficies de la placa con dimensión h o mayor. (este modelo puede trabajar con cargas puntuales o lineales y brindar resultados aceptables.)
- Las condiciones de soporte son tales que no existe una extensión significativa en la superficie media.

Como se mencionó anteriormente el espaciamiento entre costillas considerado es de 0.5 m por lo tanto para calcular la deflexión en la lámina, se considera que un área de $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ esta soportada en los extremos. Inicialmente se considerará un espesor de 2 mm para la placa.

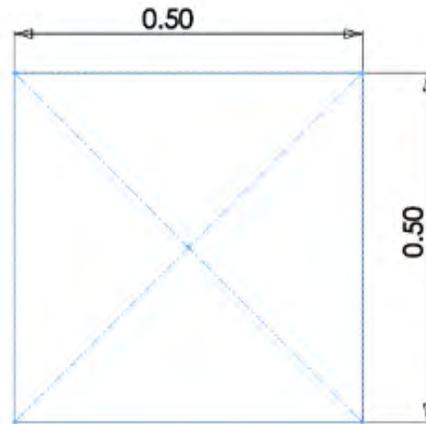


Figura 3-12: Dimensiones de placa sin apoyo sometida a presión hidrostática.

Las condiciones de frontera aplicadas a este modelo son las siguientes:

- Apoyo sin traslaciones en los contornos, (es una condición aceptable teniendo en cuenta que los perfiles son mucho más rígidos que la placa)
- Presión uniforme = 41.51 kPa (es la presión máxima desarrollada por el peso del concreto líquido).
- El material considerado: Acero A36 $S_y = 250 \text{ MPa}$

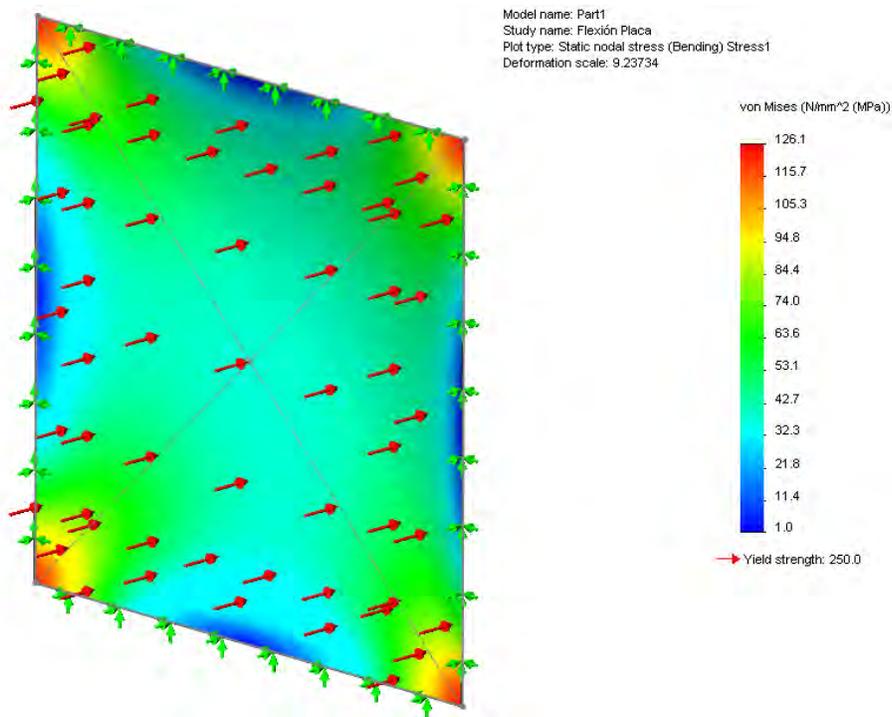


Figura 3-13: Diagrama de esfuerzo equivalente en lámina 2 mm apoyada en los extremos.

Se puede apreciar que los esfuerzos generados no son muy elevados, hay un factor de seguridad mayor a 2 a por simple inspección., sin embargo la condición de desplazamiento es más crítica para este diseño, pues como se mencionó en un principio el acabado es de gran importancia para la calidad del encofrado.

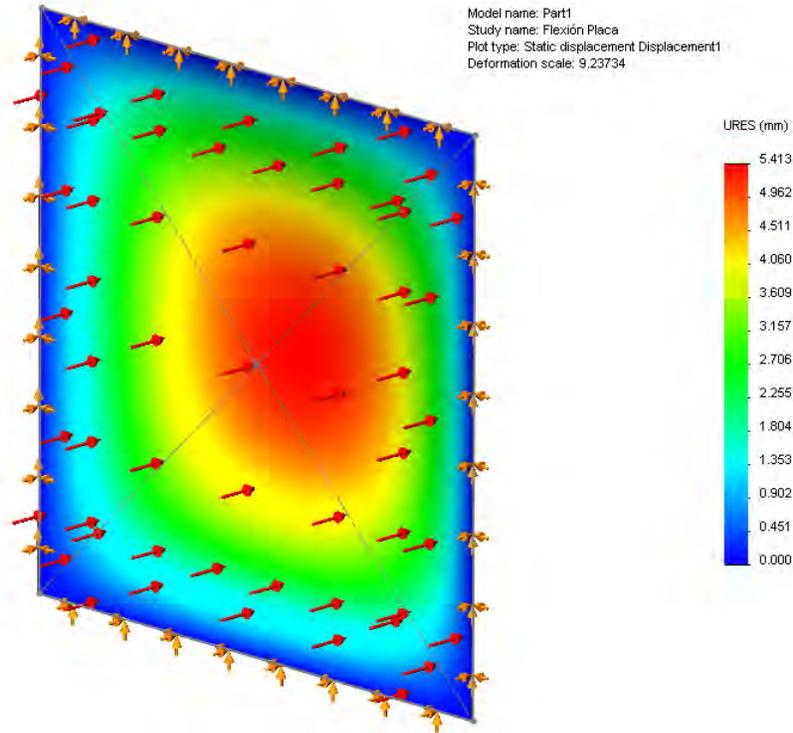


Figura 3-14: Diagrama de desplazamiento resultante lámina 2 mm apoyada en extremos.

Un desplazamiento de aproximadamente 5.5 mm en la parte central de la placa implica una deformación:

$$\frac{\text{deformación}}{\text{long. característica}} \times 100\% = \frac{5.5 \text{ mm}}{500 \text{ mm}} \times 100 = 1.1\%$$

En realidad la lámina no solo resiste la presión del concreto, además en ciertos puntos la fuerza de los tirantes también aparece.

Por lo tanto se aumentará en el mismo estudio una fuerza concentrada en un disco que iguale a la fuerza resultante de la presión de concreto.

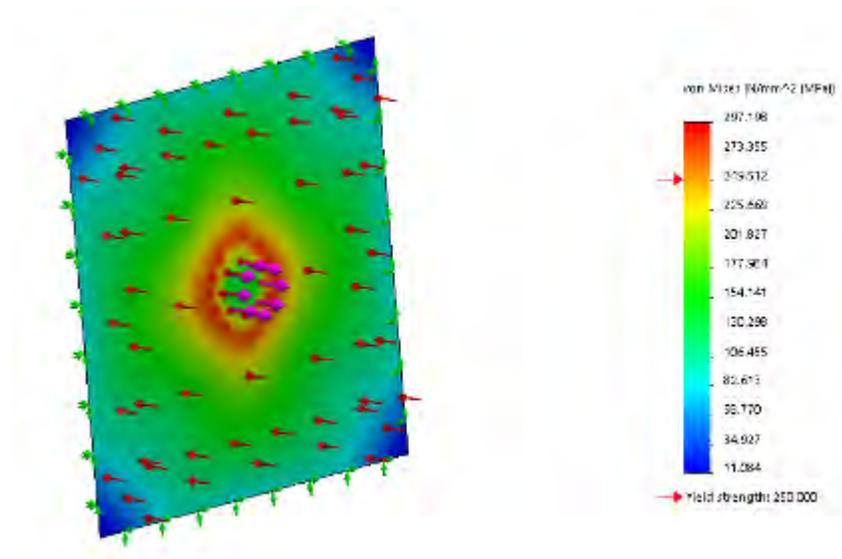


Figura 3-15: Diagrama de esfuerzo equivalente Von-Mises para lámina 2 mm con tirante.

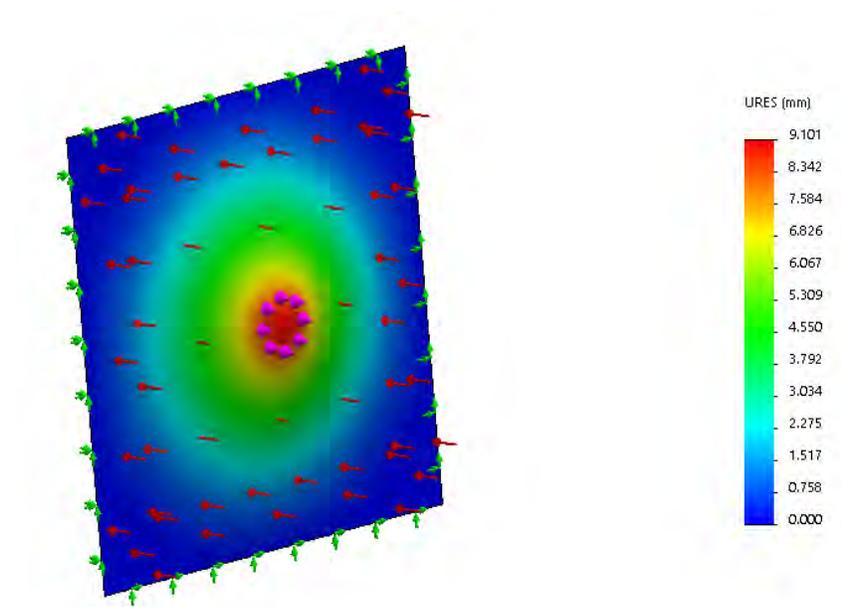


Figura 3-16: Diagrama de deformación (escala 2) lámina 2 mm con tirante.

En este caso la deformación de la lámina ya es bastante considerable (9 mm), el primer refuerzo que se debe estudiar será un incremento de espesor de 2 mm a 3 mm. Considerando que el esfuerzo equivalente máximo en la figura 3.16 está bastante cerca del límite de fluencia del acero A36 (250 MPa) de aquí en adelante se estudiará únicamente deformaciones hasta lograr optimizarlas.

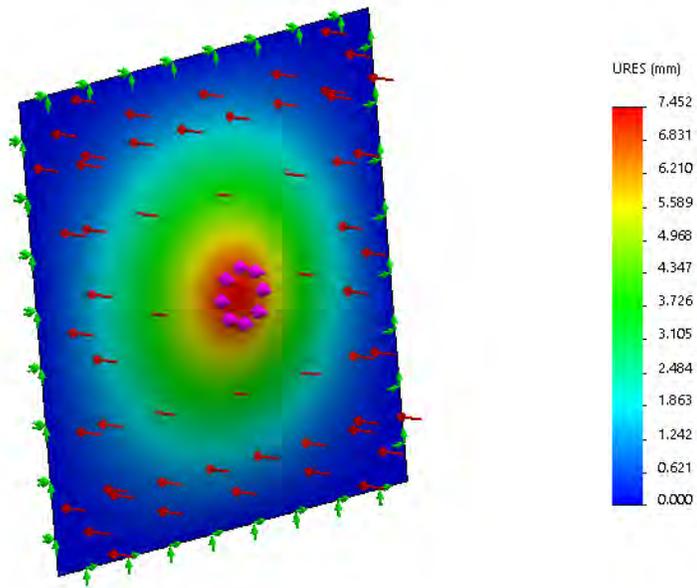


Figura 3-17: Diagrama de deformaciones lámina 3 mm con tirante.

Se puede notar que un incremento de espesor no es la solución, por lo tanto se plantea un perfil de refuerzo.

Se aumenta un perfil C 100x50x3 mm como costilla vertical manteniendo el espesor de la lámina en 3mm

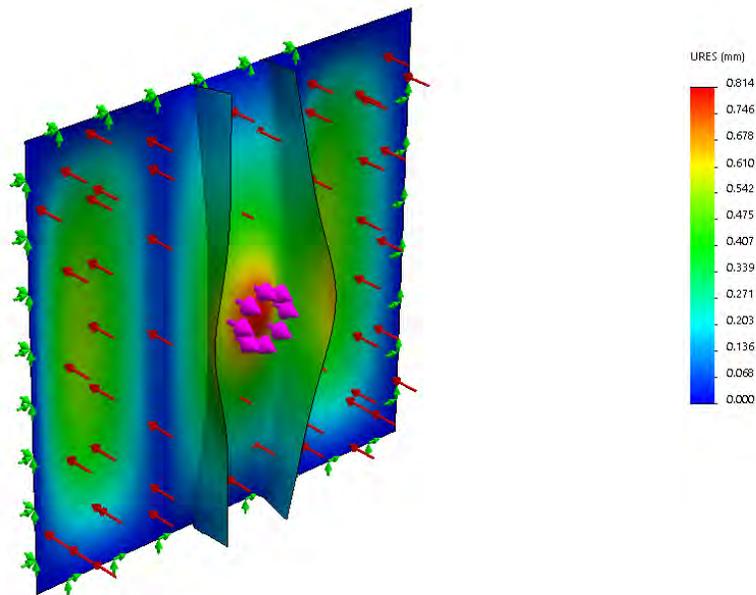


Figura 3-18: Diagrama de deformaciones lámina de 3mm, perfil C 100x50x3 mm y tirante

La deformación conseguida es de 0.81 mm en la zona del tirante y alrededor de 0.48 mm en la zona expuesta.

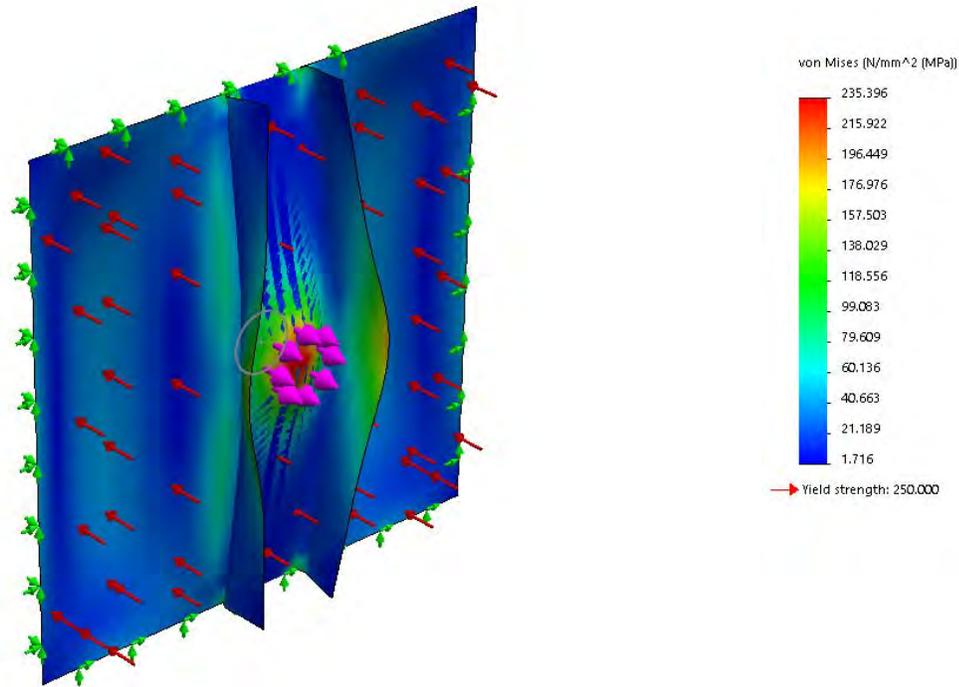


Figura 3-19: Diagrama de esfuerzo equivalente lámina 3mm, perfil C100x50x3 mm y tirante

Por lo tanto queda definida la lámina en 3 mm y el refuerzo con un perfil de C100x50x3 mm

3.6 Diseño CAD encofrado exterior

Considerando las medidas de los perfiles calculados en las secciones anteriores, se procede a diseñar en la forma más sencilla posible el encofrado exterior de una altura de 2.4 m, con las costillas horizontales, verticales, lámina y refuerzos.

Con el fin de facilitar la simulación por medio de elementos finitos se ha empleado en la mayor medida posible las operaciones de barrido y extrusión, esto permitirá más adelante modelar los perfiles como vigas para conseguir una simulación más ágil, cabe aclarar que para propósitos de manufactura se requiere que la geometría se genere con operaciones de *Sheet Metal* (placa metálica) para poder extraer los despliegues de las piezas y poder cortarlas.



Figura 3-20: Detalle costillas horizontales del encofrado exterior

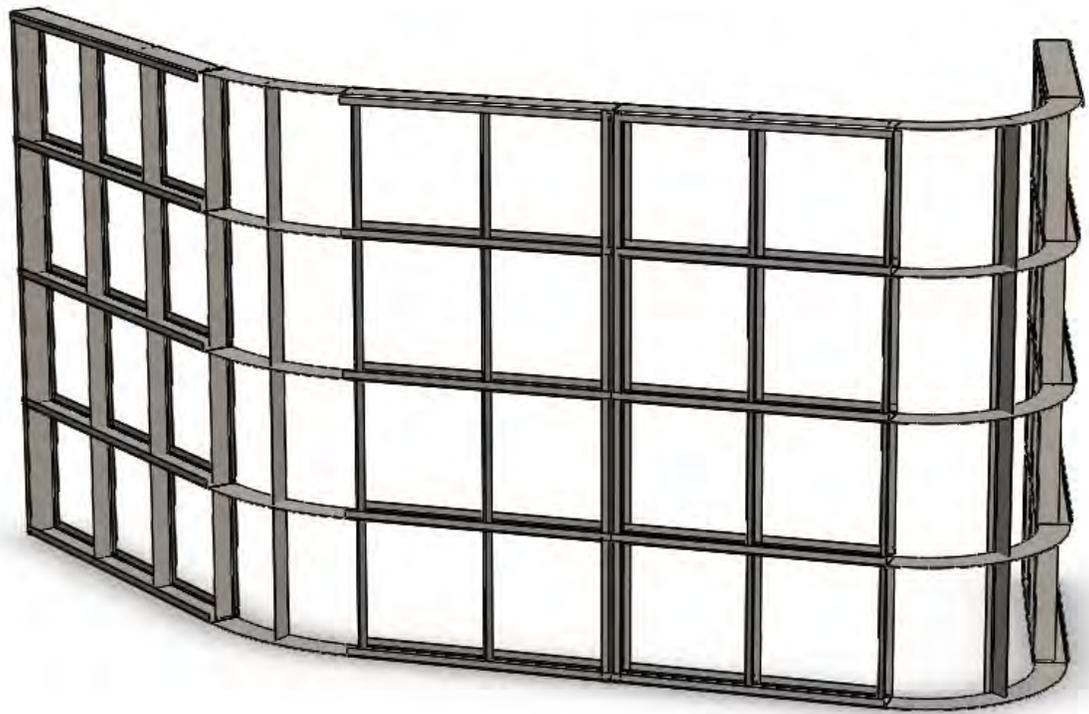


Figura 3-21: Detalle costillas verticales encofrado exterior

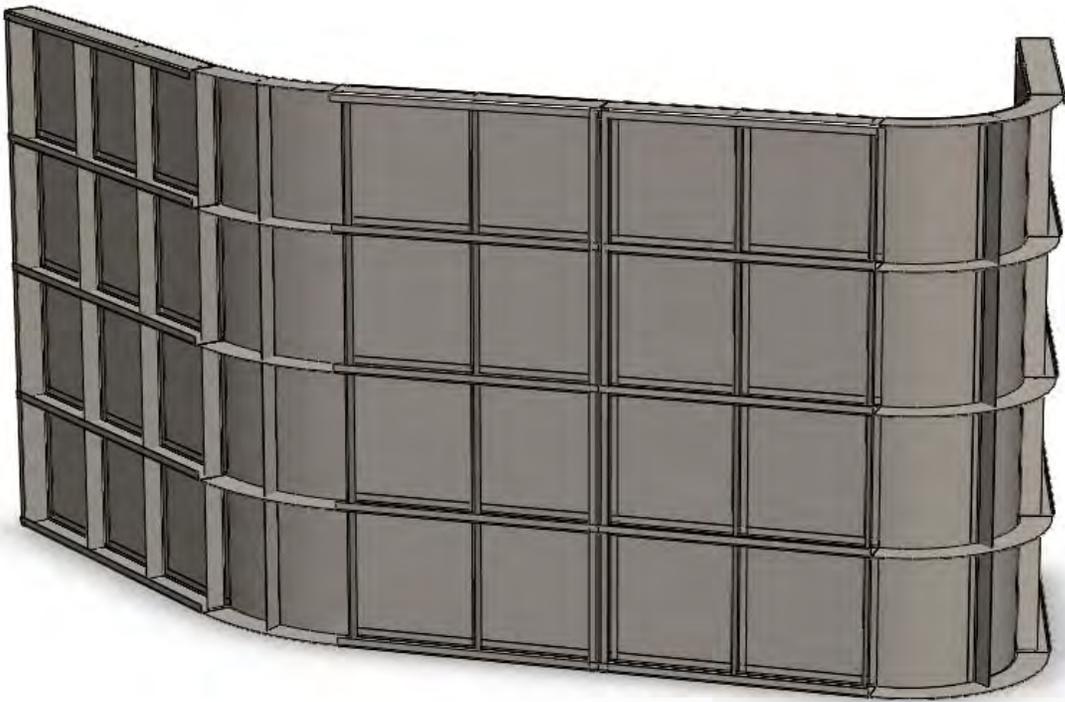


Figura 3-22: Detalle encofrado exterior con lámina



Figura 3-23: Encofrado exterior completo

3.7 Diseño de tirantes

Como se mencionó previamente la presión ejercida por el concreto (figura 3.24) antes de fraguar es la misma y opuesta a ambos lados de la pared, esto se puede aprovechar para que los segmentos internos y externos se soporten mutuamente por medio de unas uniones.

