



UNIVERSIDAD DE CUENCA

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS ESTÁTICO DE UN TANQUE DE HORMIGÓN PRETENSADO SUPERFICIAL PARA GAS LICUADO

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

AUTORES:

PABLO SEBASTIÁN CARRERA VANEGAS

DIRECTOR:

INGENIERO JORGE FERNANDO MOSCOSO MSc.

CUENCA-ECUADOR

2015



Resumen

El presente proyecto se desarrolló con el objetivo de analizar las ventajas que ofrece para un tanque de hormigón pretensado superficial para almacenar gas licuado de petróleo. En el primer capítulo se describen datos generales referentes a la introducción y objetivos del estudio, especificando las razones que justifican su realización. En el segundo capítulo se estudian las características del gas licuado de petróleo, de los hormigones tanto convencionales, como de alta resistencia, del hormigón pretensado, los tipos de acero de alta resistencia como las características de cada uno de estos y las pérdidas que se producen por la fuerza de pretensado. Dentro del tercer capítulo se habla de la metodología y procedimiento a seguirse dentro del dimensionamiento del tanque de gas licuado de petróleo y así alcanzar un análisis confiable y seguro, partiendo desde un equilibrio de fuerzas internas producidas por la fuerza del pretensado en conjunto con las fuerzas externas, las cuales son las únicas producidas por el gas licuado de petróleo y que actúan directamente en las paredes. En el capítulo cuarto se hace el análisis de las fuerzas del tanque de hormigón pretensado superficial para gas licuado de petróleo, partiendo de los resultados obtenidos en el anterior capítulo, para verificar si las condiciones impuestas cumplen los objetivos de nuestro análisis. Para finalizar, en el capítulo quinto se plantean las debidas conclusiones y recomendaciones a las que se llegó con el proyecto de tesis.

Palabras Claves

Hormigón pretensado/ Superficial/ Gas licuado de petróleo/ Fuerza de Pretensado/ Fuerzas Internas/ Fuerzas Externas/ Hormigón de alta resistencia/ Acero de alta resistencia.



Abstract

The purpose of this project is do the analysis of a prestressed concrete surface tank to store liquefied petroleum gas. In the first chapter the justification and objectives to be achieved are explained. In the second chapter are described the liquefied petroleum gas characteristics and is realized a study of the characteristics of conventional, high strength and prestressed concrete and different types of high strength steel. And shows the losses because the prestressed strength. The chapter three corresponds to the method and process followed to achieve a safe and reliable analysis, which begins with the equilibrium of internal forces produced by prestressed strength with the external forces caused for the liquefied petroleum gas that acts directly on the tank walls. The chapter four shows the analysis of a prestressed concrete surface tank, based on the results obtained previously. Allowing verify if the conditions imposed fulfilled for our analysis. The chapter five presents the conclusions and recommendations.

Key words:

Prestressed concrete / Surface / Liquefied petroleum gas / Prestressed strength / High strength steel/ High strength concrete



Contenido

1	Capítulo I: INTRODUCCIÓN	12
1.1	Introducción.....	12
1.2	Objetivo general	14
1.3	Objetivos específicos	14
1.4	Justificación.....	14
2	Capítulo II: MATERIALES	16
2.1	Gas licuado de Petróleo	16
2.1.1	Características de los hidrocarburos	16
2.1.2	Factor de Seguridad	18
2.2	Hormigón.....	18
2.2.1	Hormigón convencional	19
2.2.2	Hormigón de alta resistencia	21
2.3	Acero de Alta resistencia.....	25
2.3.1	Características de los cables de pretensado	26
2.3.2	Corrosión del acero de pre-esfuerzo	27
2.3.3	Relajación del acero de pre-esfuerzo	27
2.3.4	Longitud de desarrollo del acero de pre-esfuerzo.....	28
2.4	Hormigón Pretensado	28
2.4.1	Análisis de pérdidas en pretensados	29
2.4.2	Tipo de Anclajes	34
3	Capítulo III: METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO.....	37
3.1	Pre dimensionamiento del tanque de gas licuado de petróleo	37
3.2	Análisis de esfuerzos externos.....	38
3.3	Análisis de esfuerzos internos.....	39
3.3.1	Resistencia A Cortante	42
3.3.2	Análisis de Losa de contrapiso	43
4	Capítulo IV: ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	45
4.1	Análisis de las fuerzas de pretensado.....	45
4.1.1	Pre dimensionamiento del Tanque	45
4.1.2	Fuerzas Externas.....	45