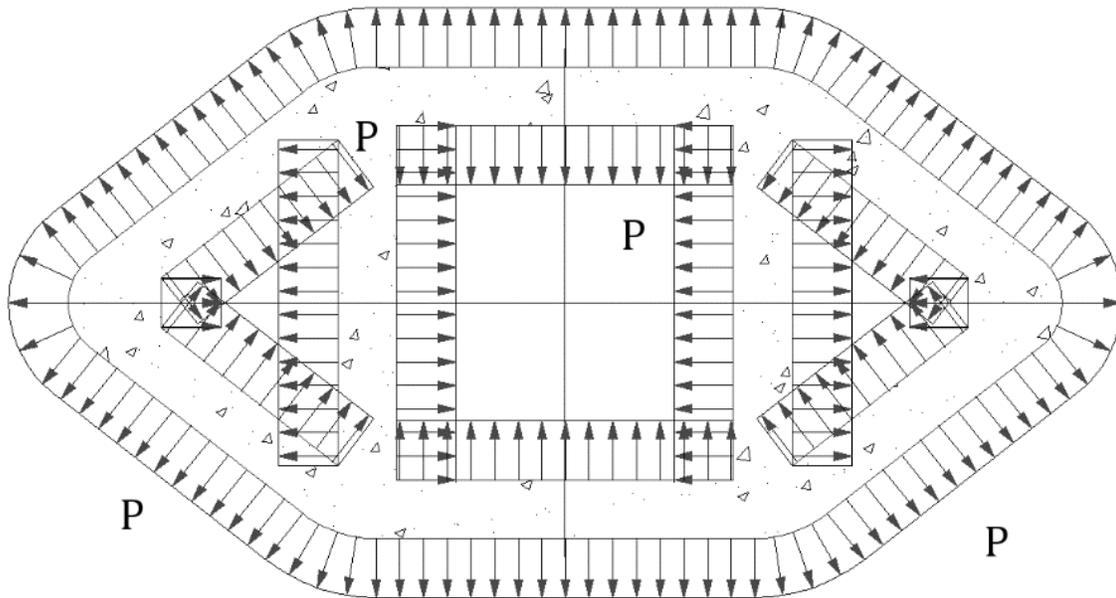


Figura 3-24: Distribución de presiones en la sección del pilar.

Debido a que los encofrados se deben construir en varios elementos o segmentos, es importante reconocer que si ambos segmentos se juntan en la mitad de una pared, dicha junta será más rígida por la ayuda que brindan los elementos de sujeción entre los segmentos internos y externos.

Además de soportar las cargas generadas por la presión hidrostática del concreto, estos elementos deberán proporcionar un tipo de sujeción para que el encofrado pueda “escalar” sobre el pilar que va dejando abajo.

Para poder dimensionar estas sujeciones, la primera aproximación será la del peso que deben soportar, cabe recalcar que solo el anillo base será el que soporte la estructura hasta que esta fragüe completamente. Por lo tanto se considerará solo un nivel de sujeciones todas ubicadas en un mismo corte de sección (a una misma altura distribuidas a lo largo del perímetro de la sección).

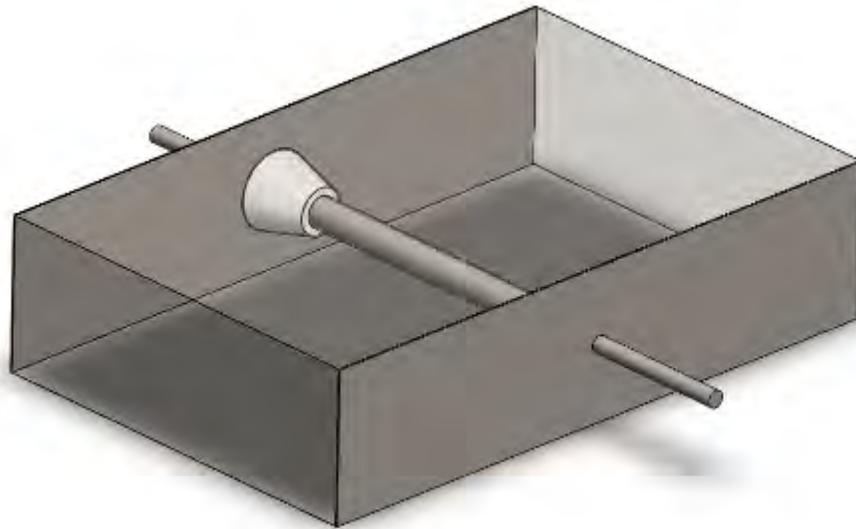


Figura 3-25: Esquema de la sujeción

3.7.1. Dimensionamiento por esfuerzo cortante de la sujeción

Considerando un esfuerzo cortante ejercido por el peso del encofrado exterior sobre el eje de la sujeción se puede dimensionar la cantidad de ejes requeridos.

Basado en el diseño CAD del encofrado exterior se puede calcular una medida de peso por metro cuadrado de encofrado para poder aproximar la carga que deben soportar las juntas.

El peso del encofrado Exterior 2.4 m de altura y 19.93 m de perímetro es 3.06 ton

$$\frac{\text{Peso}}{\text{m}^2} = \frac{3.06 * 1000}{2.4 * 19.93} = 55.6 \text{ Kg/m}^2$$

Por lo tanto si el encofrado será de 3 metros de altura, constará de un encofrado exterior y otro interior ambos perímetros sería:

$$\text{Perímetro exterior} = 19.93 \text{ m}$$

$$\text{Perímetro interior} = 25.625 \text{ m}$$

Por lo tanto podríamos considerar una carga muerta de encofrado de:

$$\text{Peso de encofrado exterior} = 3 \times 19.93 \times 55.6 = 3.32 \text{ ton}$$

$$\text{Peso de encofrado interior} = 3 \times 25.625 \times 55.6 = 4.27 \text{ ton}$$

Como se mencionó anteriormente el diseño considera 8 juntas ente encofrados en un corte de sección.

Por lo tanto para un primer cálculo se considerará únicamente la carga muerta del encofrado en el eje para dimensionarlo.

Considerando un esfuerzo cortante simple separado en ambos extremos del eje, se tiene:

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{4V}{\pi d^2}$$

Y conociendo que según el círculo de Mohr hay una relación entre el esfuerzo normal último y el esfuerzo cortante último:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

$$\sigma_u = 620 \text{ MPa}$$

$$\tau_u = \frac{620 \text{ MPa}}{2} = 310 \text{ MPa}$$

Por lo tanto si:

$$\text{carga cortante } V = \frac{4.274 \times 1000 \text{ Kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2}{8} = 5.241 \text{ kN}$$

$$d = \sqrt{\frac{4V}{\pi\tau}} \text{ F.S.} = \sqrt{\frac{4 \times 5.241 \text{ kN}}{\pi \times 200 \times 10^6}} \times 2 = 8.17 \text{ mm}$$

Considerando un eje de diámetro $\frac{1}{2}'' = 12.7 \text{ mm}$ el esfuerzo producido es de:

$$\tau = \frac{5.241 \text{ kN}}{\frac{\pi \times 12.7 \text{ mm}^2}{4}} = 41 \text{ MPa}$$

3.7.2. Cálculo a tracción de la sujeción

Teniendo en cuenta la distribución de presiones en la figura 3.24 se puede calcular las fuerzas que se generan en las láminas del encofrado; en una sección de encofrado de 3m se ubicará 4 niveles de juntas distribuidas a lo largo de la altura del elemento (1 en el anillo y 3 en el encofrado). Por lo tanto esta presión será soportada por las 4 juntas, en realidad considerando la distribución de presiones estudiada al inicio de este capítulo no estarían cargadas igual, sin embargo por motivo de asegurar el funcionamiento se considera presiones uniformes en todo el encofrado.

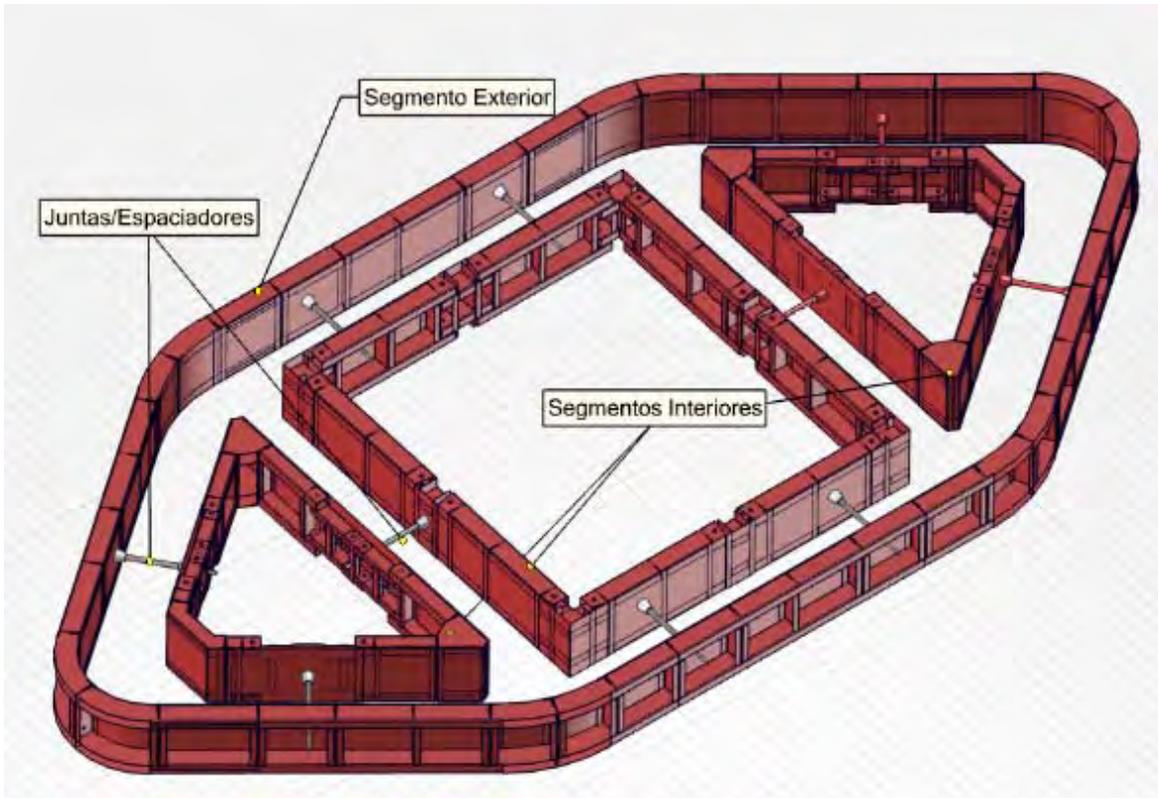


Figura 3-26: Ubicación de juntas en la sección del pilar

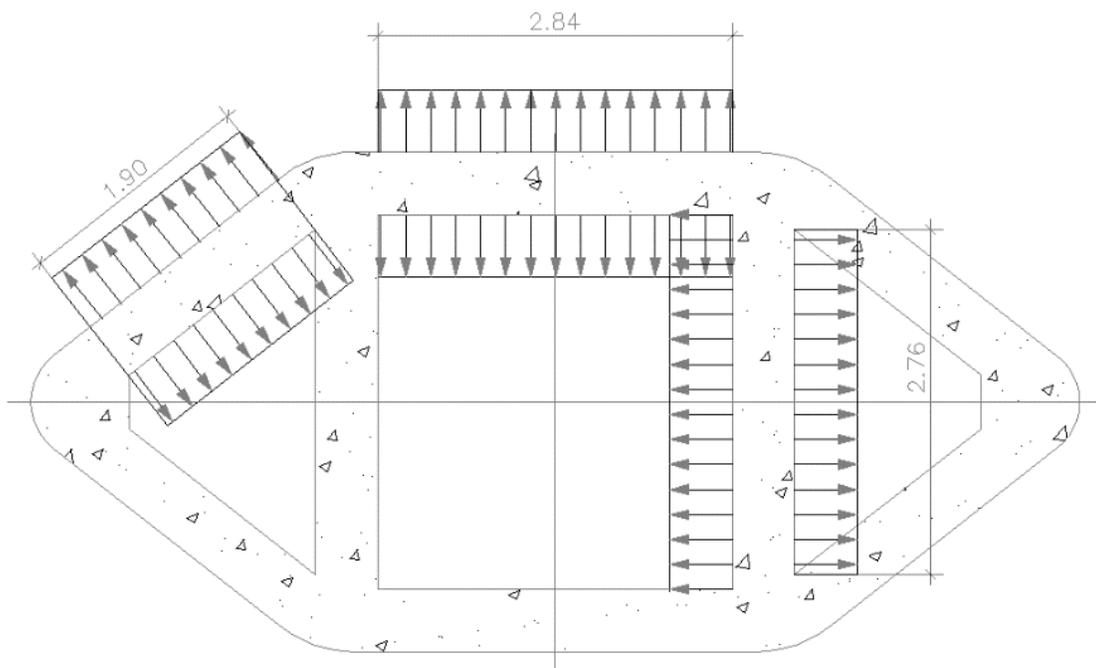


Figura 3-27: Distribuciones de presión en segmentos de pared en la sección del pilar

La presión que ejerce genera el concreto y soportan las sujeciones será la suma de ambas debido a que son presiones opuestas para el encofrado interno y externo,

Teniendo en cuenta que la sección triangular exterior mide 1.9m y es soportada por dos columnas de tirantes (distribuidas en la misma posición en la sección pero a distintas alturas), se procede a analizar dicha junta como la más crítica del encofrado.

Todas las otras paredes (las que forman el cuadrado) tienen dos columnas de juntas en cada cara.

$$\sigma = \frac{2P * AreaEquivalente}{Asección a tracción}$$

$$P_{max} (Completamente Desarrollada) = 41.51 \text{ kPa}$$

$$ÁreaEquivalente = 1.9 \text{ m} * 3 \text{ m}/4 = 1.425 \text{ m}^2$$

$$Área Sección = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$Factor de Seguridad = FS = 2$$

Para poder dimensionar el diámetro del eje que soportaría dicha tracción, se requiere escoger el material.

$$\sigma_Y = 415 \text{ MPa (AISI 1040)}$$

$$\frac{\sigma_Y}{FS} = \frac{2 * 41.51 \text{ kPa} * 1.9 \text{ m} * 3 \text{ m}/6 \text{ juntas}}{\pi * \frac{d^2}{4}} = \frac{401.676}{d^2} \rightarrow d = 22.00 \text{ mm}$$

El efecto de la carga normal generada por la presión hidrostática es mucho mayor que el del esfuerzo cortante por lo tanto la condición que domina es la de carga axial en la junta. Además teniendo en cuenta que no se consigue un eje de diámetro 22 mm en el mercado se aproxima al inmediato superior.

$$D = 7/8 \text{ " } = 22.225 \text{ mm}$$

$$\sigma = \frac{2 * 41.51 \text{ kPa} * 1.9 \text{ m} * 3 \text{ m}/6}{\pi * \frac{22.225^2}{4}} = 203.298 \text{ MPa}$$

Diámetro del eje de la junta = 1 ¼".

3.7.3. Diseño tirante/anclaje encofrado

Considerando que estas juntas deben ser removidas en el momento del desmontaje del encofrado o anillo, se debe considerar incluir algún elemento que pueda facilitar su extracción una vez fraguado el concreto, la solución más simple teniendo en cuenta que este elemento se quedará en el pilar es utilizar un tubo de PVC en el cual pueda trasladarse el eje de la junta.

Además se requiere algún elemento que permita fijar correctamente la separación entre encofrados y de la misma manera mantener la separación entre las láminas una vez que se vierta el concreto en el encofrado. De la misma forma el elemento más simple que puede cumplir dicha función es un par de rodela (arandelas) a cada lado de cada encofrado.

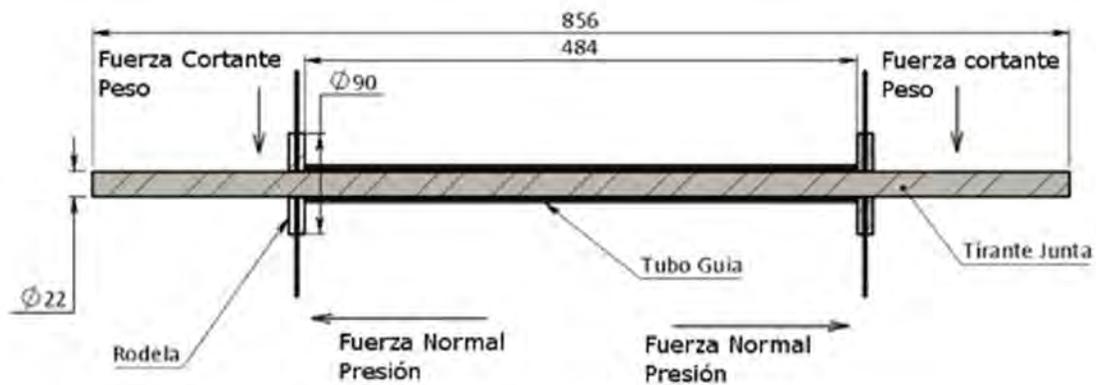


Figura 3-28: Esquema ensamblaje tirante

Teniendo en cuenta que las fuerzas normales generadas por la presión hidrostática son casi las resultantes considerando las otras fuerzas actuantes se puede afirmar que el tubo guía no requiere de una gran resistencia por lo tanto puede ser un tubo de PVC. Además hace falta considerar algún tipo de tuerca que permita sujetar a los elementos en su lugar.

3.8 Diseño del encofrado interior

3.8.1. Diseño geométrico de encofrados internos

Teniendo en cuenta que el perfil del pilar deseado es hueco, se requiere algún tipo de encofrado que pueda operar en un concepto similar al encofrado exterior (*SlipForm*) en la parte interna de la sección, por lo tanto se requieren 3 encofrados internos, un cuadrado y dos triangulares.

La solución presentada es construir los encofrados internos de tal manera que puedan articularse y reducir sus dimensiones para facilitar el proceso de avance del encofrado (el elemento inferior debe avanzar a ubicarse como elemento superior.), para esto es imprescindible calcular la geometría de cada elemento que conforme estos componentes, para esta etapa el *software* SolidWorks es de gran ayuda, por su capacidad de modelación paramétrica.

Partiendo de una sección similar a la del encofrado exterior podemos estimar cuanto se puede reducir la sección cuadrada una vez colapsada.

3.8.1.1. Encofrado interno cuadrado

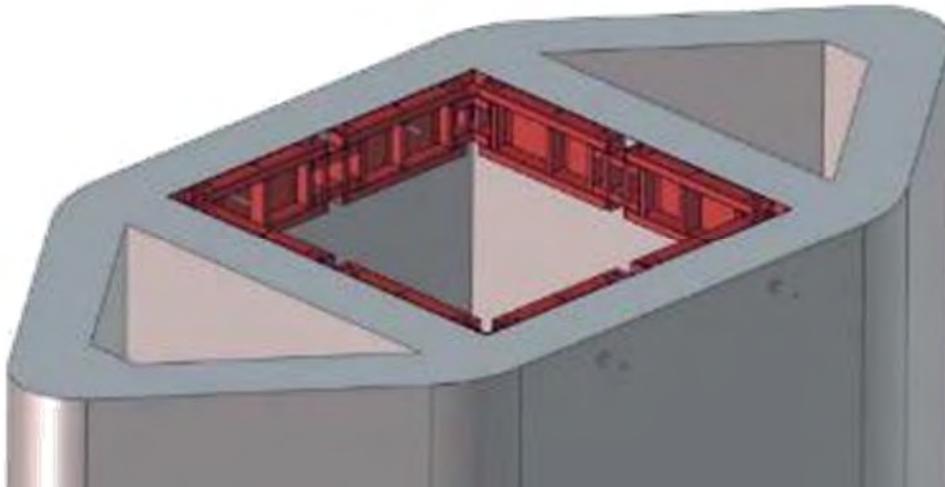


Figura 3-29: Ilustración de encofrado interno.

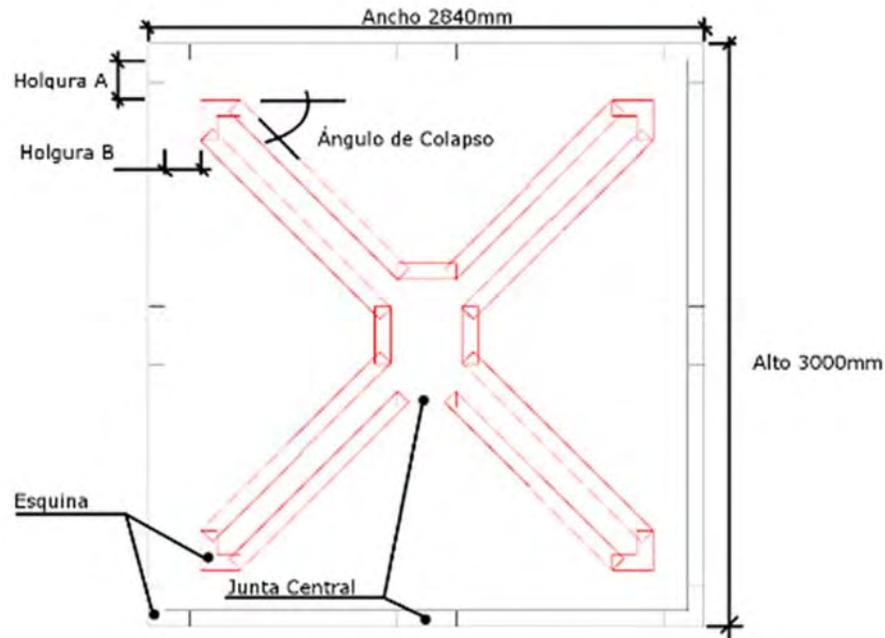


Figura 3-30: Concepto de colapso de encofrado cuadrado.

Para poder calcular las holguras se debe estimar la geometría, y posteriormente calcular los triángulos que se generan con el ángulo de colapso completo.

Partiendo de los datos conocidos, largo y ancho requeridos (Geometría de la sección).

Largo: 3000 mm

Ancho: 2840 mm

Datos estimados:

Ancho del perfil: 80 mm

Estimando que el espacio requerido en la esquina es de 2.5 veces el ancho de la sección las dimensiones de la esquina serán de 200x200 mm

Y por último, al ser las uniones centrales los puntos de movimiento, es importante que estos sean también los puntos de anclaje que permitan soportar el concreto durante el proceso de fraguado, requerirá de un espacio un tanto mayor a la esquina, es por esto que se toma una medida de 3.5 veces el ancho de la sección 280 mm

Todas estas medidas se deberán revisar posteriormente con un cálculo de presiones.

Con las medias anteriores se puede calcular la hipotenusa de ambos triángulos rectángulos

$$\text{Hipotenusa Largo: } \frac{3000}{2} - 200 - \frac{280}{2} = 1160 \text{ mm}$$

$$\text{Hipotenusa Ancho: } \frac{2840}{2} - 200 - \frac{280}{2} = 1080 \text{ mm}$$

Considerando un ángulo de colapso de 45° se puede estimar la holgura máxima para ambos casos.

$$\text{Holgura A: } 1160 - 1160 \cos(45) = 339 \text{ mm}$$

$$\text{Holgura B: } 1080 - 1080 \cos(45) = 316 \text{ mm}$$

Cabe aclarar que la holgura total para la extracción del encofrado interno será del doble de las anteriores.

3.8.1.2. Encofrado interno triangular

El colapso de esta sección es más complicado que el rectangular debido a que uno de los lados es mucho más pequeño que los otros dos; además a diferencia de la sección rectangular en esta sección, se puede crear una interferencia entre los brazos móviles debido a la configuración, es por esto que la holgura debe ser un poco menor a la anterior.

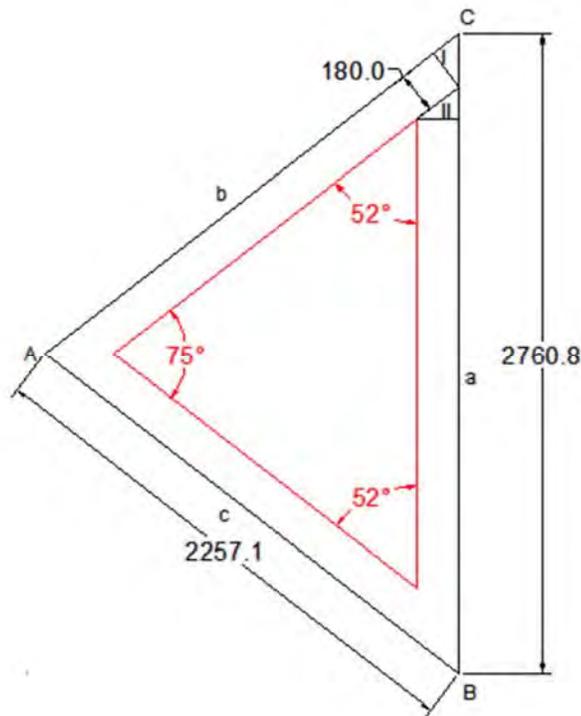


Figura 3-31: Esquema holgura del encofrado triangular interior.

En la esquina superior derecha del triángulo se crean dos triángulos rectángulos (I y II) con los cuales se puede medir la diferencia de longitudes entre el lado a y a' .

$$\frac{a - a'}{2} = 180 \tan \frac{75}{2} + \frac{180}{\sin 52} = 366.54$$

Por lo tanto $a' = a - 2 * 366.54 = 2027.7$

Conociendo a' se puede conocer b' y c' por medio del teorema de cosenos cabe recalcar que $b = c$ y $b' = c'$ por triángulo isósceles.

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A$$

$$2b'^2 - 2b'^2 \cos A = a'^2$$

$$b' = \sqrt{\frac{a'^2}{2(1 - \cos A)}} = 1665.45$$

Al ser un triángulo isósceles solo hace falta calcular los brazos de dos lados para poder encoger el encofrado en el momento de avance.

Para el lado a :

$$\Delta a = 366.54 * 2 = 733$$

Por lo tanto cada brazo del lado a debe medir. $la = \Delta a / 2 = 366.5$

Para el lado b o c :

$$\Delta b = b - b' = 2257.1 - 1665.45 = 591.65$$

De la misma manera la longitud de cada brazo en el lado b y c será de: $lb = \Delta b / 2 = 295.83$

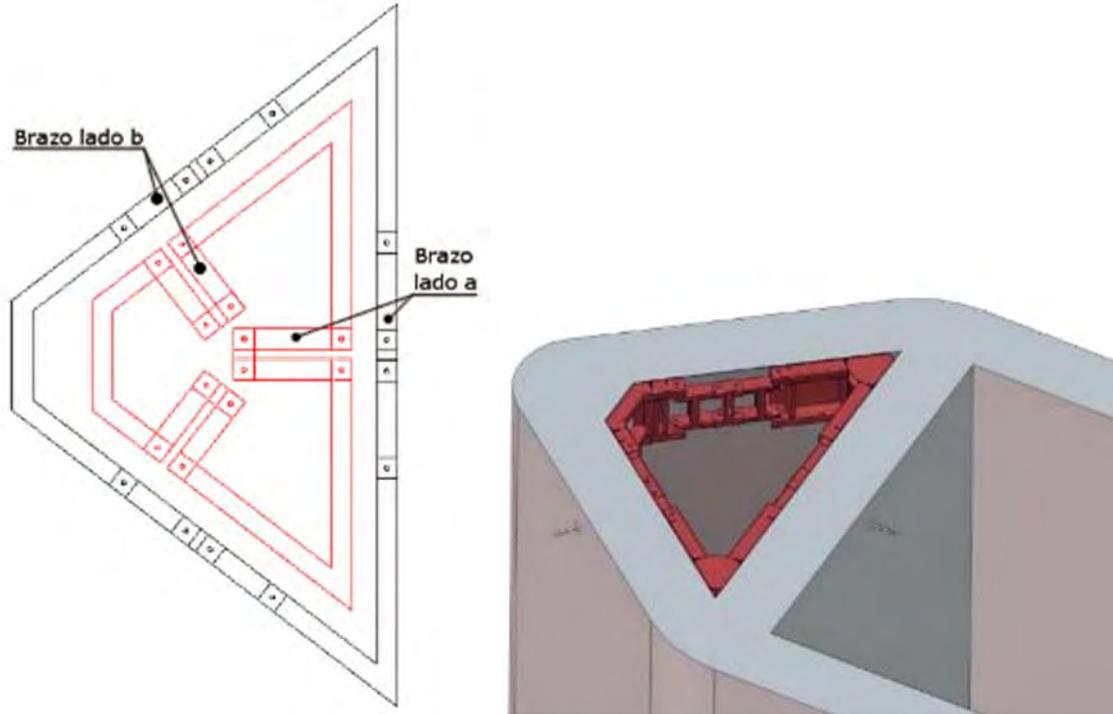


Figura 3-32: Esquema de colapso de encofrado triangular interior.

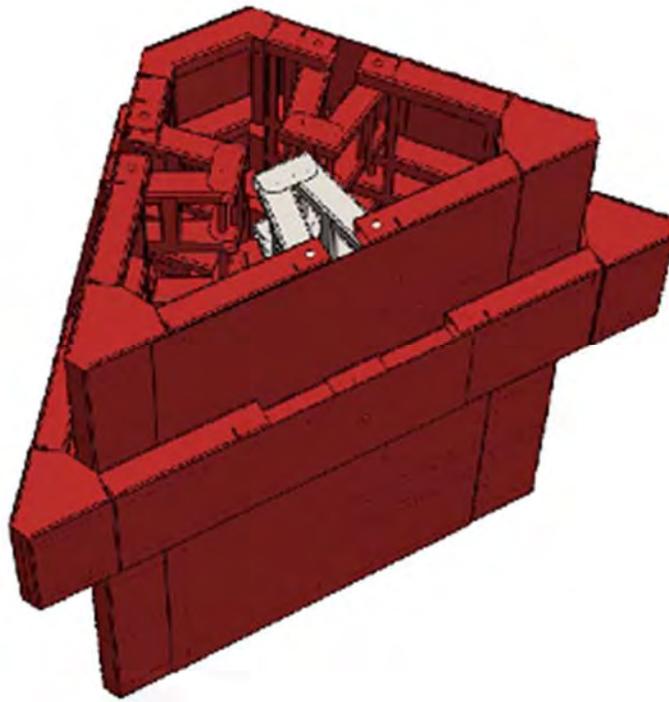


Figura 3-33: Encofrado triangular avanzando.

3.9 Diseño plataforma

Siendo que el funcionamiento del sistema de encofrado logrará elevaciones de 30 m y 25 m, la plataforma que permitirá el trabajo de los operarios debe ser lo suficientemente amplia para que ellos puedan operar cómodamente en las etapas requeridas.

Una buena medida para el ancho de la plataforma sea de 1.2 m, con esta dimensión se logra un espacio suficiente para traslado, almacenamiento de componentes. Como se mencionó anteriormente la plataforma debe permitir un fácil montaje y desmontaje en el anillo. Para facilitar el anclaje de la plataforma se considera que se deberían anclar las bases de la plataforma en las costillas verticales del anillo.

Para las ménsulas de la plataforma se construirá un perfil I de sección variable de elementos soldados.

Para la plataforma en sí se planea utilizar correas G que funcionen a manera de tabloncillos.

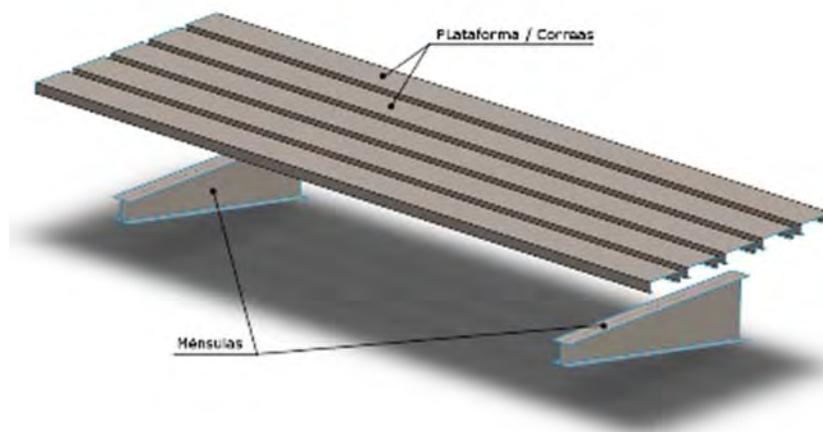


Figura 3-34: Esquema de componentes de la plataforma.

Un dato importante para conocer del funcionamiento de la plataforma es las reacciones en los apoyos de las ménsulas.

Basado en la figura 1.26 (diagrama de cargas distribuidas en las plataformas estado de la ingeniería de los encofrados) se empleará la carga distribuida de 200 kg/m^2 en la plataforma, este valor contempla que en algún momento la plataforma deberá soportar partes del sistema además del personal.

Para el estudio de la plataforma se considera un segmento con una luz de 2.5 m entre ménsulas. Los apoyos de estas se ubican en las alas del perfil I, la idea es que el apoyo superior será un pin y el inferior solo un apoyo

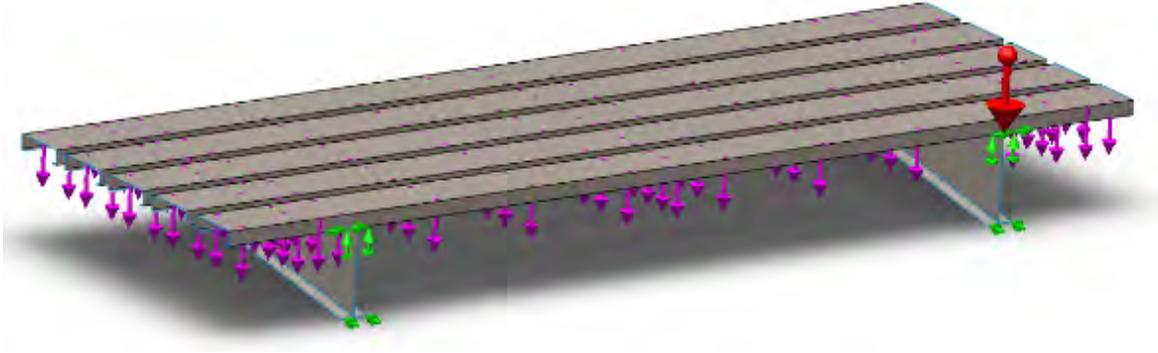


Figura 3-35: Esquema de cargas para simulación.

La carga que debe soportar la plataforma será:

$$200\text{kg/m}^2 * 1.2\text{ m} * 3\text{ m} * 9.81\text{ m/s}^2 \approx 7200\text{ N}$$

Los apoyos en las ménsulas deben estar configurados de la siguiente forma:

Apoyo superior: restricción en traslaciones en x, y y z, restricción en rotacion z y y, rotacion libre

Apoyo inferior: restricción en traslación y.

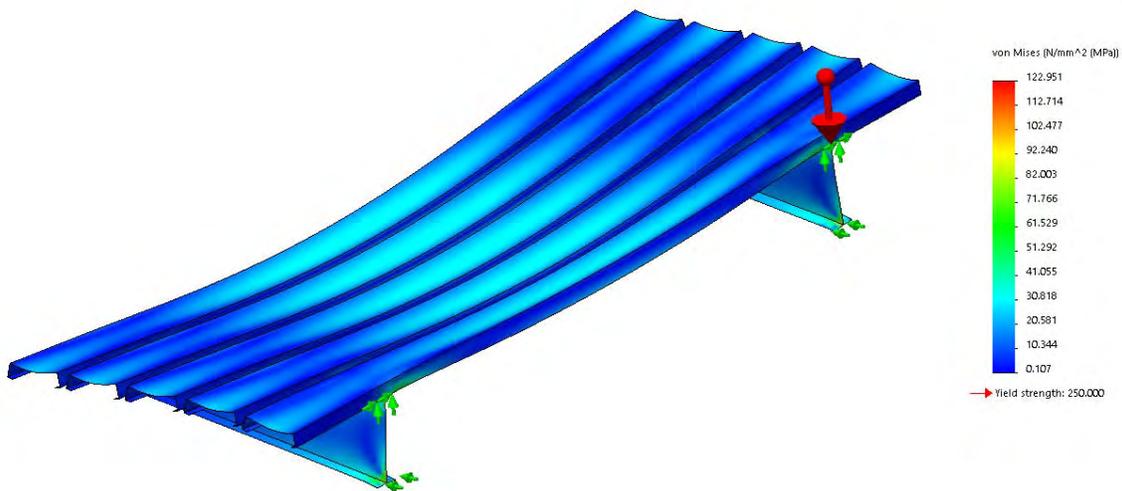


Figura 3-36: Diagrama de esfuerzo equivalente plataforma.

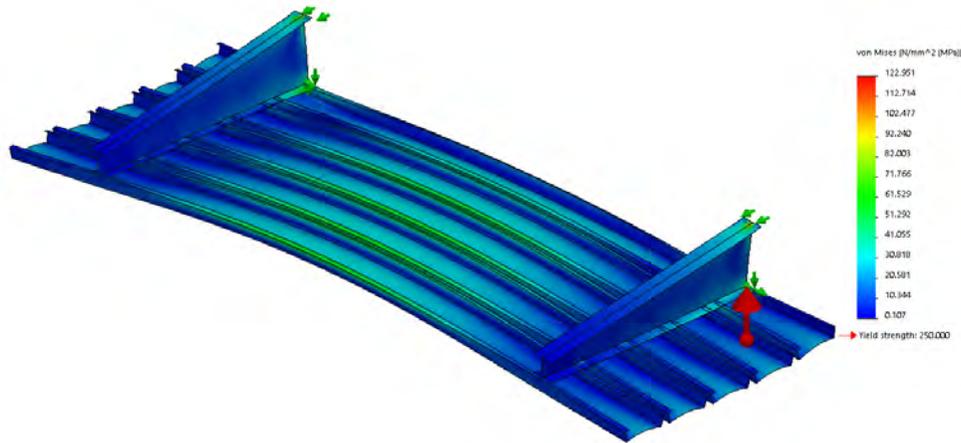


Figura 3-37: Diagrama de esfuerzos equivalentes plataforma.

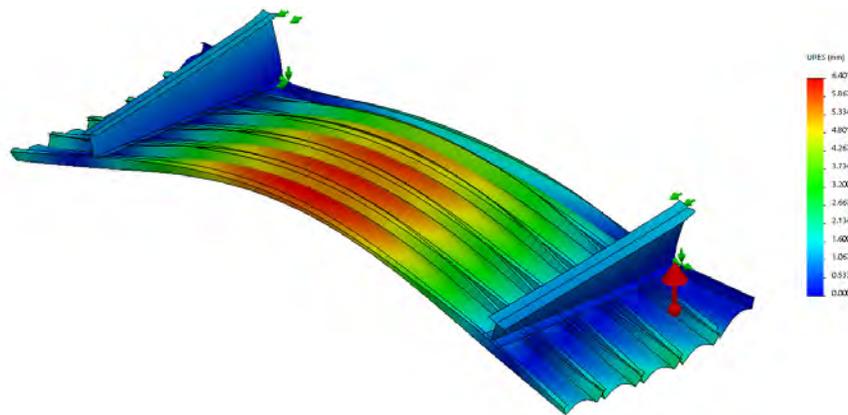


Figura 3-38: Diagrama de deformación resultante.

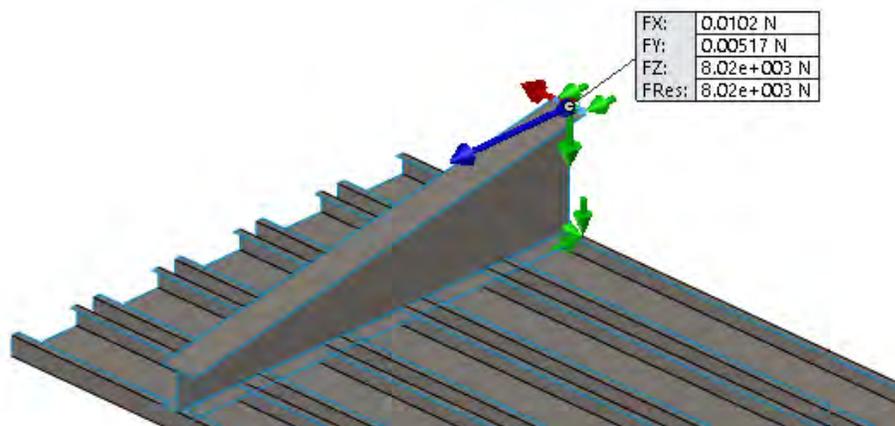


Figura 3-39: Fuerza resultante apoyo inferior.

La fuerza resultante en cada apoyo inferior es de 8023 N.

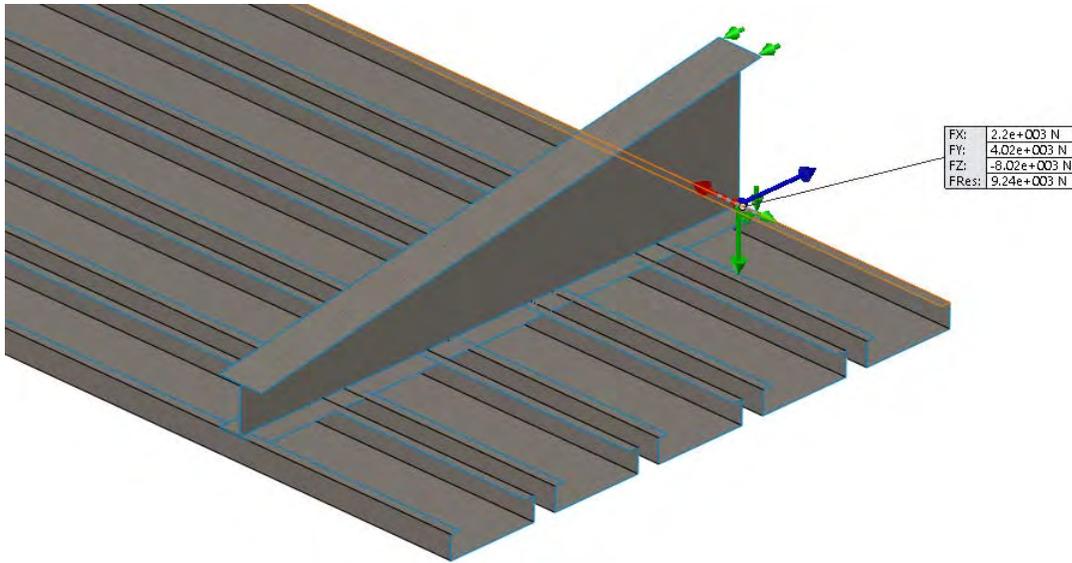


Figura 3-40: Fuerzas y momentos resultantes apoyo superior.

La fuerza resultante del apoyo superior es de 9240 N.

Conociendo la fuerza de reacción en el apoyo superior se puede dimensionar el pin que lo sujetará.