4.1.3	Fuerzas Internas.....	46
4.1.4	Resistencia a la Compresión	52
4.1.5	Análisis al Cortante.....	52
4.1.6	Análisis de Losa de Contrapiso	53
4.2	Análisis de precios	54
5	Capítulo V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57
5.1	Conclusiones.....	57
5.2	Recomendaciones.....	58
5.3	Estudios Futuro	58
6	REFERENCIAS.....	59
7	ANEXOS	59
7.1	ANEXO I.....	59
7.2	Esquematización	61



Tablas

Tabla 2.1 Características de Gas Licuado de Petróleo, (2)	16
Tabla 2.2 Características del Gas Propano, [7]	17
Tabla 2.3 Características del Gas Butano, [7]	18
Tabla 2.4 Valores del Módulo de Elasticidad, Fuente: [11]	20
Tabla 2.5 Valores de Índice de Ductilidad por Deformación, Fuente: [11].....	21
Tabla 2.6 Pérdidas de la fuerza de pretensado, Fuente:[13].....	29
Tabla 3.1. Parámetros para pre dimensionamiento de elementos pretensados más usuales, con peraltes y luces de mayor uso. Fuente:[13]	37
Tabla 4.1 Resultados del trazado para los cables de preesfuerzo.	46
Tabla 4.2 Pérdidas en la fuerza de preesfuerzo.....	48
Tabla 4.3 Fuerza Interior vs. Fuerza Exterior	49
Tabla 4.4 Comparación entre Factor de Seguridad y Fuerzas Internas, Externas.	49
Tabla 4.5 Compresión al Hormigón vs. Fuerzas Internas.	52
Tabla 4.6 Análisis de cortantes.	53
Tabla 4.7 Momentos Radiales y Tangenciales.....	53
Tabla 4.8 Acero de refuerzo radial y tangencial.	53
Tabla 4.9 Análisis de precios para hormigón pretensado.....	55
Tabla 4.10 Análisis de precios para losa de contrapiso	56
Tabla 7.1 Influencia Plástica y Retracción del hormigón, [13]	59



Figuras

Figura 2.1 Curva Esfuerzo- Deformación, Adaptado: [11]..... 19

Figura 2.2 Deformación elástica instantánea y deformación plástica, Fuente: [13] 25

Figura 2.3. Longitud de Anclaje, Tensión ultima de Adherencia, Adaptado: [18] 35

Figura 2.4. Tipos de Anclajes, Adaptado: [18]..... 36

Figura 3.1. Pre dimensiones de Tanque de gas licuado de petróleo..... 37

Figura 3.2 Modelamiento del Tanque de gas licuado de petróleo 38

Figura 3.3 Presión del líquido en las paredes del tanque..... 39

Figura 3.4. Elemento diferencial, Radio de curvatura..... 40

Figura 3.5 Equilibrio de fuerzas internas (P) y fuerzas externas (Q). 40

Figura 3.6 Características de la longitud de arco 41

Figura 3.7. Diagrama de fuerzas distribuidas para una viga empotrada. 43

Figura 3.8 Modelamiento de Losa de contrapiso..... 44

Figura 4.1 Pre dimensionamiento de Elementos para análisis de tanque pretensado superficial. 45

Figura 4.2. Distribución de las presiones del gas en las paredes del tanque. ... 46

Figura 4.3 Trazado del cable de pretensado. 47

Figura 4.4 Distribución de Cables en elementos de Hormigón Pretensado. 51



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CLAUSULA DE DERECHO DE AUTOR.

Pablo Sebastián Carrera Vanegas, autor de la tesis "Análisis estático de un tanque de hormigón pretensado superficial para gas licuado", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 26 de marzo de 2015

Pablo Sebastián Carrera Vanegas

0104027115



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CLAUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL.