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{9240 \text{ N}}{A} = \frac{250 \text{ MPa}}{2} \rightarrow A = 73.92 \text{ mm}^2$$

$$A = \pi \frac{d^2}{4} \rightarrow d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 9.7 \text{ mm}$$

Por lo tanto el pin puede ser de ½" de diámetro.

$$\tau = \frac{9240 \text{ N}}{\pi d^2 / 4} = 72.94 \text{ MPa}$$

Capítulo 4

Cálculos y revisión asistida por computadora

Con las aproximaciones anteriores se puede fácilmente caer en cuenta que realizar un cálculo completo de toda una estructura de este tipo puede ser muy complejo y laborioso. Además si a esa magnitud de cálculos se la añade el factor del tiempo estimado para la ejecución de cada proyecto, se requiere que estos se realicen de la manera más rápida posible. Es aquí en donde destacan los software CAD y CAE en el área de ingeniería.

CAD Computer Aided Design, (Diseño asistido por computadora)

CAE Computer Aided Engineering, (Ingeniería asistida por computador)

En el presente trabajo se ha empleado el Software SolidWorks que involucra ambas áreas, CAD todos los diseños realizados en SolidWorks son o están parametrizados, esto permite una cierta agilidad durante la etapa de diseño ya que se puede acomodar o corregir partes sin afectar los avances logrados, además permite realizar operaciones con cuerpos o partes (simetrías, matrices, etc).

Como parte del paquete SolidWorks está incluido el paquete SolidWorks Simulation, que es la parte CAE del *software*. En ésta se puede hacer cálculos de componentes o ensamblajes complejos con bastante facilidad. Sin embargo, todos los resultados que se puedan obtener deberán ser validados por el criterio de un ingeniero con el fin de poder asegurar que la idealización del problema simulado sea o se acerque en gran medida al problema real.

En muchos casos dependiendo de la complejidad del diseño resulta muy complicado realizar una simulación para poder estudiar un modelo en específico, es en este punto que se originan muchas de las fallas al momento de la simulación. Debido a que los algoritmos de cálculo están basados en un cálculo de un número específico de elementos finitos, resulta que aparecen varias inconsistencias que complican dicho cálculo y además como se mencionó anteriormente son el origen de errores en la simulación o resultados.

4.1 Modelado del encofrado para simulación

Teniendo en cuenta la magnitud de esta estructura, una simulación completa del encofrado requeriría de una PC con muy altas prestaciones, es por esto que en muchos casos se aconseja simplificar el diseño para lograr una simulación que permita conocer o estudiar el proyecto con la mejor aproximación posible a la realidad.

Para facilitar la simulación del encofrado la solución fue crear un modelo específicamente para la simulación, teniendo en cuenta que habría muchas cosas que causarían problemas o inconsistencias al momento de la simulación. A continuación se detalla algunas de ellas:

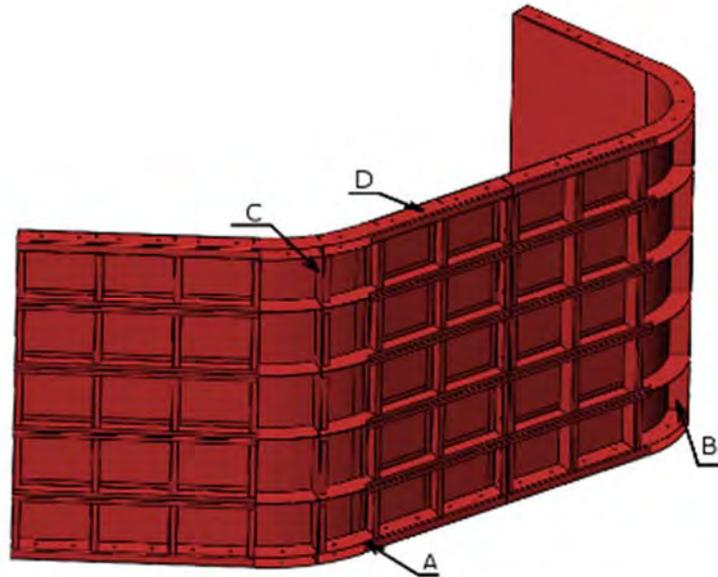


Figura 4-1: Detalles para simplificar en el modelo de simulación

(La imagen es del modelo constructivo).

A. Empalmes o uniones de elementos.-

Si se compara un modelo de detalles constructivos, este requiere que se prevea holguras y destajes que permitan un fácil ensamblaje, y además permitan tener un espacio para la penetración de la soldadura, entre otros.

Para los efectos de la simulación todos estos detalles complican el mallado del modelo, además de añadir muchas más condiciones de contacto entre cuerpos. Al modelar todos los perfiles sin cortes o destajes se puede cambiar el tipo de malla del tipo **cuerpo sólido** al tipo **Viga** (solo es posible para un elemento de sección constante)



Figura 4-2: Comparación costilla modelo constructivo (izq.) y modelo para simulación (der.).

Se puede deducir fácilmente que el cálculo de elemento con una **malla sólida** (modelo constructivo) generará una carga mucho mayor en el computador, comparándola con una malla de un elemento construido con una sección circular equivalente a la del perfil (mallado tipo **viga**).

B. Tangencia de componentes

La tangencia de componentes implica que existe un contacto en un punto o una recta, constructivamente o en la realidad esto se compensa al momento de soldar o ensamblar, pero para el software estos puntos de contacto tan pequeños se traducen en esfuerzos muy elevados (fuerza / área) teniendo en cuenta que las áreas son prácticamente nulas.



Figura 4-3: Comparación de tangencia de modelo constructivo y en modelo de simulación.

Al modificar la sección del parante se puede mejorar la condición de contacto de la lámina pues ahora el área de contacto si existe. En muchos casos al fallar esta condición se puede dar que la solución de la simulación muestra como si la lámina atravesara el parante.

C. Láminas o elementos delgados.

De una manera análoga a la comparación entre la **malla sólida** y de tipo **viga** en el parante se presenta otra alternativa para elementos construidos en **láminas** (*Sheet Metal*), al tener estos elementos una de sus medidas mucho menor (despreciable) en relación a las otras, (condición de lámina o placa), se puede mallarlos como si no tuvieran espesor. Para esto hay que utilizar el tipo de **malla de lámina**, definir el espesor de la lámina y además definir el offset de dicho espesor (plano medio, cara superior, inferior, etc).

En varias ocasiones se presentan muchas fallas o errores al momento de mallar una lámina como un sólido debido a la diferencia de proporciones en las dimensiones de la geometría, esto se resuelve utilizando el tipo de **malla lámina o shell**.

D. Perforaciones en vigas

Al igual que los destajes y holguras, las perforaciones o cortes en una viga resultarán en que no se pueda aplicar una malla de tipo viga.

4.2 Mallado del modelo.

Cuando se intenta mallar el modelo constructivo, al primer intento aparece un mensaje de falla en el mallado, esto quiere decir que algunos de los elementos no se lograron mallar, se puede apreciar en la figura 5-4 que faltan partes del modelo en el resultado de la malla. Para lograr mallar todos los componentes se debe analizar y revisar muchas alternativas de mallado y escoger las más adecuadas para cada uno de los elementos que fallaron.

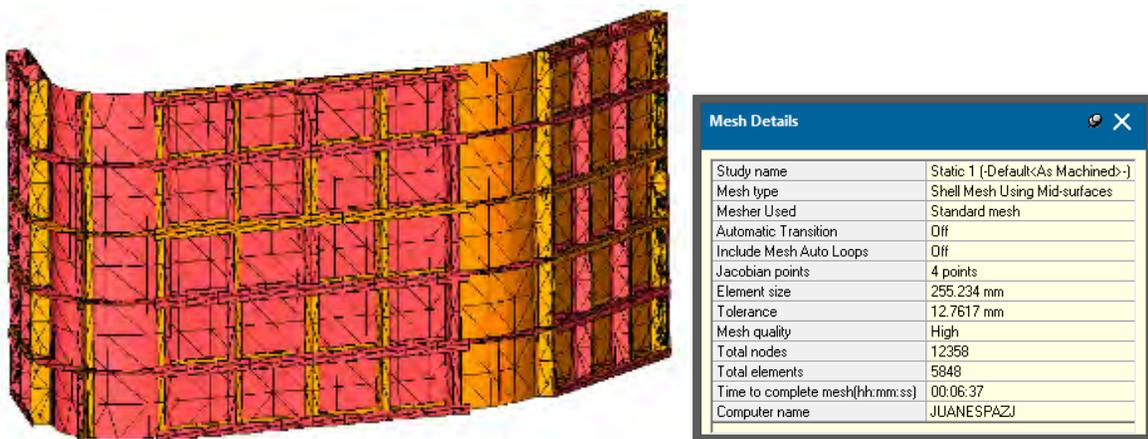


Figura 4-4: Malla de modelo constructivo

(Falla el mallado al primer intento, malla incompleta).

Por otro lado en el caso de una **malla mixta** (vigas y láminas) que se puede lograr con un modelo diseñado específicamente para simulación la malla se genera en el primer intento y además requiere de mucho menos tiempo.

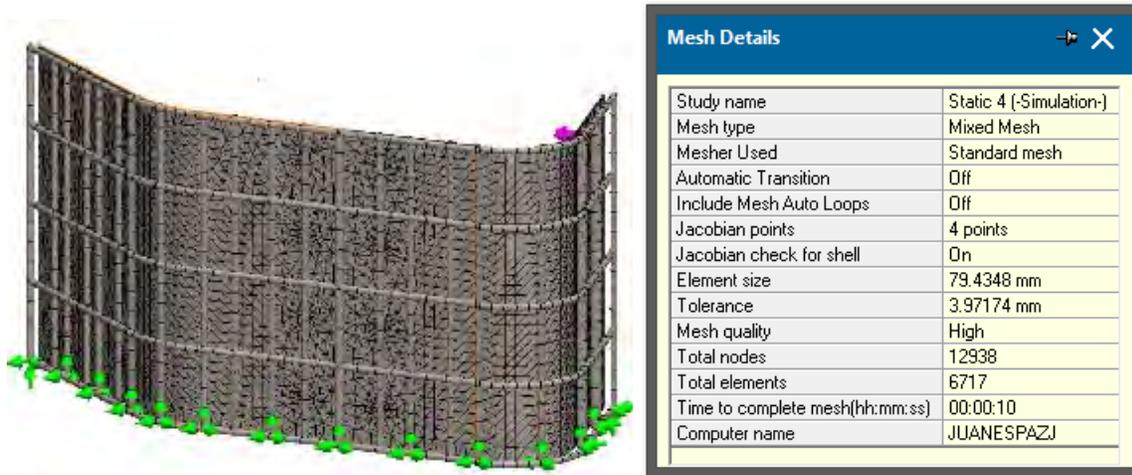


Figura 4-5: Malla del modelo de simulación.

Se puede apreciar en el detalle de mallado que la diferencia en los tiempos de mallado es descomunal mallado del modelo **constructivo** 6 minutos con 37 segundos y el mallado del modelo de **simulación** 10 segundos

Por lo tanto se puede afirmar que es muy útil reconocer el tipo de malla que se debe emplear en cada elemento así como reducir o eliminar todos los puntos o geometrías que generan inconsistencias y complican el mallado y complicarán la simulación.

4.3 Condiciones de carga (cargas, restricciones, materiales)

Esta etapa es la más complicada de las simulaciones debido a que muchas veces no existen o se conocen los datos exactos de las cargas, es por esto que es importante conocer el funcionamiento u operación que tendrá o se prevé que tendrá el sistema a simular de tal manera que se pueda en cierta forma asegurar que cuando este se haya construido, funcione correctamente y falle lo menos posible.

4.3.1. Materiales.

El material empleado en la mayoría del proyecto es el Acero ASTM A36 o acero estructural, en esta simulación teniendo en cuenta que todo se construye a partir de láminas el Material es Acero A36 para todo.

4.3.2. Cargas.

Teniendo en cuenta los cálculos de presión hidrostática realizados en el Capítulo 3, se tiene las siguientes cargas.

4.3.2.1. Presión ejercida por el concreto = 6psi (presión máxima)

Como ya se mencionó anteriormente, la carga más importante de un encofrado es la presión que genera en el momento del vertido y esta depende en gran parte de la geometría.

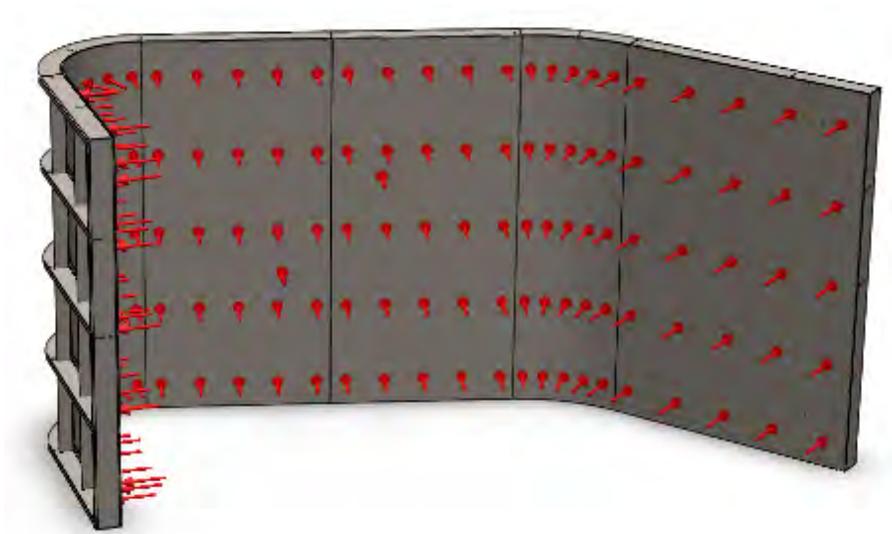


Figura 4-6: Presión hidrostática completamente desarrollada.

4.3.2.2. Fuerzas entre encofrados internos y externos.- *presión x área*

Considerando que en el momento que empieza a trabajar el encofrado, (empieza a llenarse con concreto) la presión generada intenta separar los encofrados internos de los externos, esta misma presión generará una reacción en cada tirante que resulta ser una gran ayuda para reducir las deflexiones.

Considerando que en cada pared de la sección se ubicarán dos columnas de 4 tirantes, en total (16 tirantes en el perímetro de la sección)

$$\text{Fuerza pared sección triangular} = (41.51 \text{ kPa} \times 1.90\text{m} \times 3\text{m}) / (2 * 4) = 29.576\text{kN}$$

$$\text{Fuerza pared sección rectangular} = (41.51 \text{ kPa} \times 2.84\text{m}/2\text{m} \times 3\text{m}) / (2 * 4) = 22.104 \text{ kN}$$

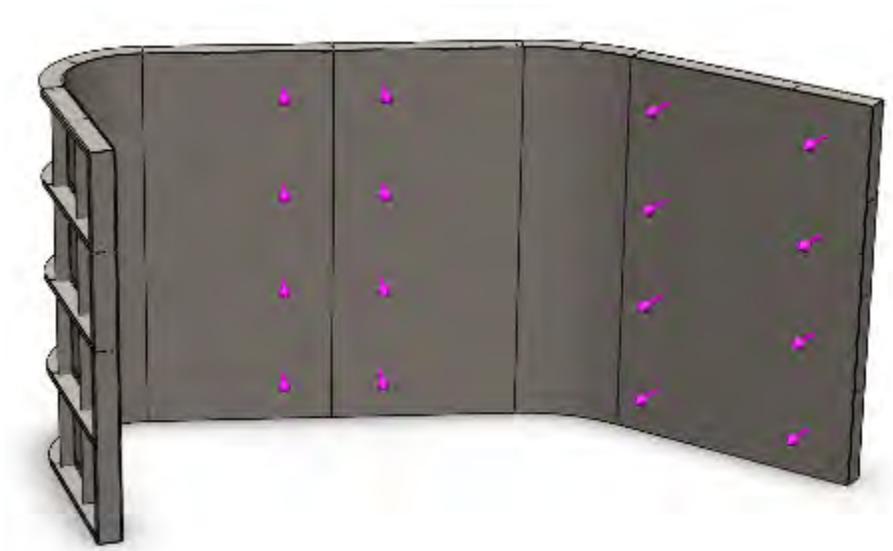


Figura 4-7: Fuerzas transmitidas por los tirantes.

4.3.2.3. Fuerza de gravedad

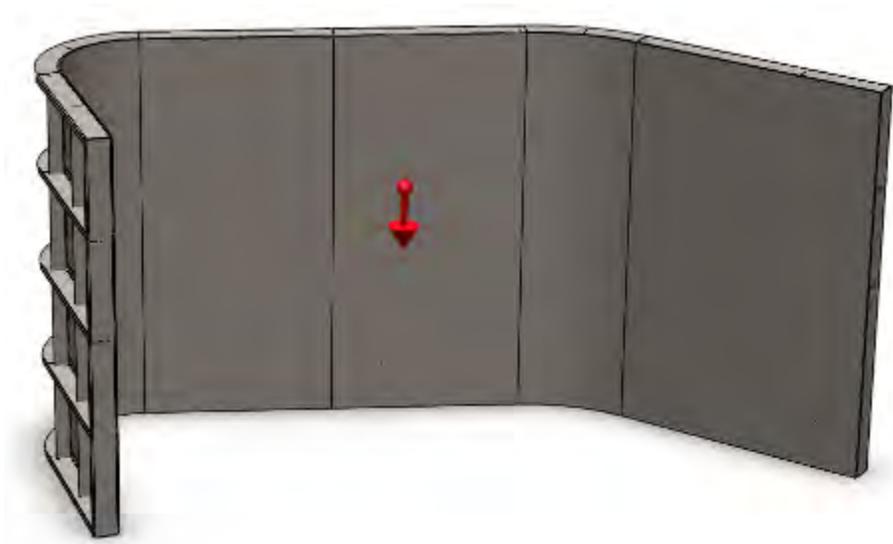


Figura 4-8: Fuerza de gravedad.

4.3.3. Restricciones

El encofrado se empernará a un anillo en la parte inferior, esta restricción se puede aproximar como varios apoyos sin traslación

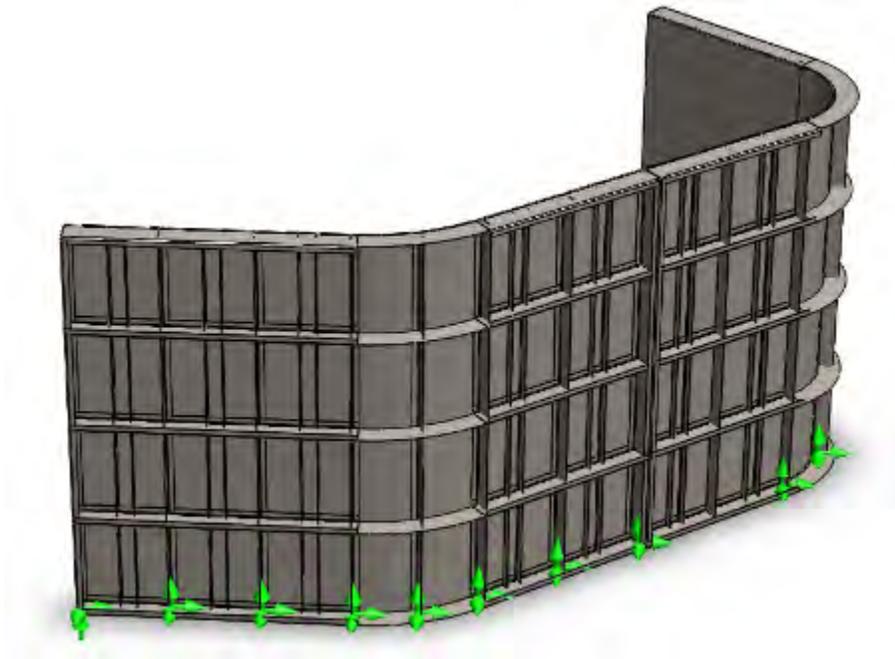


Figura 4-9: Restricciones apoyo en pines.

4.4 Simulación

El más grande problema que se debe enfrentar cuando se simula un elemento o componente, tiene mucho que ver con el criterio del que revisa los resultados. **UNA SIMULACIÓN EXCITOSA NO INDICA OTRA COSA MAS QUE EL PROBLEMA PLANTEADO SE PUEDE RESOLVER, NO SE DEBE CONFUNDIR CON QUE ESA SOLUCION ASEMEJE LA REALIDAD.** Para poder asegurar esta respuesta hace falta el criterio resultado de un estudio del funcionamiento de lo que se está simulando, con todo lo desarrollado anteriormente se puede confirmar que las condiciones aplicadas a la simulación son bastante próximas o similares a las que debería manejar el encofrado.

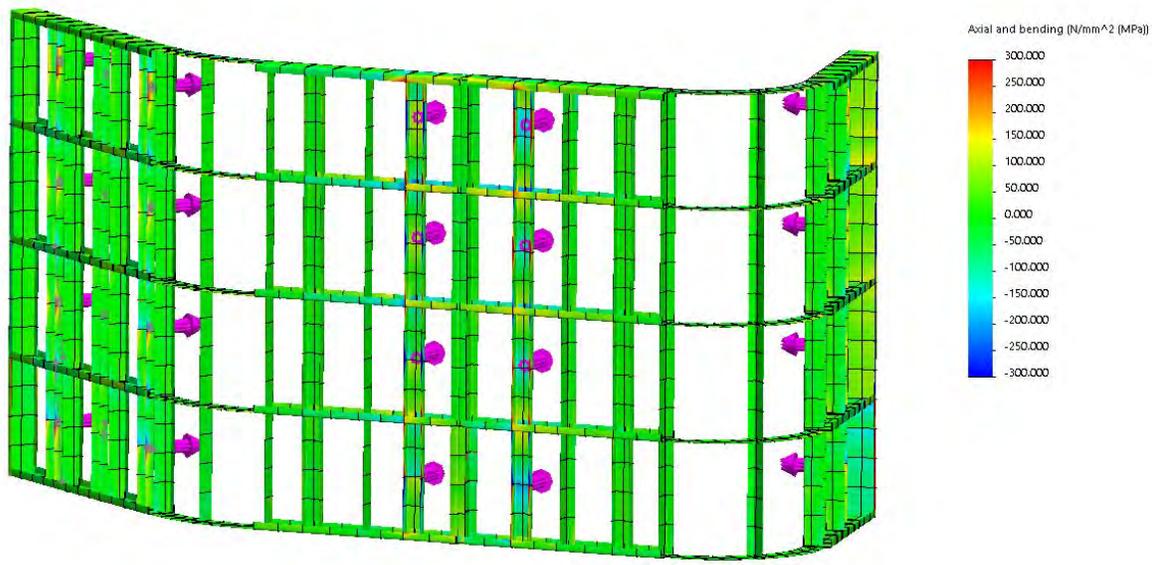


Figura 4-10: Simulación 1 Esfuerzo Máximo en costillas/refuerzos.

Se puede apreciar que en general que la estructura del encofrado no sufre mucho bajo las cargas especificadas, los valores más extremos se presentan cerca de la zona de los tirantes.

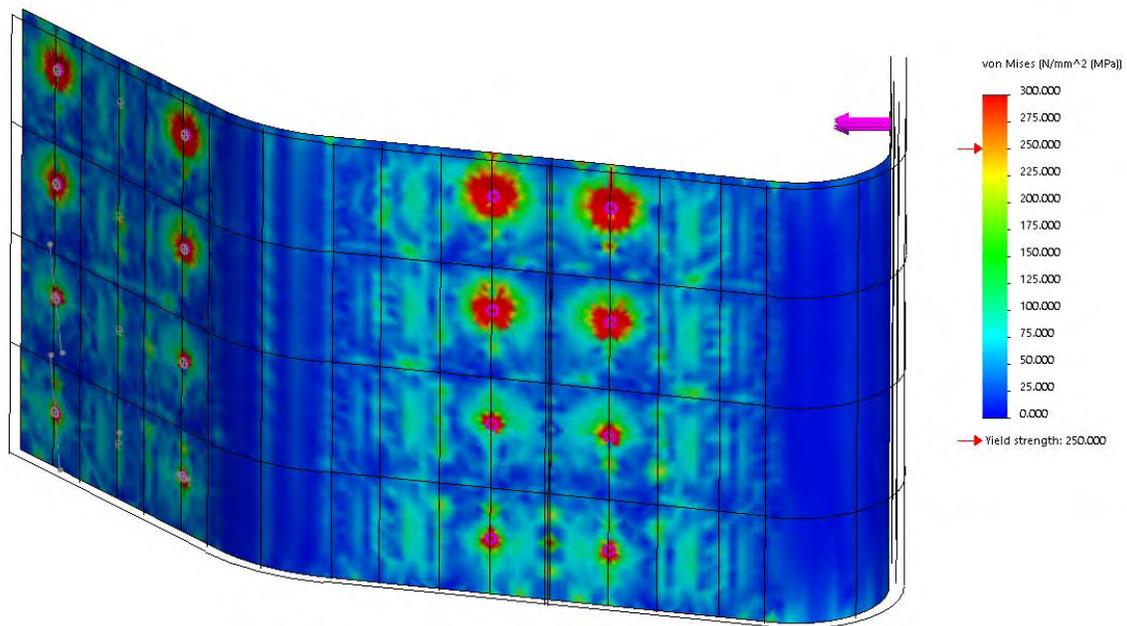


Figura 4-11: Diagrama de Esfuerzo Equivalente en la lámina del encofrado 2.4 m altura.

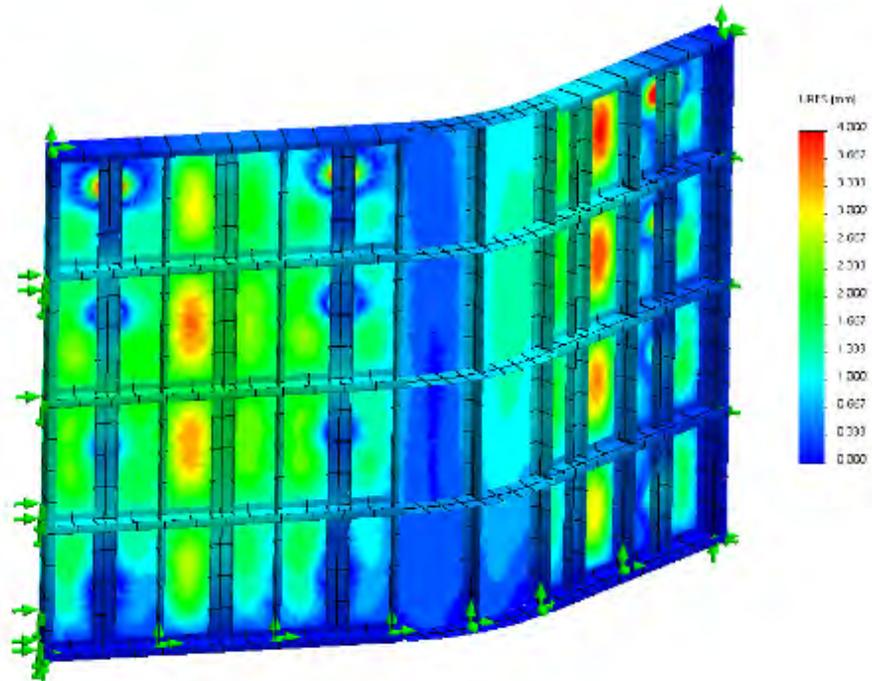


Figura 4-12: Diagrama de deformaciones resultantes encofrado 2.4 m altura.

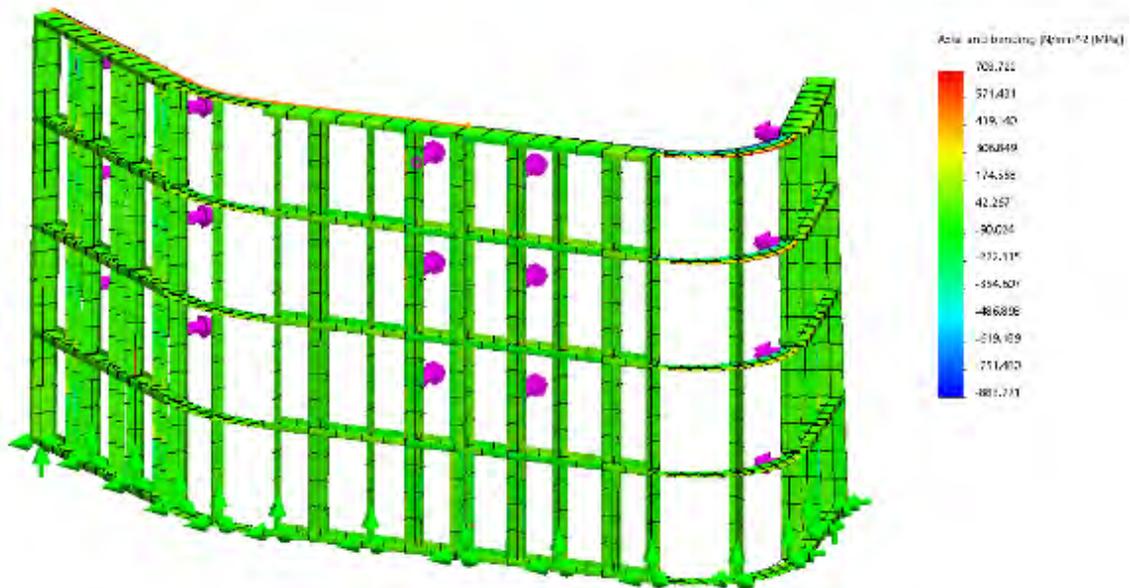


Figura 4-13: Diagrama de Esfuerzo máximo en vigas.

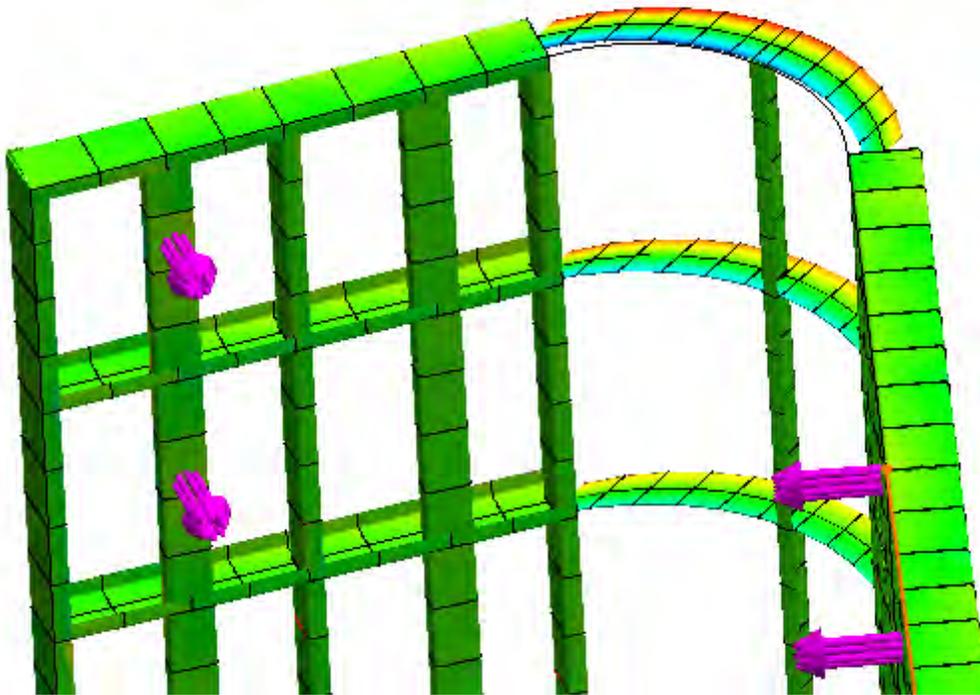


Figura 4-14: Acercamiento esquina triangulo exterior.

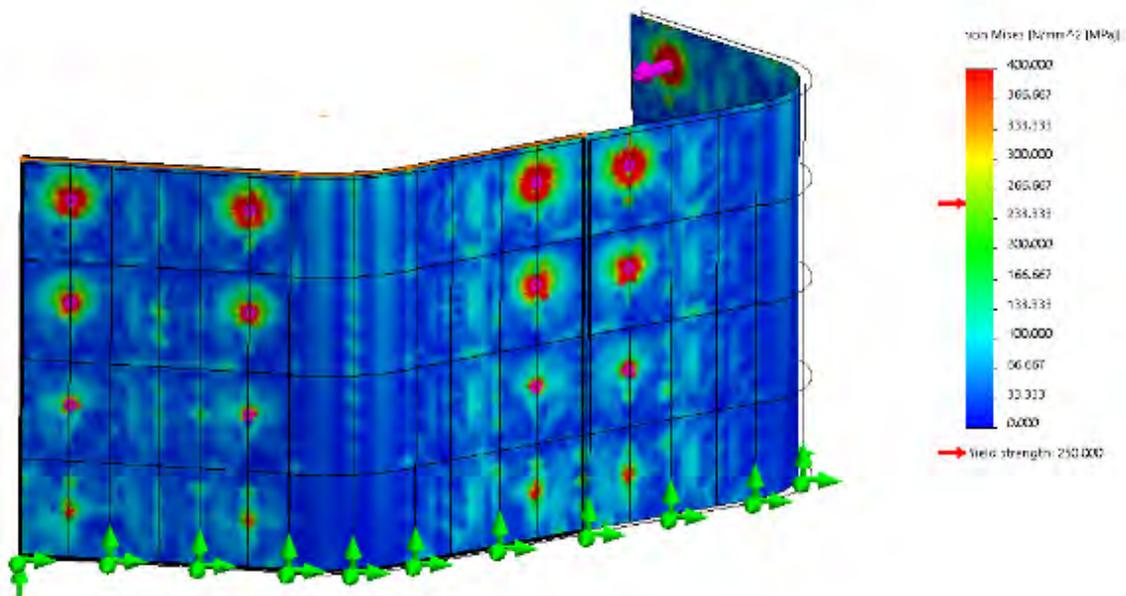


Figura 4-15: Diagrama de esfuerzos equivalentes en lámina.

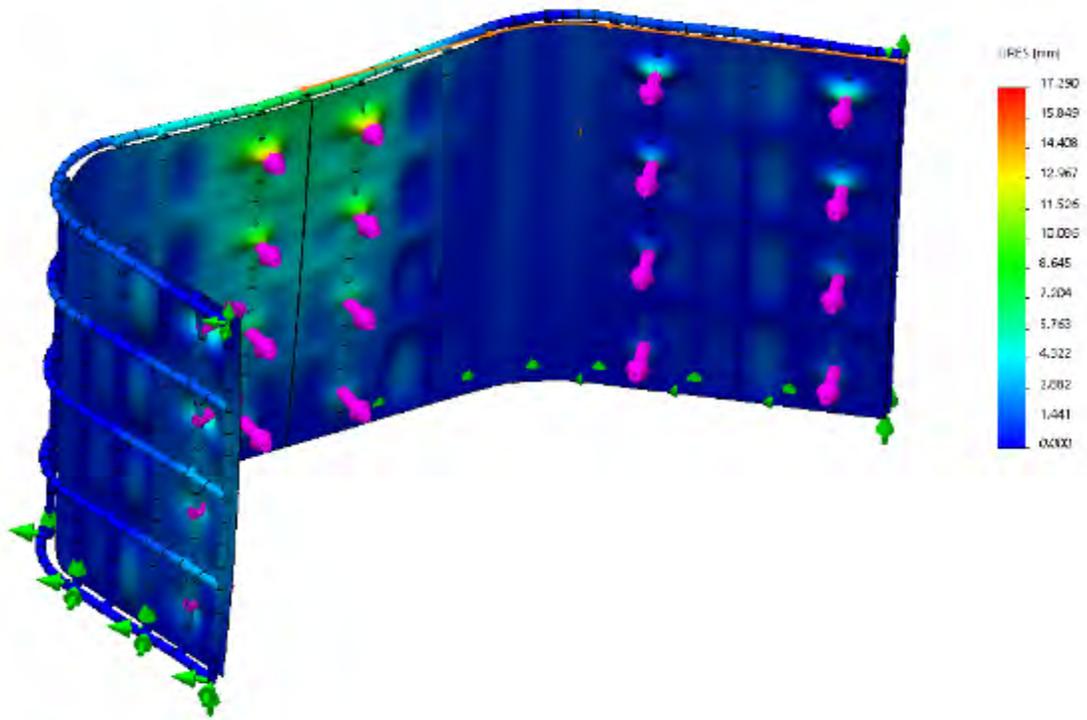


Figura 4-16: Diagrama de deformaciones resultantes.

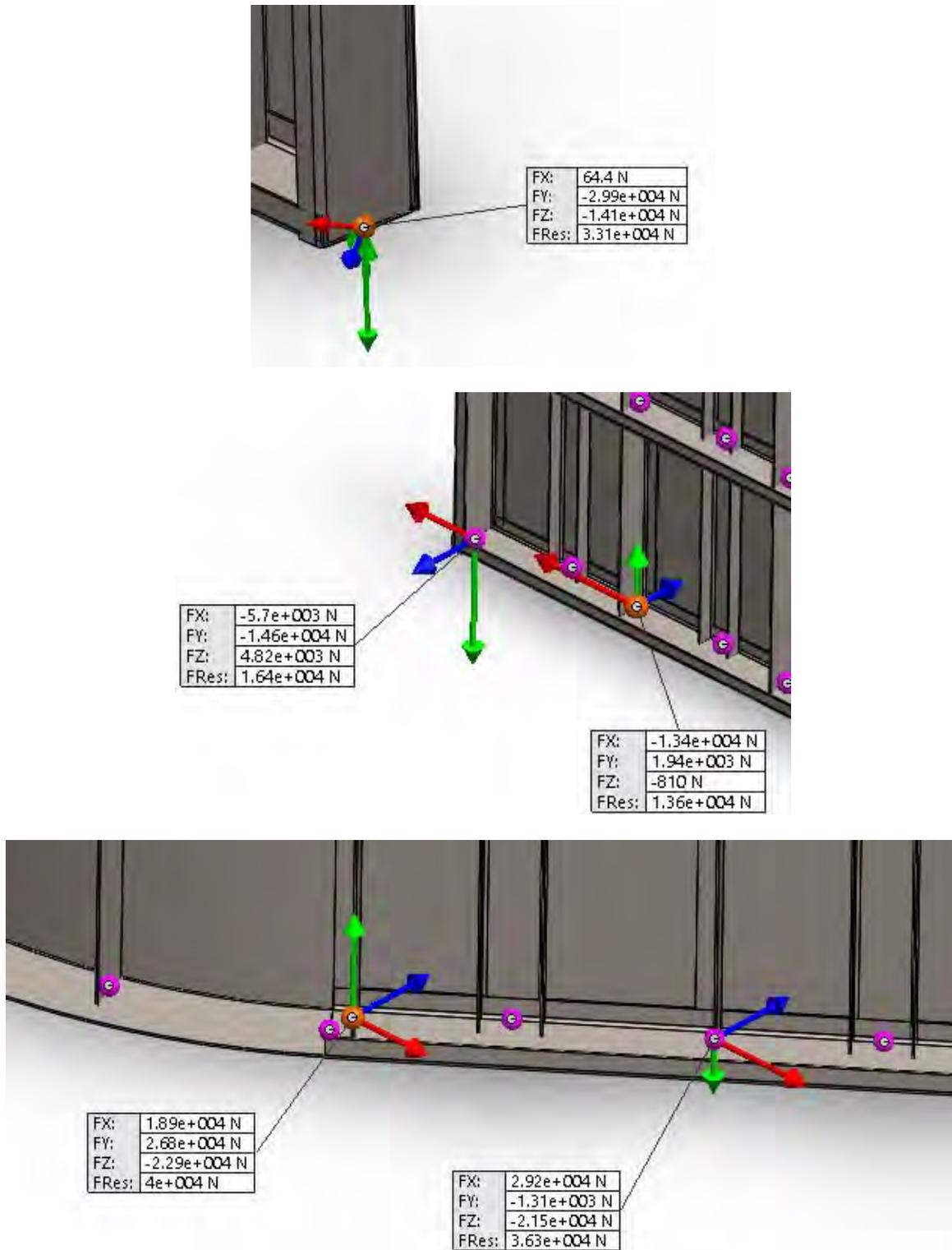


Figura 4-17: Fuerzas resultantes en apoyos.

De la figura 5-17. Se puede concluir que la fuerza mayor requerida en los apoyos es de 4 kN. Con lo que se puede seleccionar los pernos que sujetarán los anillos a los encofrados. Siendo que la fuerza que limitaría las dimensiones del perno de 4 kN en cortante, se seleccionará el perno en base a fuerza cortante.

Specification	AS 1111 AS 2451		AS 1110 Prop. Cl. 8.8 AS 2465 Grade 5			AS 1110 Prop. Cl 10.9 AS 2465 Grade 8		
Size	Minimum Breaking Load in Single Shear – kN ^{1 2}							
	Shank ³		Thread		Shank ³		Thread	
				Coarse	Fine		Coarse	Fine
M6	7	4	14	9		18	12	
1/4"	9	5	16	9	11	20	11	14
M8	13	8	25	16		33	21	
5/16"	13	8	26	15	17	32	19	22
3/8"	19	12	37	23	27	46	28	34
M10	20	13	39	26		51	34	
7/16"	26	16	50	31	36	63	39	45
M12	28	19	57	38		74	50	
1/2"	34	21	65	42	50	82	52	62

Figura 4-18: Tabla de capacidad de corte para pernos.¹

Se puede verificar en la tabla 5-18 que un perno M6 grado 5 u grado 8 podría cumplir con el requerimiento. Sin embargo, teniendo en cuenta que durante el uso del encofrado estos pernos se ajustarán y aflojarán bastantes veces, se prefiere un perno de mayor diámetro, que a su vez permita un mayor torque de apriete. Además se debe tener en cuenta que cada perno que se aisle durante la etapa de operación resultará en tiempos muertos que podrían afectar a la efectividad del sistema.

Especificación de pernos: 5/16" grado 8.

¹ Tabla de capacidades de corte para pernos, Black Fasteners

Capítulo 5

Análisis económico

Con el fin de poder asegurar que la solución que se plantea en este estudio sea en realidad aplicable se requiere realizar un análisis económico de la fabricación del sistema y de su utilización, teniendo en cuenta la mano de obra que interviene y los tiempos que representaría el ensamblaje del sistema. Y a su vez compararlos con la alternativa de fabricación más económica y común: madera.

5.1 Costo de fabricación

Con la ayuda del *software* SolidWorks se puede obtener un alista de corte y procesos de fabricación bastante completa, lo cual ayuda en gran medida a iniciar el costeo de un elemento a fabricar.

Los datos que se puede obtener en un *CutList* dentro de *SolidWorks* (teniendo en cuenta que toda la fabricación se realiza en láminas deformadas) son los siguientes:

Número de Ítem, Descripción, Cantidad, Espesor de Lámina, Área de un rectángulo que engloba la pieza desplegada, perímetro de corte externo, perímetro de corte interno, número de cortes internos, número de pliegues. Además se puede crear una tabla de soldaduras, donde se especifica las dimensiones de los cordones y la longitud de estos.

En el caso de que el diseño incluya perfiles laminados (tubos, I, H, HEB, W, etc.) se debería incluir en la lista longitud de corte. Con los datos anteriormente mencionados una vez exportados a una hoja de MS Excel y con las especificaciones de la maquinaria se puede estimar, costos de materiales, costos de corte, fabricación y tiempos de fabricación y mano de obra.