Pablo Sebastián Carrera Vanegas autor de la tesis "Análisis estático de un tanque de hormigón pretensado superficial para gas licuado", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 26 de marzo de 2015

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "P. Vanegas".

Pablo Sebastián Carrera Vanegas

0104027115



DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a Dios por siempre ser mi guía en el camino de la vida, a mis padres Orlando y Cecilia, que son el pilar fundamental para poder alcanzar una de mis metas en la vida, a mis hermanos Ismael y Adriana, Anabel, Mateo que siempre han estado conmigo en cada etapa de mi vida, mi enamorada Johanna y todos mis familiares por estar siempre apoyándome incondicionalmente.



AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por regarle la vida, a mis padres, mis hermanos por siempre estar a mi lado, como también al Ing. Jorge Moscoso por su dedicación, colaboración en la elaboración de este documento y demás amigos que siempre estuvieron presentes brindándome su apoyo.



Capítulo I: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Desde los inicios, el ser humano se ha involucrado en diversos tipos de construcciones, desde las más simples -como estructuras de pequeñas viviendas, construidas con trabajo manual a pie de obra- hasta las más complejas: represas para generación de energía, grandes puentes (mega construcciones), vías, sistemas de abastecimiento, de captación y almacenamiento de fluidos, construidos en su gran mayoría con elementos prefabricados, lo que reduce ciertas operaciones de corte y ajustes a pie de obra.

Las estructuras son diseñadas de manera que soporten las diversas fuerzas y cargas, tanto naturales como el viento, agua, sismos, etc., así como también diversas cargas impuestas por el ser humano (carga muerta), ya sea el peso propio de los elementos de construcción o el peso de diferentes máquinas.

Según las funciones que cumpla una determinada estructura, se considerará los materiales a usarse en la construcción. En vista de que la gran mayoría de estructuras siguen un patrón similar de construcción, se ha considerado realizar un análisis para determinar los efectos que puede traer consigo el almacenamiento de elementos, tales como: los fluidos que, por lo general, contienen componentes químicos que pueden generar afecciones no comunes para las mismas, de manera que el gas licuado de petróleo, es el material que se analizará dentro del presente estudio, siendo importante conocer su origen.

El gas licuado se produce a partir del gas natural o petróleo y se lo conoce como "GLP", en muchos casos también se lo denomina como hidrocarburo liviano, por su capacidad para licuarse a presiones moderadas, específicamente, con gas propano o butano[1], [2]. Se utiliza para el transporte y también se lo evapora para la calefacción, calentamiento de agua, cocción y secado de granos, como combustible para vehículos e insumo para la industria petroquímica. Las características físicas en la construcción de sistemas de almacenamiento de GLP son determinantes, pudiendo citarse las siguientes: la relación de presión vapor-temperatura, la composición química



de los hidrocarburos presentes y las condiciones en las que se va a diseñar el sistema para almacenamiento.

Parte fundamental del marco teórico son los diversos estudios realizados en años anteriores, como por ejemplo: “DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DEPÓSITO DE HORMIGÓN PRETENSADO PARA 80.000 m³ DE CAPACIDAD DE GAS NATURAL LICUADO” de Ramón Fernández de la Reguera, el mismo que dice: *“Ya en los años de 1967 y 1968 se construyeron depósitos de gas natural licuado, los cuales tienen paredes internas de hormigón pretensado constituido por paneles prefabricados. Cabe señalar que instalación fue constituida como la pionera en la construcción de depósitos de hormigón pretensado en el mundo. Este depósito consistía en dos muros concéntricos de hormigón pretensado, fondo de acero, techo suspendido y cúpula de hormigón armado.”* [3]

Por esto, en la presente investigación se propone realizar un tanque de hormigón pretensado superficial con capacidad de 35000m³, en lugar de uno de 80000m³. Considerándose para ello realizar el pretensado superficial por las distintas propiedades que tiene el suelo, al momento de realizar las cimentaciones y por las diferentes presiones que afectarían a la estructura.