5.2 Materiales

Para estimar los costos de materia prima se necesita conocer los precios del material. En general en todo el diseño se emplea dos tipos espesores de plancha 2mm y 4mm

Material	Espesor (mm)	Peso (kg)	Costo (USD)	Costo/kg (USD/kg)
----------	-----------------	--------------	----------------	----------------------

Plancha Acero A36 2.44m x 1.22m	2	46.74	45.80	0.98
Plancha Acero A36 2.44m x 1.22m	4	93.47	88.50	0.947

Se puede aproximar el costo del acero (materia prima) entre 1 USD/kg para planchas.

Un factor importante para considerar en los costos es el de los retazos que quedan del proceso de manufactura.

El costo del acero como chatarra es de 0.27 USD/kg

5.3 Costeo del proceso de plegado / deformación plástica

De la misma forma con las especificaciones de la máquina plegadora se puede estimar en una buena medida del costo de operación de la máquina.

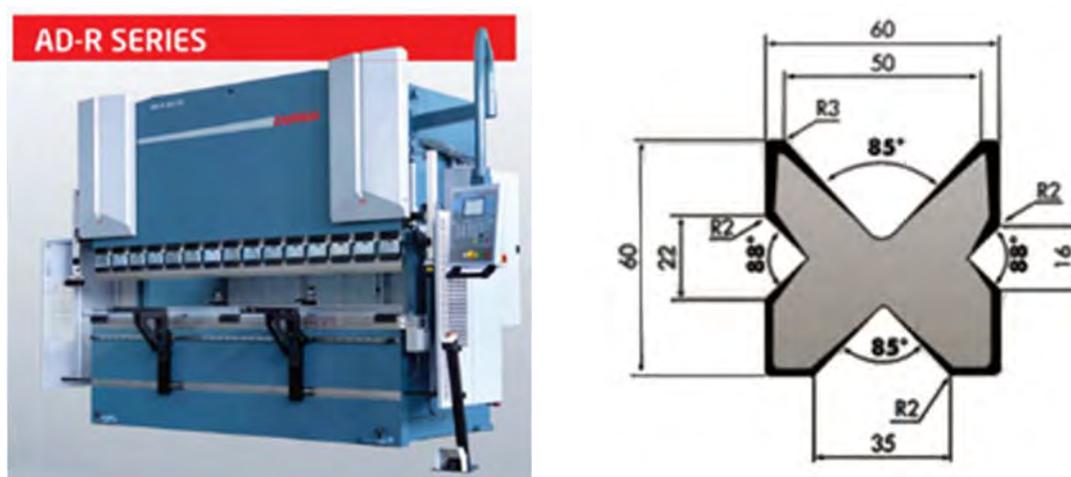


Figura 5-1: Datos de máquina plegadora.

Tabla 5-1: Especificaciones de plegadora.

AD-R Series	Unidades	
Fuerza de plegado	ton	175
Longitud de plegado	mm	3050
Y velocidad movimientos rápidos	mm/seg	120
Y velocidad de trabajo	mm/seg	10
Y velocidad de retorno	mm/seg	100
Recorrido	mm	265
Profundidad garganta	mm	410
Eje X velocidad	mm/seg	250
Eje X recorrido	mm	650
Potencia del motor	kW	18.5
Peso aproximado	kg	11250

Para poder estimar un costo de utilización de esta máquina es importante aproximar el tiempo que toma un ciclo de pliegue.

Los topes (Eje X) hasta lograr su ubicación se tomará un tiempo de máximo:

$$\frac{\text{Recorrido}}{\text{Velocidad}} = \frac{650\text{mm}}{250\text{ mm/seg}} = 2.6\text{ seg}$$

El tiempo que se toma la maquina en bajar y regresar la hoja será de:

$$\frac{\text{Recorrido}}{\text{Veloc trabajo}} + \frac{\text{Recorrido}}{\text{Veloc retorno}} = \frac{265\text{mm}}{10\text{mm/seg}} + \frac{265\text{mm}}{100\text{mm/seg}} = 29.15\text{ seg.}$$

A este tiempo se le debe aumentar los tiempos de las tareas que debe realizar el operario.

Tiempo para ubicar los topes a lo largo del ancho de la máquina: aproximadamente 30 seg

Tiempo para ubicar la pieza: aproximadamente 30 seg

Tiempo total de un ciclo de pliegue: $2.6\text{ seg} + 29.15\text{ seg} + 30\text{ seg} + 30\text{ seg} = 1.5\text{ min}$

Tiempo para programar el pliegue (solo se realizaría una vez para una serie de pliegues iguales): 1 min

Teniendo en cuenta el costo del Equipo: 50.000 USD con un tiempo de reposición de 2 años.

Y que la capacidad práctica de la máquina son: 7 horas 5 días a la semana = 140 horas al mes

Se puede aproximar un costo de uso de la máquina de:

$$\frac{50000\text{ USD}}{2\text{ años}} * \frac{1\text{ año}}{12\text{ meses}} * \frac{1\text{ mes}}{140\text{ horas}} = 14.88\text{ USD/hora}$$

Además se debe considerar el tiempo de trabajo del operario con la máquina que se añadiría al valor anterior.

Salario de un operario de máquina herramienta CNC: 540 USD mensual con 8 horas/día 160 horas al mes,

$$\frac{540\text{ USD}}{\text{mes}} * \frac{1\text{ mes}}{160\text{ horas}} = 3.375\text{ USD/hora}$$

Si se aumenta el costo de la energía eléctrica de 0.08 USD/kWh

$$18.5\text{ kW} * \frac{0.08\text{ USD}}{\text{kWh}} = 1.5\text{ USD/hora}$$

El costo total de funcionamiento de la máquina será de:

$$14.88 \text{ USD/hora} + 3.375 \text{ USD/hora} + 1.5 \text{ USD/hora} = 19.755 \text{ USD/hora}$$

Por lo tanto el costo de un ciclo de trabajo (1 pliegue): 0.494 USD

Costo de programación: 0.329 USD.

*Este valor es solo el costo que implica realizar un pliegue con la máquina, posteriormente se considerará la utilidad de la planta y gastos operativos

5.4 Costeo del proceso de corte por plasma



Figura 5-2: Corte con plasma

Teniendo en cuenta un proceso de corte en *plasma* se puede estimar los tiempos y costos de corte del material con las tablas de corte del equipo de plasma *CutCharts*.

Metric

Material Thickness	Torch-to-Work Distance	Initial Pierce Height		Pierce Delay Time	Best Quality Settings		Production Settings	
		mm	%		seconds	Cut Speed	Voltage	Cut Speed
0.5	1.5	3.8	250	0.0	9000	128	12500	126
1					9000	128	10800	128
1.5					9000	130	10200	129
2					6600	130	7800	129
3					3850	133	4900	131
4							2200	134
6					1350	137	2050	132

Figura 5-3: Hypertherm Duramax retrofit torch cut charts for 45 Amp Consumables.

Metric

Material Thickness	Torch-to-Work Distance	Initial Pierce Height		Pierce Delay Time	Best Quality Settings		Production Settings		
					Cut Speed	Voltage	Cut Speed	Voltage	
mm	mm	mm	%	seconds	mm/min	Volts	mm/min	Volts	
3	1.5	3.8	250	0.1	6800	122	9200	120	
4				0.2	5650	122	7300	122	
6				0.5	3600	123	4400	125	
8					2500	125	3100	127	
10					1680	127	2070	128	
12		4.5	300	0.7	1280	130	1600	130	
16				1.0	870	134	930	133	
20		6.0	400	1.5	570	137	680	136	
25		Edge Start				350	142	450	141
30		Edge Start				200	146	300	144

Figura 5-4 Hypertherm Duramax retrofit torch cut charts for 85 Amp Consumables.¹

Con las tablas anteriores se puede aproximar en una gran medida cuanto tiempo se requiere para realizar los cortes de las piezas, cabe aclarar que se debería estimar también el tiempo que se requiere para configurar las máquinas y ubicar las planchas en la mesa de corte.

Para poder estimar el costo de utilización de esta máquina es importante reconocer los amperajes y juegos de consumibles requeridos para cada tipo de corte según los espesores.

Tabla 5-2: Costo de operación del plasma.

Factor de potencia	0.85					
Voltaje de operación	160	V				
Costo de la energía	0.1	USD/KW.H				
Consumo eléctrico						
Espeor	Amperios	Vel (mm/min)	Piercing(seg)	Potencia(kW)	Costo/hora	
<1mm	40	8250	0	5.44	0.544	
1mm	45	8250	0.2	6.12	0.612	
1.5mm	45	6400	0.4	6.12	0.612	
2mm	45	4800	0.4	6.12	0.612	
3mm	45	2750	0.5	6.12	0.612	
4mm	45	1900	0.6	6.12	0.612	
6mm	60	1800	1	8.16	0.816	
Consumibles						
Costo del set:	83					
Duración:	10	horas/arco	8.30	USD/hora		
Maquinaria						
Costo maquina	60000	/5 años	6.25	USD/hora		

¹ Hypertherm PowerMAX 1650 Machine Side Reference Guide

Mano de obra operario

Costo operario	3.375	USD/hora
Costo fijo operación	17.925	USD/hora

De tal manera el costo de un corte de lámina se puede estimar a partir del perímetro de corte de la pieza y su espesor.

De tal manera el costo de corte de una pieza se estimará de la siguiente forma:

$$\left(\frac{\text{Perímetro}}{\text{velocidad de corte}} + \text{No de piercings} \right) \\ * (\text{Costo de hora segun espesor} + \text{Costo Fijo})$$

*Este valor es solo el costo que implica realizar un corte en plancha, posteriormente se considerará la utilidad de la planta y gastos operativos

5.5 Costeo del proceso de soldadura²

El proceso de construcción del encofrado incluye dos procesos de soldadura.

Armado: este proceso consiste en unir o ubicar lo suficientemente bien las piezas para lograr el ensamblaje deseado; en esta etapa se emplea la soldadura SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*).

Rematado: este proceso consiste en la soldadura de todos los cordones especificados en el diseño; este proceso debido a la longitud de los cordones requiere de una soldadura GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) específicamente con una soldadura tipo MIG (*Metal Inert Gas Welding*).

Debido a la longitud del electrodo resulta complicado crear cordones de soldadura de una longitud grande. Es importante tener en cuenta que el cordón de soldadura debe ser lo más uniforme posible, esto no se puede conseguir con facilidad si se tiene que soldar un mismo cordón en varios tramos con distintos electrodos) con una soldadora MIG al tener un carrete de material de aporte se puede crear cordones ininterrumpidos de mucha mayor dimensión, y al ser ininterrumpidos resulta ser mucho más uniforme.

Considerando que el proceso de soldadura SMAW se empleará solamente para armado de las estructuras se puede aproximar el costo del proceso de soldadura como si todo se soldaría con el proceso MIG pues su utilización será mucho mayor al 90% en la fabricación.

² ESAB Lesson 9. Estimating and comparing weld metal cost.

El costo de soldadura se puede dividir en dos partes:

Costos fijos independientes del proceso de soldadura, esto incluye preparación y manipulación de las piezas a soldar.

Costos de la deposición del material. Esta etapa si depende del proceso empleado para la soldadura.

Para calcular los dos costos mencionados anteriormente se requiere conocer o estimar los siguientes factores:

- Mano de obra, teniendo en cuenta que un soldador cuesta aproximadamente 4 USD/h
- Factor de operación (es el porcentaje de tiempo de una jornada de trabajo en la cual efectivamente el operador está soldando) se calcula como el tiempo de arco (tiempo real de soldadura) dividido para la duración de la jornada de trabajo del operario.

Tabla 5-3: Factores de operación aproximados.³

Proceso de Soldadura			
SMAW	+*GMAW	*FCAW	*SAW
30%	50%	45%	40%

*Solo semiautomáticas

+Incluye Alambres de núcleo metálico

- Tasa de deposición de material (cantidad de material depositado en una unidad de tiempo): esta tasa considera una operación continua.
- Eficiencia de deposición: es la relación entre el peso de metal depositado y el peso de electrodo o alambre consumido.
- Costo del electrodo, alambre, material de aporte y gases.
- Costo del consumo eléctrico

Se puede estimar que el costo del kWh está en el valor de 0.08 USD/kWh

³ ESAB Lesson 9. Estimating and comparing weld metal cost.

5.5.1. SMAW eficiencia de deposición

Tabla 5-4: Datos de deposición de electrodo E6011 SMAW.⁴

E6011			
Diámetro del electrodo (in)	Amperios	Tasa de deposición (kg/hora)	Eficiencia (%)
3/32	75	0.5889	61.0%
1/8	120	1.0419	70.7%
5/32	150	1.6761	77.0%
3/16	180	1.8573	73.4%
7/32	210	2.265	74.2%
1/4	250	2.5368	71.9%

Tabla 5-5: Datos de deposición de electrodo E6013 SMAW.⁵

E6013			
Diámetro del electrodo (in)	Amperios	Tasa de deposición (kg/hora)	Eficiencia (%)
3/32	85	0.7248	73.0%
1/8	125	0.9513	73.0%
5/32	140	1.1778	75.6%
	160	1.359	74.1%
	180	1.5855	71.2%
3/16	180	1.4496	73.9%
	200	1.7214	71.1%
	220	1.8573	72.9%
7/32	250	2.4009	71.3%
	270	2.5821	73.0%
	290	2.7633	72.7%

Es importante tener en cuenta que la eficiencia de deposición mostrada en las tablas 5-1 y 5-2 no considera la porción del electrodo que se pierde al cambiar de electrodo.

⁴ ESAB Lesson 9. Estimating and comparing weld metal cost.

⁵ Idem.

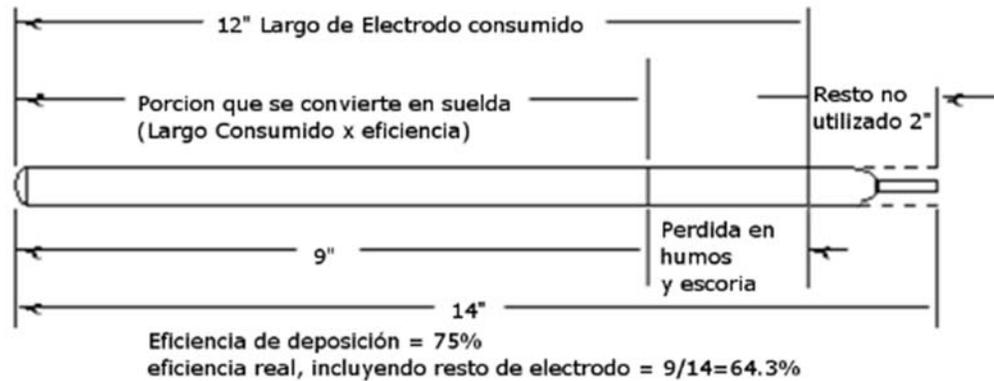


Figura 5-5: Eficiencia real de un electrodo SMAW.⁶

5.5.2. GMAW eficiencia de deposición

La eficiencia de deposición del alambre MIG es bastante elevada, sin embargo depende en gran medida del gas o mezcla de gases empleados.

Una soldadura con 100% de CO₂ puede resultar en una eficiencia de 93% mientras que una de 75% Ar - 25% CO₂ produce una eficiencia del 98%. Un factor que afecta fuertemente a esta decisión es el costo del gas, el CO₂ a pesar de ser menos eficiente es mucho más económico.

Además a diferencia de los electrodos en la soldadura GMAW no hace falta considerar un resto de alambre pues es un rollo de alambre continuo en el cual el resto que puede quedar es muy poco en relación a todo el rollo.

Tabla 5-6: Datos de deposición de material de aporte para el proceso de soldadura MIG.⁷

GMAW alambre sólido		
Diámetro del alambre (mm)	Amperios	Tasa de deposición kg/h
		100%CO ₂
0.9	80	0.7
	120	1.1
	175	1.8
1.1	145	1.5
	165	1.8
	200	2.4

Tabla 5-7: Eficiencia de deposición GMAW para acero al carbono y de baja aleación.

⁶ ESAB Lesson 9. Estimating and comparing weld metal cost.

⁷ Lincoln Electric MIG wires superglide S3 AWS-ER70S-3 product info

Gas escudo	Rango de eficiencia	Eficiencia promedio
CO2 Puro	88-95%	93%
	94-98%	96%
98%Ar- 2%O2	97%- 98.5%	98%

5.5.3. Costos de electrodo/gas/alambre

Tabla 5-8: Flujo estimado de gas escudo en soldadura GMAW.⁸

Flujo de gas escudo GMAW	
Amperaje soldadura (A)	Flujo de gas (litros/min)
100-200	15-25
200-300	20-30
300-500	20-30

Teniendo en cuenta que el costo de una recarga de un tanque de CO₂ cuesta 23 USD los 20kg de gas y que la densidad del CO₂ en estado líquido es de 770kg/m³ se puede obtener un costo por litro de CO₂, considerando que una vez expulsado el gas del tanque su densidad cambia a 1.7845kg/m³ a presión atmosférica.

$$\frac{20kg}{1.7845kg/m^3} = 11.20m^3 = 11207L$$

Por lo tanto el costo por litro de CO₂ se puede estimar en:

$$\frac{23 USD}{11207 l} = 0.00205 USD/l$$

Considerando que la soldadura se realizará a un amperaje de 120 se puede estimar un flujo de 20 l/min operando a dicho amperaje.

De tal manera que el consumo por minuto de CO₂ será:

$$0.00205 \frac{USD}{l} * 20 \frac{l}{min} = 0.041 \frac{USD}{min} = 2.46 \frac{USD}{hora}$$

Un rollo de alambre MIG de 0.9mm de diámetro contiene 15kg de alambre a un costo de 29 USD.

Si estimamos un consumo de 1.1 kg/h utilizando un gas 100% CO₂ el costo del alambre utilizado resulta ser:

⁸ Essential factors in Gas Metal Arc Welding 4th Edition, KOBE STEEL, ltd, 2011 Japan

$$\frac{29USD}{15kg} * \frac{1.1kg}{h} = 2.126 \frac{USD}{h}$$

Pueda parecer complicado estimar el tiempo que tome realizar un cordón de soldadura, pero conociendo las dimensiones requeridas de cada cordón se puede estimar en gran medida el peso de soldadura requerida y con la relación de tasa de deposición se puede obtener un costo bastante real.

Es importante considerar la eficiencia de deposición mostrada en la tabla 5-4, se puede estimar que una eficiencia promedio de soldadura GMAW MIG con 100% CO₂ está alrededor del 93%.

Este factor deberá corregir las tasas de deposición y el costo de alambre depositado.

Tabla 5-9: Datos de deposición de material de aporte para el proceso de soldadura MIG considerando eficiencias.⁹

Gas Metal Arc Welding solid wires			
Diámetro alambre (mm)	Amperios	Tasa de deposición (kg/h)	
		100%CO2	Eficiencia 93%
0.9	80	0.7	0.651
	120	1.1	1.023
	175	1.8	1.674
1.1	145	1.5	1.395
	165	1.8	1.674
	200	2.4	2.232

Las tasas de deposición corregidas permiten estimar un tiempo de soldadura más acertado.

5.5.4. Costo de soldadura MIG

Partiendo de los datos presentados anteriormente se expone a continuación un detalle de los costos involucrados en el proceso de soldadura MIG.

Es importante tener en cuenta que la estimación de un costo parte de las medidas de los cordones de soldadura que exige el diseño se puede reducir a un perímetro de soldadura y al área del cordón para posteriormente poder calcular el peso de soldadura requerido y aproximar un tiempo de soldadura.

Costos fijos:

- Mano de Obra: 4 USD/h

Costos dependientes del proceso:

- Factor de operación: 50% (Tabla 5-1)

⁹ ESAB Lesson 9. Estimating and Comparing Weld Metal Cost.

- Tasa de deposición de material: 1.1 kg/h (Tabla 5-7)
- Eficiencia de deposición: 93% (Tabla 5-5)
- Costo del alambre: 26.36 USD/15kg
- Costo del gas 100% CO₂: 0.00205 USD/litro; 2.46 USD/hora
- Costo Consumibles: 35 USD /15kg alambre=1.16 USD/kg (punta de pistola, tobera, resorte, gel, entre otros, equipo de protección)
- Consumo eléctrico: 5 kW @ 0.1 USD/Kwh = 0.5 USD/h

Considerando que la masa de soldadura requerida ya es un dato “mw”

$$Tiempo\ de\ soldadura = \frac{mw}{1.1kg/h} * \frac{1}{93\%} * fact.\ operation = 1.955\ mw$$

$$Cantidad\ de\ alambre\ requerido = \frac{mw}{93\%}$$

Costo de soldadura

= *Costo alambre + costo Gas + consumibles + cons. electrico + Mano de obra*

$$= \frac{mw}{93\%} * \left(\frac{26.36\ USD}{15kg} + \frac{2.33\ USD}{kg} \right) + 1.955\ mw \left(\frac{2.46\ USD}{h} + \frac{4\ USD}{h} + \frac{0.5\ USD}{h} \right)$$

$$= mw(18.00\ USD/kg)$$

Asumiendo un área de cordón uniforme (sección uniforme del cordón) se puede convertir este costo a una medida más fácil de cuantificar: longitud de cordón de esta forma se puede facilitar un proceso de costeo posteriormente estimando las longitudes de cordón.

Suponiendo un cordón de filete de 5mx5mm en las uniones soldadas y una densidad del acero de 7850 kg/m³

$$Costo\ de\ soldadura = \frac{5mm \times 5mm}{2} * \frac{7850kg}{m^3} * mw \left(18.00 \frac{USD}{kg} \right)$$

$$= 1.766 \frac{USD}{m\ cordón\ (5x5)}$$

*Este valor es solo el costo que implica realizar un cordón de soldadura, posteriormente se considerará la utilidad de la planta y gastos operativos.

5.6 Costo de pintura

Para poder estimar un costo del proceso de pintura, se requiere conocer la superficie que se desea cubrir y el rendimiento de la pintura.