Para el diseño del tanque se consideró la aplicación de una geometría circular, con el objetivo de inducir una distribución más uniforme de las presiones que genere el gas licuado de petróleo en el interior del mismo. Para esto es necesario la aplicación de pretensados, para generar la distribución deseada y una mejor resistencia del tanque a las presiones mencionadas.[4]

La técnica consistió en realizar paneles continuos con la omisión de las juntas, ya que son un punto de debilidad, bajo cargas dinámicas. Esto nos ayudará a disminuir los esfuerzos longitudinales en ciertos puntos de la estructura, para lo que se lleva a cabo el tesado del acero de alta resistencia, para inducir esfuerzos de compresión al hormigón que permitirán tener mayor resistencia a las cargas que se generarán con la acción del gas.

Para estas construcciones que estarán expuestas a grandes cargas continuas, no son aplicables hormigones convencionales, por lo que se deberá realizar los



diseños con hormigones y aceros de alta resistencia. Además, en la construcción se debe tomar en cuenta, que los aceros deberán llegar a su punto de fluencia, antes de ser revestidos de hormigón.

Se conoce, que un gas almacenado, genera presiones en varias direcciones y con diferentes magnitudes, pero para el desarrollo de esta investigación se consideró la distribución triangular de las fuerzas, como lo es en el caso de los líquidos; esto se debe a que el gas es almacenado a bajas temperaturas, en forma líquida.[4]

1.2 Objetivo general

- Realizar el análisis de un tanque en hormigón pretensado para el almacenamiento de Gas Licuado de Petróleo (GLP).

1.3 Objetivos específicos

- Estudiar los hormigones de alta resistencia para pretensados.
- Analizar la influencia que tiene un combustible en contacto con el hormigón.
- Estimar el costo de un tanque de hormigón pretensado.

1.4 Justificación

La conveniencia de analizar la factibilidad de realizar un tanque para almacenamiento de gas licuado de petróleo con un sistema de hormigón pretensado, se fundamenta en la facilidad que brinda para realizar elementos livianos con lo que se obtendrán fuerzas sísmicas de menor magnitud. Además, asume conveniente, aplicar hormigón de alta resistencia, para obtener una mayor contribución a las altas compresiones a las cuales se somete el hormigón pretensado, minimizando las pérdidas que se producen por fuerzas de tensado, lo que no sería posible al utilizar un hormigón convencional.

Se considera necesario ya que este adquiere una fuerza de precompresión, que se transmite por medio de los cables, la cual incrementa la resistencia a tracción, debido a las cargas que produciría el gas licuado de petróleo, convirtiéndolo en un elemento más rígido y con mayor resistencia.



Otro motivo por el cual se utilizaría el hormigón pretensado, se debe a que se puede controlar de manera más efectiva el nivel de agrietamiento. Y con ello tener una mayor efectividad y seguridad en nuestro diseño.

Capítulo II: MATERIALES

2.1 Gas licuado de Petróleo

El gas licuado de petróleo se obtiene de la refinación de hidrocarburos. El gas puede ser mezclado de manera total o parcial y a baja presión, lo cual otorga mayor facilidad de transporte y almacenamiento. De este proceso, se obtiene el Gas Licuado de Petróleo “GLP” que a temperatura y presión ambientales son gases fáciles de condensar.

Los principales componentes del gas licuado son el butano y el propano, y se los puede encontrar en el petróleo crudo o en el gas natural, sobre todo, como subproducto de la destilación fraccionada catalítica.

En el Ecuador, se utiliza el 40% de propano y el 60% de butano. Como se conoce, el GLP es inodoro y por seguridad es olorizado, con mercaptanos, pues su mal olor permite identificar las fugas de gas [2].