Costo de la pintura: 17.98 USD/galón

Rendimiento estimado para pintura: 32.52 m²/galón

Costo desengrasante: 11.76 USD/gal

Rendimiento del desengrasante: 150 m²/gal.

Considerando que el equipo de pintura es el siguiente:

GMAX 3400



Figura 5-6 Graco electrical airless sprayer 390

La capacidad máxima que puede bombear la pintura esta máquina es de 0.38 gpm por lo tanto se considera un flujo al 50% de capacidad de la máquina.

El costo de este quipo es de alrededor de 2200 USD

Su capacidad máxima es de 0.4 gpm

Por lo tanto el costo de consumo de pintura se puede calcular de la siguiente manera:

$$\frac{17.98 \text{ USD}}{\text{gal}} * \frac{\text{gal}}{32.52 \text{ m}^2} = 0.553 \text{ USD/m}^2$$

Por otro lado se debe calcular el costo de uso del equipo para una reposición de un año:

$$\frac{2200 \text{ USD}}{1 \text{ año}} * \frac{1 \text{ año}}{12 \text{ meses}} * \frac{1 \text{ mes}}{4 \text{ semanas}} * \frac{1 \text{ semana}}{7 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{8 \text{ horas}} = 0.818 \text{ USD/hora}$$

Y además considerando que este equipo trabaja con un flujo de 0.28gal/min, el costo de pintar se calcularía así teniendo en cuenta que el área a pintar es un dato conocido previamente.

$$\begin{aligned} \text{Área} * \left(\frac{0.553\text{USD}}{\text{m}^2} + \frac{\text{gal}}{32.52\text{m}^2} * \frac{\text{min}}{0.38\text{gal}} * \frac{1\text{hora}}{60\text{min}} * \left(\frac{0.818\text{USD}}{\text{hora}} + \frac{4\text{USD}}{\text{hora}} \right) \right) \\ = 0.56 \text{ USD/m}^2 \end{aligned}$$

Este valor representa una capa de pintura si se considera que el encofrado solo se recubrirá por fuera (elementos sin contacto con concreto) y que la pintura será solo un anticorrosivo o fondo podemos estimar que se dará dos capas de pintura al encofrado.

Por lo tanto el costo de pintura que se debe utilizar será

$$0.56 \times 2 = 1.12 \text{ USD/m}^2$$

Para medir la superficie se puede aprovechar una de las herramientas del software *SolidWorks* “*Measure*”

5.7 Costo de fabricación del encofrado.

Considerando que se construirá dos niveles completos de encofrado interno y externo a continuación se presentan cálculos de una parte del encofrado interno, uno de los triángulos internos (figura 5.7), es importante reconocer que se debe conseguir estimar un costo de fabricación en relación al peso del elemento, con el fin de acelerar el proceso de costeo de todos los componentes. Es por eso que a continuación solo se estudia los costos de fabricación de uno de los elementos del sistema para posteriormente partiendo de la relación de costo de fabricación se pueda estimar el costo de fabricación de todo el sistema.

5.7.1. Costo de fabricación de elementos del encofrado triangular

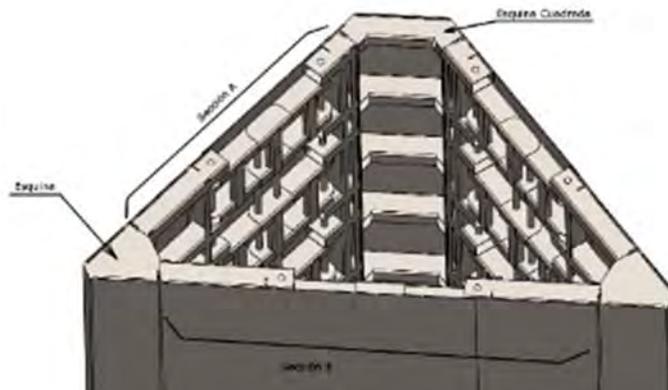


Figura 5-7: Esquema de componentes para costos de fabricación.

Resumiendo los análisis de costos de fabricación presentados anteriormente se presenta los valores de costos empleados en el análisis posterior.

Tabla 5-10: Costos de material.

Espesor	Costo	Costo/mm2	Peso (kg)	Costo/Kg
2mm	\$ 45.80	1.9E-05	46.74	\$ 0.98
4mm	\$ 88.50	3.7E-05	93.47	\$ 0.95

Tabla 5-11: Costos corte plasma.

Espesor	Amperios	Velocidad (mm/min)	Piercing (seg)	Costo Fijo/h	Costo Variable /h	Costo / hora	Costo / min
2	45	4800	0.4	\$ 17.93	\$ 0.61	\$ 18.54	\$ 0.31
4	45	1900	0.6	\$ 17.93	\$ 0.61	\$ 18.54	\$ 0.31

Tabla 5-12: Costos plegado/deformación plástica.

Plegado	0.5	USD/pliegue
Programación	0.35	USD/Pliegue una vez/serie

Tabla 5-13: Costos de soldadura MIG/GMAW.

Especificación	Diámetro	Costo/kg
Alambre sólido 100%CO2	0.9mm	\$ 18.00 USD/kg de suelda

Tabla 5-14: Costos de pintura.

Especificación	Diámetro	Costo/kg
Alambre sólido 100%CO2	0.9mm	\$ 18.00 USD/kg de suelda

ITEM	Cant	Descripción	Espesor lámina	Área rectangular (mm2)	Área utilizada (mm2)	Corte perímetro exterior	Corte perímetro interior	No cortes	No de pliegues	Costo material	Vel corte	Tiempo piercing	Tiempo corte (min)	Costo corte	Costo plegado	Chatararra
Triángulo SecciónA			8	und												
1	8	CostillaHA	4	106390.68	101538.68	1710.87	94.25	1	2	252.13	1900	4.8	368.00	113.69	64.35	0.329
2	8	Costilla H2	4	108780.08	103862.08	1726.87	94.25	1	2	257.80	1900	4.8	368.54	113.86	64.35	0.334
3	1	Lámina A	4	3643398.6	3633754.9	9554.01	0	0	1	1079.30	1900	4.8	40.23	12.43	4.35	0.654
4	1	LáminaB	4	1692198.6	1682554.9	7928.01	0	0	1	501.29	1900	4.8	33.38	10.31	4.35	0.654
5	32	Arms	4	72649.02	63571.83	1165.87	188.5	2	2	688.68	1900	4.8	2640.08	815.65	256.35	0.616
6	2	ArmLink	4	36143.09	28864.29	866.93	109.96	1	2	21.41	1900	4.8	85.03	26.27	16.35	0.494
7	4	Sheet	4	36143.09	29826.41	866.93	0	0	2	42.83	1900	4.8	14.60	4.51	32.35	0.428
8	2	ArmLinkC	4	36143.09	28864.29	866.93	109.96	1	2	21.41	1900	4.8	85.03	26.27	16.35	0.494
9	8	Sheet	4	106390.68	101538.68	1710.87	94.25	1	3	252.13	1900	4.8	368.00	113.69	96.35	0.329
10	8	CostillaHD	4	108780.08	103862.08	1726.87	94.25	1	2	257.80	1900	4.8	368.54	113.86	64.35	0.334
11	16	Link	4	28330.65	25992.87	652.04	188.5	2	1	134.28	1900	4.8	1285.43	397.13	64.35	0.159
12	4	Sheet	4	43620.41	33965.08	922.93	0	0	2	51.69	1900	4.8	15.54	4.80	32.35	0.655
13	1	Sheet	4	421117.16	388520.5	7183.97	0	0	2	124.75	1900	4.8	30.25	9.35	8.35	2.211
14	1	CostillaVB	4	421117.16	388520.5	7183.97	0	0	2	124.75	1900	4.8	30.25	9.35	8.35	2.211
15	1	CostillaVC	4	430717.16	398120.5	7191.97	0	0	2	127.59	1900	4.8	30.28	9.36	8.35	2.211
16	1	CostillaVD	4	430717.16	398120.5	7191.97	0	0	2	127.59	1900	4.8	30.28	9.36	8.35	2.211
										\$ 4,065.43				\$ 1,789.89	\$ 749.60	\$ -14.32

ITE M NO.	Can t	Descripció n	Espeso r lámina	Área rectangula r (mm2)	Área utilizada (mm2)	Corte perímetr o exterior	Corte perímetr o interior	No corte s	No de pliegue s	Costo material	Vel corte	Tiempo piercin g	Tiempo corte (min)	Costo corte	Costo plegado	Desperdicio
Triángulo SecciónB			4	und												
1	8	CostillaHA	4	106390.68	101538.68	1710.87	94.25	1	2	126.07	1900	2.4	107.20	33.12	32.35	0.165
2	8	Costilla H2	4	108780.08	103862.08	1726.87	94.25	1	2	128.90	1900	4.8	184.27	56.93	32.35	0.167
3	1	Lámina A	4	3643398.6	3631491.7	9488.41	0	0	1	539.65	1900	4.8	19.98	6.17	2.35	0.404
4	1	LáminaB	4	1692198.6	1680291.7	7862.41	0	0	1	250.64	1900	4.8	16.55	5.11	2.35	0.404
5	32	Arms	4	72649.02	63571.83	1165.87	188.5	2	2	344.34	1900	4.8	1320.04	407.83	128.35	0.308
6	2	ArmLink	4	36143.09	28864.29	866.93	109.96	1	2	10.71	1900	4.8	42.51	13.13	8.35	0.247
7	4	Sheet	4	36143.09	29826.41	866.93	0	0	2	21.41	1900	4.8	7.30	2.26	16.35	0.214
8	2	ArmLinkC	4	36143.09	28864.29	866.93	109.96	1	2	10.71	1900	4.8	42.51	13.13	8.35	0.247
9	8	Sheet	4	106390.68	101538.68	1710.87	94.25	1	3	126.07	1900	4.8	184.00	56.85	48.35	0.165
10	8	CostillaHD	4	108780.08	103862.08	1726.87	94.25	1	2	128.90	1900	4.8	184.27	56.93	32.35	0.167
11	16	Link	4	28330.65	25992.87	652.04	188.5	2	1	67.14	1900	4.8	642.71	198.57	32.35	0.079
12	4	Sheet	4	43620.41	33965.08	922.93	0	0	2	25.84	1900	4.8	7.77	2.40	16.35	0.327
13	1	Sheet	4	421117.16	388520.5	7183.97	0	0	1	62.37	1900	4.8	15.12	4.67	2.35	1.105
14	1	CostillaVB	4	421117.16	388520.5	7183.97	0	0	2	62.37	1900	4.8	15.12	4.67	4.35	1.105
15	1	CostillaVC	4	430717.16	398120.5	7191.97	0	0	2	63.80	1900	4.8	15.14	4.68	4.35	1.105
16	1	CostillaVD	4	430717.16	398120.5	7191.97	0	0	2	63.80	1900	4.8	15.14	4.68	4.35	1.105
										\$				\$	\$	\$
										2,032.71				871.13	375.60	7.31

ITEM NO.	Cant	Descripción	Espesor lámina	Área rectangular (mm2)	Área utilizada (mm2)	Corte perímetro exterior	Corte perímetro interior	No cortes	No de pliegues	Costo material	Vel corte	Tiempo piercing	Tiempo corte (min)	Costo corte	Costo plegado	Desperdicio
Esquina Cuadrada			4	und												
1	1	Lámina	4	1566130.2	1566130.2	6105.11	0	0	2	231.97	1900	4.8	12.85	3.97	4.35	0.000
2	12	CostillaH	4	106530.47	83971.94	1517.64	0	0	2	189.35	1900	4.8	38.34	11.85	48.35	0.765
3	1	CostillaVA	4	488317.16	403997.31	6619.86	317.95	5	2	72.33	1900	4.8	110.61	34.17	4.35	2.859
4	1	CostillaVB	4	488317.16	403997.31	6619.86	317.95	5	2	72.33	1900	4.8	110.61	34.17	4.35	2.859
										\$ 565.97				\$ 84.16	\$ 61.40	\$ 6.48

ITEM NO.	Cant	Descripción	Espesor lámina	Área rectangular (mm2)	Área utilizada (mm2)	Corte perímetro exterior	Corte perímetro interior	No cortes	No de pliegues	Costo material	Vel corte	Tiempo piercing	Tiempo corte (min)	Costo corte	Costo plegado	Desperdicio
Esquina			8	und												
1	2	Lámina	4	818442.71	818442.71	5482.04	0	0	1	484.90	1900	4.8	46.16	14.26	8.35	0.000
2	12	Costilla	4	124666.47	89681.01	1265.83	0	0	2	443.17	1900	4.8	63.96	19.76	96.35	2.373
3	2	CostillaV	4	364158.58	359116.33	6348.47	0	0	1	215.75	1900	4.8	53.46	16.52	8.35	0.342
Ejes	12	30mm								240.00				10.00	0.00	0.00
										\$ 1,383.82				\$ 60.54	\$ 113.05	\$ 2.71

5.7.2. Costos de soldadura

Triángulo Sección A	8	UND
----------------------------	----------	------------

Item no.	Tamaño cordon	Simbolo	Especificacion del cordon	Material soldado	Longitud (m)	Masa cordon (kg)	Costo soldadura
1	4		27X40(200){360}	Steel	1.08	0.068	\$ 1.93
2	4		24X40(150){120}	Steel	0.96	0.060	\$ 1.72
3	4		32X40(150){80}	Steel	1.28	0.080	\$ 2.29
4	4		16X40(100){80}	Steel	0.64	0.040	\$ 1.14
							\$ 7.08
Total							\$ 56.64

Esquina Cuadrada	4	UND
-------------------------	----------	------------

Item no.	Tamaño cordon	Simbolo	Especificacion del cordon	Material soldado	Longitud (m)	Masa cordon (kg)	Costo soldadura
1	4		18X40(100){120}	Steel	0.72	0.045	\$ 1.29
2	4		14X40(300){280}	Steel	0.56	0.035	\$ 1.00
3	4		42X40(150){120}	Steel	1.68	0.106	\$ 3.00
							\$ 5.29
Total							\$ 21.17

Esquina	8 UND
----------------	--------------

Item no.	Tamaño cordon	Simbolo	Especificacion del cordon	Material soldado	Longitud (m)	Masa cordon (kg)	Costo soldadura
1	4		26X40(150){80}	Steel	1.04	0.065	\$ 1.86
2	4		8X40(300){320}	Steel	0.32	0.020	\$ 0.57
							\$ 2.43
Total							\$ 19.45

Triangulo Sección B	4 UND
----------------------------	--------------

Item no.	Tamaño cordon	Simbolo	Especificacion del cordon	Material soldado	Longitud (m)	Masa cordon (kg)	Costo soldadura
1	4		36X40(200){360}	Steel	1.44	0.090	\$ 2.57
2	4		189X40(120){120}	Steel	7.56	0.475	\$ 13.52
3	4		64X30(150){120}	Steel	1.92	0.121	\$ 3.43
4	4		24.4x16	Steel	0.3904	0.025	\$ 0.70
5	4		26.4x16	Steel	0.4224	0.027	\$ 0.76
6	4		50x16	Steel	0.8	0.050	\$ 1.43
7	4		74.4x3	Steel	0.2232	0.014	\$ 0.40
8	4		16.4x1	Steel	0.0164	0.001	\$ 0.03
9	4		20.4x31	Steel	0.6324	0.040	\$ 1.13
10	4		16X40(250){320}	Steel	0.64	0.040	\$ 1.14
							\$ 25.11
Total							\$ 100.44

5.7.3. Estimación del costo de procesamiento de material o fabricación.

De los cálculos presentados en las tablas anteriores se puede obtener el costo de fabricación del elemento completo

Tabla 5-15: Costos de fabricación de encofrado triangular.

Fabricación Elementos	(ya considera cantidades)										
	Costo material	Costo corte	Costo plegado	Soldadura	Superficie (m2)	Pintura	Desperdicio	Peso* (kg)	Cantidad	Costo	Costo/Kg
Triángulo sección A	\$ 4,065.43	\$ 1,789.89	\$ 749.60	\$ 56.64	19.21	\$ 172.12	\$ -14.32	368.398	8	\$ 6,838.57	\$ 2.32
Triángulo sección B	\$ 2,032.71	\$ 871.13	\$ 375.60	\$ 100.44	26.76	\$ 119.88	\$ -7.31	410.355	4	\$ 3,519.22	\$ 2.14
Esquina cuadrada	\$ 565.97	\$ 84.16	\$ 61.40	\$ 21.17	6.95	\$ 31.14	\$ -6.48	107.000	4	\$ 764.31	\$ 1.79
Esquina	\$ 1,383.82	\$ 60.54	\$ 113.05	\$ 19.45	7.05	\$ 63.14	\$ -2.71	108.459	8	\$ 1,644.33	\$ 1.90
								5884.276		\$ 12,766.43	\$ 2.17

*Solo la columna de peso no considera cantidades.

El costo calculado en la tabla 5-12, hace referencia a los costos directos de fabricación, hace falta estimar los costos indirectos y la utilidad, que en realidad dependerán en gran parte de la empresa encargada de la construcción del sistema. Pero se puede estimar que la utilidad debería estar considerada entre un 20% y 30% del costo de fabricación. Y que los gastos indirectos deberían estar alrededor de 15-20% del costo de fabricación.

Incrementando estos valores al costo por kilogramo de material se obtiene un precio completo de fabricación.

$$2.17USD * (100\% + 25\% + 15\%) = 3.03 USD/kg$$

Conociendo el valor del kilogramo de acero procesado se puede aproximar con muy buena exactitud el costo de fabricación del sistema completo, para eso es importante conocer los pesos que representa cada componente.

Teniendo en cuenta el procedimiento indicado en el capítulo 3, se puede estimar un costo del sistema a partir de los pesos de las cantidades requeridas de cada componente.

Tabla 5-16: Costo estimado de fabricación del sistema metálico.

	Peso (ton)	Cantidad	Peso total (kg)	Costo
Plataforma	1.26	2	2.52	\$ 7,654.29
Anillo	0.58	3	1.74	\$ 5,285.11
Anillo cuadrado	0.46	3	1.38	\$ 4,191.64
Anillo triangulo	0.38	6	2.28	\$ 6,925.31
Encofrado cuadrado	1.29	1	1.29	\$ 3,918.27
Encofrado triangulo	1.19	2	2.38	\$ 7,229.05
Encofrado ext	1.93	1	1.93	\$ 5,862.22
			13.52	\$ 41,065.88

Una ventaja muy pequeña que tiene el uso de acero es que al final del proyecto se recupera una porción de la inversión al vender el sistema como chatarra a diferencia de crear basura en el caso de un encofrado de madera.

El costo de la chatarra es de 0.27 USD/kg.

Esto quiere decir que se puede recuperar $13520 \text{ kg} \times 0.27 \text{ USD/kg} = 3650.4 \text{ USD}$

Un factor muy interesante que puede ayudar a escoger el sistema de encofrado metálico sobre un método tradicional, como se mencionó anteriormente es el número de usos que puede tener un mismo encofrado metálico y a su vez la calidad de acabado que se puede lograr prácticamente con un mantenimiento mínimo comparado con el segundo cuya vida útil es limitada, además que la calidad del acabado superficial es muy superior al encofrado construido con madera.

5.8 Comparación de encofrado tradicional con sistema propuesto.

Con el fin de obtener una comparación económica acertada se analizará dos aspectos de funcionamiento de los sistemas mencionados.

1. Costo considerando reutilizaciones o reposición de elementos para cubrir toda la superficie requerida en un cierto número de etapas.
2. Costo y tiempo de ensamblaje del sistema de encofrado (este costo se multiplicará por el número de niveles o secciones encofradas)

Consideraciones previas

Retomando la tabla de presentada en la descripción del proyecto ya se conoce el número de niveles de cada uno de los pilares, por lo tanto ya se tiene un número fijado de reutilizaciones en la construcción.

Además en el capítulo 4.7 se introduce el dato de los perímetros internos y externos de la sección del pilar, con esto se puede calcular nuevamente la sección a encofrar en cada nivel.

$$\begin{aligned} \text{Perímetro exterior} &= 19.93\text{m} \\ \text{Perímetro interior} &= 25.625\text{m} \end{aligned}$$

Tabla 5-17: Trepas de pilas derecha e izquierda.¹⁰

H. Pila= 30.725m												
Pila 1	Trepas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Altura	1.825	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1.9
	Acumulada	1.825	4.825	7.825	10.825	13.825	16.82	19.82	22.82	25.82	28.82	30.72

H. Pila= 24.900m										
Pila 2	Trepas	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	Altura	1	3	3	3	3	3	3	3	2.9
	Acumulada	1	4	7	10	13	16	19	22	24.9

Considerando una altura de encofrado de 3m como exige la tabla anterior, se tiene una superficie total de encofrado:

$$(\text{Perim. ext} + \text{Perim. int}) * \text{Altura} = (19.93 + 25.625) * 3 = 136.665\text{m}^2$$

Se requiere encofrar en total $10 + 8 = 18$ niveles en total, en otras palabras 18 reutilizaciones del sistema (se realizará 18 fundiciones de concreto en total)

5.8.1. Encofrado tradicional (madera)

Este encofrado se construye con tableros de madera de 0.60 x 1.2 m y alfajías o vigas de 7 cm x 7 cm. Las mismas que se sostienen con pasadores metálicos o tirantes.

La configuración del encofrado de madera para cubrir la misma superficie del encofrado metálico será como indican los esquemas a continuación.

Considerando que el encofrado construido con madera se conformará en base a tableros de madera de 1.2mx0.6m la configuración para cubrir una altura similar a la del encofrado metálico sería así:

¹⁰ Tabla proporcionada por la constructora.

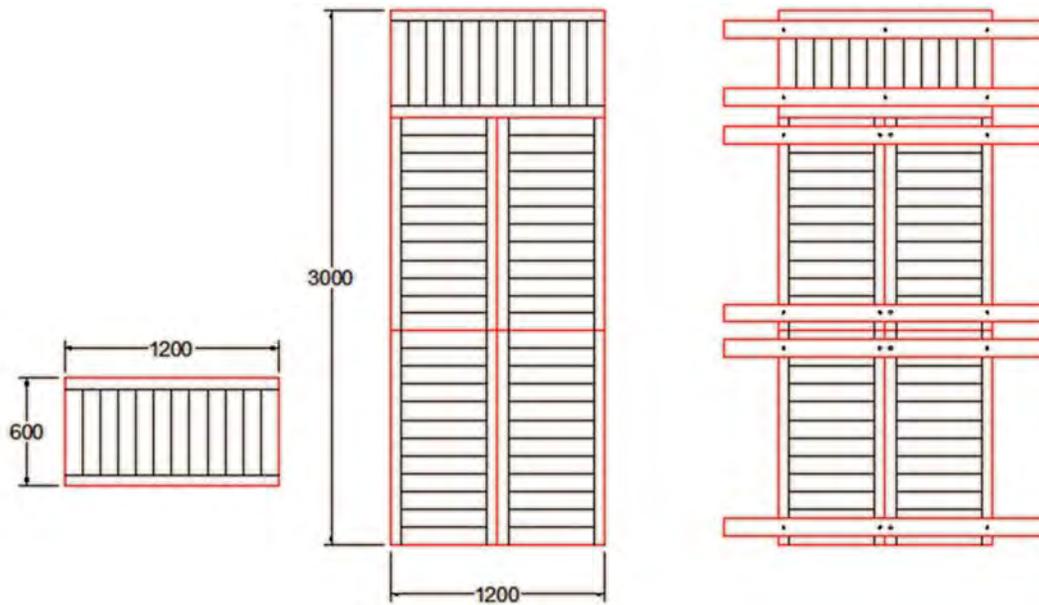


Figura 5-8: Esquema disposición de tableros de madera para encofrado alternativo.

Para poder ensamblar el encofrado y fijarlo durante el vertido del concreto, se requiere emplear unas vigas transversales y unos tirantes muy similares a los diseñados para el sistema metálico.

El proceso de armado y desarmado de este tipo de encofrado requiere de mayor tiempo y trabajadores, además que el proceso de aplomado y nivelación de los tableros es más complicado.

Se puede apreciar claramente que el ensamblaje de este tipo de encofrados es mucho más laborioso y además requiere de una mayor cantidad tirantes (figura 5.9) para formar la pared lo cual en la etapa de ensamblaje resultará en tiempos bastante considerables.

Según el listado de precios de materiales de la construcción de la revista de la Cámara de la Industria de la Construcción – Ecuador, los costos de los elementos se detallan a continuación:

Tablero p/encofrado eucalipto 1.2m x 0.6m: 10.64 USD /unidad

Alfajías 7x7x240cm rústicos: 4 USD /unidad

Tablones de eucalipto 30cmx5cm x2.4m: 7 USD/unidad

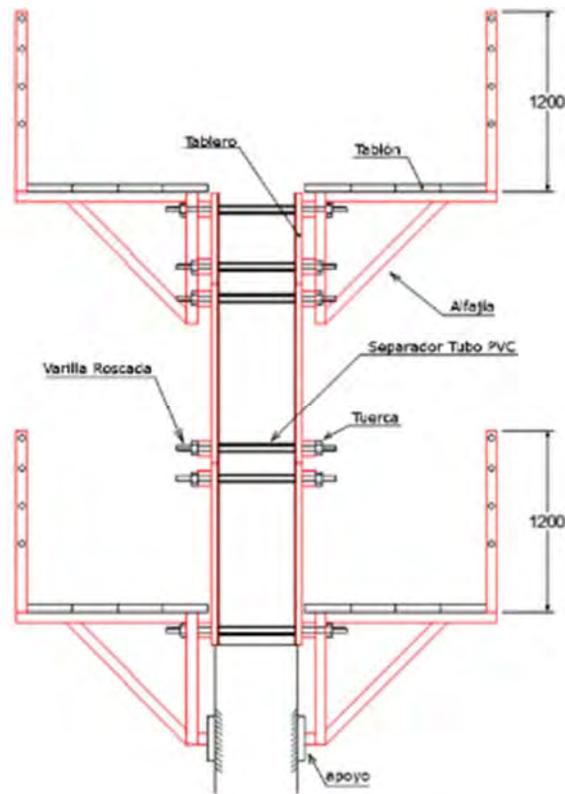


Figura 5-9: Esquema ensamblaje de encofrado de madera.

Según los esquemas anteriores figura 5.8 y figura 5.9 para cubrir un área de $3m \times 2.4m$ se requiere de 5 tableros de $0.60 \times 1.2m$ y 6 alfajías de $1.2m = 7.2m$ en madera de eucalipto. Para formar la plataforma se utilizara 4 tablones para el piso y 3.5 alfajías para formar los postes y pasamanos.

Por lo tanto el costo de los materiales requeridos para construir un segmento de encofrado de $2.4m$ de largo será:

$$\text{Tableros: } 10 \times 10.64 = 106.40 \text{ USD}$$

$$\text{Alfajías: } (6 + 3.5u) \times 4 \text{ USD} = 38 \text{ USD}$$

$$\text{Tablones: } 4 \times 7 \text{ USD/und} = 28 \text{ USD}$$

$$\text{Clavos, tornillos y pernos} = 10 \text{ USD}$$

$$\text{Costo en madera para encofrado} = (106.40 + 38 + 28 + 10) = 182.40 \text{ USD}$$

$$\text{El costo por metro lineal y 3m de altura será} = 182.40 / 2/40 = 76.00 \text{ USD}$$

Conociendo el perímetro externo e interno de la sección el costo en madera del encofrado se estima:

$$\begin{aligned} \text{Costo de un nivel de encofrado} &= 76.00 \text{ USD/m} * (19.93\text{m} + 25.625\text{m}) \\ &= 3462.18 \text{ USD} \end{aligned}$$

Se estima que el equipo de trabajo estaría formado con la participación de 1 maestro mayor, 2 carpinteros y 4 albañiles o ayudantes encofradores y que en el tiempo de 16 horas completarían el ensamblaje de todo un nivel de encofrado (encofrado + 2 plataformas) el costo de mano de obra para ensamblar todo el nivel se estima en:

$$\text{Costo maestro mayor: } 3.38 \text{ USD/hora}$$

$$\text{Costo carpintero: } 3.05 \text{ USD/hora}$$

$$\text{Costo de albañil: } 3.05 \text{ USD/hora}^{11}$$

$$\text{Costo de mano de obra en ensamblaje:}$$

$$(1 * 3.38 + 2 * 3.05 + 4 * 3.05) * 16 = 346.88 \text{ USD}$$

Se debe tomar en cuenta también que el tiempo de desmontaje se aproxima a la mitad de tiempo del ensamblaje por lo tanto:

$$\text{Costo mano de obra en desmontaje:}$$

$$(1 * 3.38 + 2 * 3.05 + 4 * 3.05) * 8 = 197.74 \text{ USD}$$

Considerando que la cantidad de usos que puede tener cada tablero es de 3 encofrados en los 18 niveles que se debe encofrar el costo de materiales durante toda la construcción será:

$$3841.80 \text{ USD} * 18 \text{ niveles} / 4 = 17288.10 \text{ USD}$$

Además otro factor de costo que se introduce con el encofrado de madera es el de limpieza del hormigón fundido. Estimado que por cada 10min se pueda limpiar 1m² de superficie de hormigón el tiempo adicional requerido para limpieza será de:

$$(19.93\text{m} + 25.625\text{m}) * 3 * \frac{10\text{min}}{\text{m}^2} = 22.78 \text{ horas}$$

Suponiendo que solo un albañil estará a cargo de la limpieza mientras el otro equipo avanza con el montaje o desmontaje de otro nivel el costo añadido por nivel de mano de obra será:

$$\text{Costo de limpieza:}$$

¹¹ Valores tomados de salarios mínimos de la contraloría general del estado del Ecuador.

$$3.05\text{USD/hora} * 22.78\text{horas} = 69.47 \text{ USD/limpieza nivel}$$

De la misma forma la mano de obra requerida para cada nivel se mantendrá, por lo tanto el costo de mano de obra de toda la construcción será:

$$(395.48 \text{ USD} + 197.74 \text{ USD} + 69.47) * 18 = 11928.29 \text{ USD}$$

A pesar de que estos dos valores sumados resultan ser menores que el de fabricación del encofrado metálico, un factor muy importante para considerar es el tiempo requerido de ensamblaje.

Tiempo de ensamblaje y desmontaje por nivel:

$$= \frac{(19.93\text{m} + 25.625\text{m})}{1.2\text{m}/0.75 \text{ hora}} + \frac{(19.93\text{m} + 25.625\text{m})}{1.2\text{m}/0.375 \text{ hora}} = 42.71 \text{ horas/nivel}$$

Esto quiere decir que el tiempo requerido solamente para armar y desmontar los encofrados con un equipo de trabajo, sin considerar tiempos de fraguado es de:

$$42.71 \frac{\text{horas}}{\text{nivel}} * 18\text{niveles} = 768.78 \text{ horas}$$

Este tiempo se puede reducir introduciendo un segundo equipo de trabajo, lo cual resultaría en una reducción del tiempo del proyecto a la mitad, sin embargo el costo total de mano de obra se mantendría.

	Costo/nivel	Costo proyecto
Materiales	\$ 1280.60	\$ 23050.8
Mano de obra ensamblaje	\$ 395.48	\$ 7118.64
Mano de obra limpieza	\$ 69.47	\$ 1250.46
Mano de obra desmontaje	\$ 197.74	\$ 3559.32
Total	\$ 1943.29	\$ 34979.22

5.8.2. Sistema de encofrado metálico

Conociendo el dato del costo del sistema obtenido en el capítulo 5.7 se puede estimar un costo por nivel de encofrado teniendo en cuenta que el sistema permitirá una reutilización durante todo el proyecto (18 niveles).

Costo encofrado metálico/nivel:

$$= 41065 \text{ USD}/18 \text{ Niveles} = 2281.38 \text{ USD/Nivel}$$

Teniendo en cuenta que los elementos que conforman el sistema de encofrado metálico son de mucha mayor dimensión, el tiempo de montaje y desmontaje será reducido en gran medida respecto al encofrado de madera que se construye con elementos de 0.60 x 1.2 m.

Manteniendo un equipo de trabajo similar estaría formado con la participación de 0.5 de maestro mayor, 2 cerrajeros y 2 ayudantes de cerrajero o encofradores y que en el tiempo de 15 min completarían el ensamblaje de un segmento encofrado, considerando que el encofrado exterior consiste en 6 elementos y el interior de 3 elementos. Los anillos con plataforma se consideran como 6 elementos exteriores y 3 elementos interiores por relación de dimensiones.

Costo maestro mayor: 3.38 USD/hora

Costo carpintero: 3.05 USD/hora

Costo de albañil: 3.05 USD/hora¹²

Costo mano de obra en ensamblaje:

$$(0.5 * 3.38 + 2 * 3.05 + 2 * 3.05) * (6 + 3 + 6 + 3) * (0.25 \text{ hora/segmento}) \\ = 250.02 \text{ USD}$$

Se debe tomar en cuenta también que el tiempo de desmontaje se aproxima al tiempo de ensamblaje por lo tanto:

Costo mano de obra en desmontaje:

$$(0.5 * 3.38 + 2 * 3.05 + 2 * 3.05) * (6 + 3 + 6 + 3) * (0.25 \text{ hora/segmento}) \\ = 250.02 \text{ USD}$$

Siendo el acabado del hormigón muy superior al logrado con un encofrado de madera se puede obviar el costo de limpieza pues será mínima.

La mano de obra requerida para cada nivel se mantiene, por lo tanto el costo de mano de obra de toda la construcción se puede estimar:

$$(250.02 \text{ USD} + 250.02 \text{ USD}) * 18 = 500.04 \text{ USD}$$

A pesar de que estos dos valores sumados resultan ser menores que el de fabricación del encofrado metálico, un factor muy importante para considerar es el tiempo requerido de ensamblaje.

Tiempo de ensamblaje y desmontaje por nivel:

¹² Valores tomados de Salarios mínimos de la Contraloría General del Estado del Ecuador.

$$= \frac{(6 + 3 + 6 + 3)}{\text{segmentos}/0.25 \text{ hora}} + \frac{(6 + 3 + 6 + 3)}{\text{segmento}/0.25 \text{ hora}} = 9 \text{ horas/nivel}$$

Esto quiere decir que el tiempo requerido solamente para armar y desmontar los encofrados con un equipo de trabajo, sin considerar tiempos de fraguado es de:

$$9 \text{ horas/nivel} * 18 \text{ niveles} = 162 \text{ horas}$$

Este tiempo se puede reducir introduciendo un segundo equipo de trabajo, lo cual resultaría en una reducción del tiempo del proyecto a la mitad, sin embargo el costo total de mano de obra se mantendría.

	Costo/nivel	Costo proyecto
Fabricación	\$ 2281.38	\$ 41065.88
Mano de obra ensamblaje	\$ 250.02	\$ 4500.36
Mano de obra desmontaje	\$ 250.02	\$ 4500.36
Recuperación como chatarra		\$ -5016.06
Total	\$ 2781.42	\$ 45049.66

5.8.3. Comparación de alternativas

A pesar de que aparentemente el costo del proyecto con el encofrado metálico duplica al del encofrado de madera, el encofrado metálico es un proceso mucho más ágil que asegurará evitar un lucro cesante por una entrega anticipada del proyecto en beneficio del contratante.

Tiempo aproximado de funcionamiento del encofrado metálico: 162 horas

Tiempo aproximado de funcionamiento del encofrado de madera: 768 horas

Además considerando que las alturas que logrará el sistema (24m y 30m) es de gran importancia tener en cuenta la seguridad que puede brindar el sistema metálico a los trabajadores. Este considera una escalera entre los tres niveles de funcionamiento.

Siendo el acero un material 100% reciclable a diferencia de la madera puede ser un factor que afecte a la decisión del cliente construir esta herramienta con materiales que puedan ser descartados posteriormente sin afectar al medio ambiente.

Conclusiones

En este estudio se propone un sistema de encofrado que simplifique las labores de trabajo reduciendo el tiempo de instalación con la finalidad de que una obra de gran magnitud pueda ser concluida dentro del tiempo previsto. Este sistema además de reducir la generación de desperdicios en la obra, conseguirá una buena calidad en el terminado del concreto y dará seguridad a los obreros de la construcción.

El sistema de encofrado propuesto será diseñado y construido contando con los controles de calidad tanto de los materiales como de los procedimientos que garanticen que la estructura permanezca indeformable y resistente a las presiones generadas por el concreto fresco y por las actividades de vaciado y vibrado.

Con las herramientas disponibles en la actualidad, resulta muy fácil preparar un modelo matemático mediante elementos finitos utilizando diferentes programas tanto de dibujo como de análisis estructural y determinar el comportamiento de cada uno de los elementos que lo integran. De la misma manera se puede determinar en forma matemática los esfuerzos y deformaciones que se desarrollan debidos a las cargas actuantes. Un refinamiento en las secciones de los elementos estructurales llevaría a una optimización del costo de la estructura simplemente variando las secciones y verificando que los esfuerzos y deformaciones obtenidos estén dentro de los valores aceptables. El modelo matemático se realizó utilizando el programa *SolidWorks*, cuyos resultados gráficos y numéricos forman parte de este trabajo. Ha sido de gran ayuda pre dimensionar algunos elementos para que al momento de correr el modelo, podamos optimizarlo en forma rápida.

Para estimar los costos de fabricación es necesario disponer de la información de la maquinaria que se va a utilizar, ya que de ello dependerá la estimación de tiempo requerido para cada actividad, el material empleado y en consecuencia el costo de cada operación. Para el presente caso, se ha utilizado la información disponible de algunos equipos con que cuenta la planta local de *MetalShop* ubicada en la ciudad de Quito.

Una ventaja importante al realizar un modelo de una estructura completa como la realizada en acero frente a una alternativa en madera, resulta de que las propiedades del acero están

perfectamente definidas y comprobadas, mientras que si realizamos el modelo con madera, las propiedades no están bien definidas pues dependen de muchos imponderables como el tipo, la calidad y estado de la madera.

Se pudo determinar que un encofrado de madera, que podría resultar más económico, no sería la solución adecuada para este tipo de proyecto, considerando que el tiempo entre una fundición y otra sería más largo y por cuanto resulta en un trabajo más laborioso, de mayor riesgo y con una generación mayor de desperdicio.

Por la dificultad de desprender el encofrado interior ya que los extremos de los encofrados de las paredes se traban unos con otros, se ideó un sistema con bisagra que permita recogerse hacia adentro para de esa manera desprenderse de la pared y separarse de los encofrados vecinos. Este sistema permite que una superficie de encofrado pueda doblarse en 2 mitades para ser colocada en otro lugar con mucha facilidad. Este mecanismo al utilizarse en un encofrado de madera puede resultar en un daño o rotura del encofrado, lo cual significa otra desventaja del encofrado de madera.

En resumen, el sistema de encofrado metálico propuesto es muy conveniente para una obra de gran magnitud en el que el tiempo de ejecución es un componente importante por ser esta actividad parte de la ruta crítica de construcción. El tipo de encofrado asegura una buena calidad en el terminado de la superficie especialmente si se trata de estructuras vistas y por ser el acero un material altamente resistente, se conseguirá superficies perfectamente alineadas y sin deformaciones. Por otro lado, la utilización de las herramientas de simulación matemática, permiten lograr una refinación del diseño estructural lo que se traduce en la reducción del costo de la obra, y la optimización de los recursos en el proceso constructivo.

El tiempo empleado en un análisis estructural y una optimización del diseño del encofrado es invaluable si se considera las ventajas que se pueden obtener en el ahorro económico, la optimización del proceso constructivo, la calidad de la obra obtenida, el tiempo de terminación del proyecto, y especialmente en la seguridad del personal involucrado en los trabajos, con mayor razón cuando esos trabajos se realizan en altura.

Bibliografía.

Obras Consultadas:

Bibliografía

Aghayere, Abi, y Vigil, Jason (2009) *Structural Steel Design, A practice Oriented Aproach*, New Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall.

Arch, Alexander (2003) “Design and Construction of Concrete Formwork”, en *Civil Engineering Handbook*, Indiana: Purdue University

Hurd, M. K. (2001) *Formwork for Concrete*, ACI, Michigan Estados Unidos

Nemati, Kamran M. (2007) “Lesson 1: Introduction and Concrete Formwork and Vertical Formwork Design” en *Formwork for Concrete*, University of Washington Department of Construction Management.

Peurifoy, Robert L. y Oberlender, Garold D (2011) *Formwork for Concrete Structures*, New York, Chicago, San Francisco: McGrawHill

Pytel, Andrew y Kiusalaas Jaan (2012) *Mechanics of Materials*, Pennsylvania: Cengage Learning.

Budynas, Richard G., y Nisbett Keith (2011) *Shigley’s Mechanical Engineering Design*, New York: McGrawHill.

Artículos consultados en línea DOI:

“Advanced Finite Element Methods (ASEN 6367) Chapter 20,21 (Kirchoff Plates)” en Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado at Boulder, 2013 <http://www.colorado.edu/engineering/CAS/courses.d/AFEM.d/>

Chirag K. Baxi “Formwork, A Concrete Quality Tool”, en 36th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES: 14 - 16 August 2011, Singapore, Article Online Id: 100036029 <http://cipremier.com/100036029>

“Lesson 9. Estimating and Comparing Weld Metal Cost” by ESAB Group, 2000. http://www.esabna.com/euweb/awtc/lesson9_3.htm

“Essential factors in Gas Metal Arc Welding” by KOBE STEEL, Ltd, 2011 Japan.
<http://www.kobelco.co.jp/english/welding/events/files/2011GMAW.pdf>

Rupasinghe, Rohan y Nolan, Éanna, “Formwork for modern, efficient concrete construction”, Brepress. <http://www.brepress.com/>

“The Design and construction of the Millau Viaduct”, SteelBridge, Steel bridges extend structural limits, 2004 Millau.

Folletos:

“Climbing Systems CB 240 and CB 160”, PERI, Enero 2011, www.peri.com

“MULTIFLEX Girder slab formwork”, PERI, 2007, www.peri.com

“Mig Wires SuperGlide S3 AWS-ER70S-3 Product Info”, Lincoln Electric,
http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperGlide-SuperGlideS3/c4101.pdf

“PowerMAX 1650 Machine Side Reference Guide”, Hypertherm,inc Julio 2010

Presentaciones DOI:

Valarezo A. Marlon, “Diseño y Construcción de Encofrados ACI347” en Inspección de Obras de Concreto, <http://www.slideshare.net/mfvalarezo/diseo-y-construccion-de-encofrados>

Stanley, Russell, “The Formwork to the Millau Viaduct”, Presentación, de PERI Ltd. Noviembre 2007 Irlanda,
<http://www.engineersireland.ie/EngineersIreland/media/SiteMedia/groups/Divisions/civil/The-Formwork-to-the-Millau-Viaduct.pdf?ext=.pdf>

Wong, Raymond, “Application of Formwork for High-Rise and complex building structures, The Hong Kong cases”, Division of building science and technology, City University of Hong Kong.
http://www6.cityu.edu.hk/construction_archive/major_reference_pdf.aspx?id=132

“Common formwork system”, Division of building science and technology, City University of Hong Kong.
http://www6.cityu.edu.hk/construction_archive/major_reference_pdf.aspx?id=124

Revista/Boletín:

Revista de la Cámara de la Construcción de Quito, No 220, 2014. (Boletín de precios unitarios para la construcción)