Las especificaciones de los hidrocarburos con las cuales se trabaja en nuestro país se describen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Características de Gas Licuado de Petróleo, (2)

Presión de Vapor REID	Máximo	160	PSI
Volatilidad: re vaporización al 95%	Máximo	2	°C
Residuo en 100 ml	Máximo	0.05	
Azufre	Máximo	38	PPM
Gravedad Especifica e 15.6 °C	Máximo	0.57	

“El peso relativo del gas licuado de petróleo por litro es de 0.531kg (Propano 70%-Butano 30%), de los cuales, el peso del propano, butano líquido es de 0.508kg y 0.584kg respectivamente” Fuente: [5]

2.1.1 Características de los hidrocarburos

Los hidrocarburos están conformados, principalmente por hidrógeno y carbono, en proporciones variables, las cuales se presentan tanto en estado líquido como en estado gaseoso.

Los hidrocarburos se clasifican en dos grupos:



- De cadenas abiertas: aquellos que contienen más de un átomo de carbono, unidos entre sí formando una cadena lineal que puede tener una o más ramificaciones.
- Cíclicos: en éstos los átomos de carbono forman uno o más anillos cerrados.

Los dos grupos se subdividen según su comportamiento químico en saturados e insaturados. “[6].

- Hidrocarburos saturados o parafínicos $\{C_nH_{2n} + 2\}$
- Hidrocarburos insaturados o olefínicos $\{C_nH_{2n}\}$

De los cuales el propano y butano pertenecen a los hidrocarburos saturados y su nomenclatura es:

- Propano $\{C_nH_{2n} + 2\} = \{C_3H_2 * 3 + 2\} = C_3H_8$
- Butano $\{C_nH_{2n} + 2\} = \{C_4H_2 * 4 + 2\} = C_4H_{10}$

2.1.1.1 PROPANO

Se lo encuentra en la familia de los hidrocarburos alcanos, consiste en tres átomos de carbono y ocho de hidrógeno C_3H_8 , es un gas incoloro e inodoro. Este gas a temperatura ambiente es inerte al contrario de lo que ocurre en temperaturas altas, ya que arde en contacto con el aire produciendo dióxido de carbono y agua, por lo que se utiliza como combustible. Se encuentra en el petróleo crudo, en el gas natural y en diferentes derivados del refinado del petróleo. El propano se licua a presión atmosférica a -42°C . Algunas de las características del gas propano se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Características del Gas Propano, [7]

Densidad	0.008	g/cm^3
Masa	44	UMA
Punto de fusión	187.70	$^\circ\text{C}$
Punto de Ebullición	-42.1	$^\circ\text{C}$
Punto de Inflamabilidad	-103.85	$^\circ\text{C}$

Los valores en el Sistema Internacional SI en condiciones normales son 0°C y 1 atm



2.1.1.2 BUTANO

Es un hidrocarburo saturado, en el que se encuentran cuatro átomos de carbono y diez átomos de hidrógeno C_4H_{10} , es un gas inflamable e incoloro, que se lo puede encontrar, normalmente, en estado gaseoso. Es licuado fácilmente para su transporte y almacenamiento. Se lo obtiene de la destilación del petróleo.

Las características del butano se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Características del Gas Butano, [7]

Densidad	2.52	g/cm ³
Masa	58.08	UMA
Punto de fusión	-138.3	°C
Punto de Ebullición	-0.5	°C
Punto de Inflamabilidad	-60	°C

Los valores en el Sistema Internacional SI en condiciones normales son 0 °C y 1 atm

2.1.2 Factor de Seguridad

Al ser un tanque de almacenamiento de hidrocarburos es importante conocer el factor de seguridad, tomando en consideración que al ser más completo el análisis de tensiones, tanto menor puede ser dicho factor, siendo necesario considerar las seguridades dentro del análisis que se realizará más adelante.

Se han tomado en consideración algunas reglamentaciones como la del Ministerio de Minas y Energía de Colombia; donde, el factor de seguridad para elementos el diseño de tanques es de 4 y en el código ASME Sección 8 división #1 el valor del factor que afecta a la resistencia a la tracción es igual a 4. Fuente:[8],[9]

2.2 Hormigón

El concreto es un material pétreo artificial, obtenido de la mezcla de cemento, agregados y agua en proporciones determinadas. El cemento y el agua forman una pasta que rodea a los agregados, constituyendo una mezcla heterogénea entre todos los materiales. Algunas veces, se añaden ciertas sustancias, llamadas aditivos que mejoran o modifican algunas propiedades del concreto.

El peso volumétrico del concreto es elevado en comparación con el de otros materiales de construcción, por lo general son elementos de gran volumen. Este peso se debe considerar en cualquier cálculo [10].

2.2.1 Hormigón convencional

Para el diseño de estructuras con hormigones convencionales, presenta las siguientes propiedades mecánicas:

2.2.1.1 Módulo de Elasticidad

Es una medida de la rigidez, es decir, la resistencia a la rotura del material. Los hormigones de menor resistencia tienen una mayor capacidad de deformación que los hormigones más resistentes. El módulo de elasticidad (E_c) depende de la resistencia del hormigón, de su edad, de las propiedades de los agregados y de las del cemento, de la velocidad de carga y de la forma y tamaño de la probeta.

En la curva esfuerzo deformación que se observa en la Figura 2.1 se puede observar que está compuesta de dos fases: la primera corresponde a un comportamiento casi lineal y elástico cuando las cargas aplicadas son bajas; y, la segunda fase es no lineal e inelástico y corresponde cuando las cargas aplicadas son altas.[11].

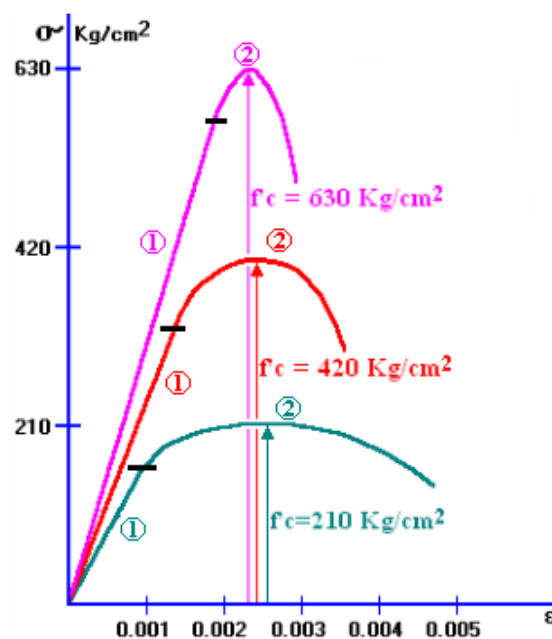


Figura 2.1 Curva Esfuerzo- Deformación, Adaptado: [11]



El módulo de elasticidad depende de cada valor de la resistencia del hormigón sometido a compresión, el cual se incrementa cuando la resistencia del hormigón es mayor.

$$E_c = 15000\sqrt{f'c} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad \text{Fuente: [11]} \quad \text{Ec. 2.1}$$

A continuación se presenta en la Tabla 2.4, los valores del módulo de elasticidad que se relacionan a la resistencia del hormigón.

Tabla 2.4 Valores del Módulo de Elasticidad, Fuente: [11]

Resistencia (Kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)
210	217000
280	251000
350	281000
420	307000

2.2.1.2 Ductilidad

Es la capacidad de un material para seguir deformándose no linealmente a pesar de tener incrementos de cargas mínimas, nulas y cuando exista una disminución de carga. Esto se puede observar en la Figura 2.1, en la fase 2. La ductilidad está dada por la Ec. 2.2:

$$D_d = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_e} \quad \text{Fuente:[11]} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Dónde:

D_d: Índice de ductilidad por deformación.

ε_u : Deformación unitaria de rotura.

ε_e : Deformación unitaria elástica máxima.

El índice de ductilidad por deformación es un excelente parámetro de la capacidad que tiene el hormigón para deformarse por encima de su límite de fluencia.

Tabla 2.5 Valores de Índice de Ductilidad por Deformación, Fuente: [11]

Resistencia (Kg/cm ²)	Índice de Ductilidad por Deformación
210	4.5 - 6.0
280	3.5 - 4.5
350	3.0 - 3.5
420	2.5 - 3.0
630	2.0 - 2.5
840	1.5 - 2.0

En la Tabla 2.5, se presentan los valores de la ductilidad por deformación de los hormigones, los cuales se encuentran en función de la resistencia a la compresión. [11]

2.2.1.3 Flujo plástico

El hormigón al ser sometido a cargas de larga duración tiene una deformación instantánea en el momento inicial y, una deformación adicional a largo plazo, producida por el flujo plástico del hormigón.

Estas deformaciones a largo plazo son comparativamente mayores, cuando se utilizan hormigones de menor resistencia (210-280 kg/cm²), lo cual es aproximadamente 2.2 veces mayor que la deformación instantánea. [11]

2.2.2 Hormigón de alta resistencia

Los hormigones de alta resistencia, como su nombre lo indica, se caracterizan por tener mayor resistencia. Estos son sometidos a esfuerzos más altos y por lo tanto a un aumento de su calidad, por lo que hay más beneficios económicos.

Al utilizar hormigón de alta resistencia, se permite la reducción de las dimensiones en una sección de un elemento, con lo cual hay un ahorro significativo en la carga muerta del elemento. Las deflexiones y agrietamientos, que están relacionados con el empleo de miembros esbeltos, pueden ser fácilmente controlados mediante el pre-esfuerzo.

Si se comparan las propiedades mecánicas descritas para los hormigones convencionales, con los hormigones de alta resistencia, se tiene que el módulo de elasticidad es más alto en este último, por lo que reduce cualquier pérdida

de la fuerza pretensora. También tienen una mayor resistencia a la tensión, de tal forma que disminuye la formación de grietas, debido a flexión y al cortante.

Al aplicar hormigones pretensados, se obtiene mayor adherencia, con lo que se reduce la longitud de desarrollo requerida, para transmitir fuerza pretensora de los cables al concreto. La resistencia de los concretos apreciada en los cálculos del diseño y especificaciones, se debe lograr con certeza, ya que los altos esfuerzos debidos a la fuerza pretensora, ocurren realmente [12].

En hormigón pretensado, las pérdidas son producidas por la fuerza de tensado, por lo que se utiliza hormigones de alta resistencia para aprovechar de una mejor manera las propiedades del acero de pre-esfuerzo y del hormigón. Para poder obtener un hormigón de alta resistencia, se debe controlar los materiales, además con el uso de aditivos (superplastificantes), no es difícil llegar a resistencias de 300 - 400 kg/cm².

Los parámetros que se utilizan en estos hormigones para definir sus propiedades son:

1. Resistencia a la compresión,
2. Resistencia a la tracción,
3. Resistencia al corte,
4. Rigidez, a partir del módulo de elasticidad,
5. Retracción o contracción del hormigón,
6. Fluencia lenta o deformación plástica del hormigón. (10)

2.2.2.1 Resistencia a la compresión (f'_c)

La resistencia a la compresión es la característica que mide la calidad del hormigón, la cual se representa como f'_c , que es la que indica la resistencia de probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura. Se obtiene realizando la prueba de compresión uniaxial y está dominada por la relación agua/cemento y por el nivel de compactación, pero también son factores importantes la cantidad de cemento y la granulometría de los agregados[11].

2.2.2.2 Resistencia a la tracción

El hormigón al no ser un material no resiste carga a tracción, por lo que la obtención de la resistencia es más dificultosa que la resistencia a compresión, y la tracción pura es limitada, esta se la debe realizar en el laboratorio mediante el ensayo brasileño.

Lo común es obtener el módulo de ruptura del hormigón f_r dada por la Ec. 2.3, al medir la tracción pura, el mismo que se realiza con viguetas de 15 cm de lado y con una luz de 45.7cm entre apoyos.

$$2\sqrt{f'c} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad \text{Fuente:[13]} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Dicha ecuación se utiliza en hormigón de peso normal, haciéndole depender solo de la resistencia a la compresión, [13].

2.2.2.3 Resistencia al Corte

Al no poder realizar ensayos de corte puro, sin la influencia de otros esfuerzos, el ACI propone $0.53\sqrt{f'c}$;(kg/cm²) en corte y flexión en elementos sin pre-esfuerzo.

Para los elementos con pre-esfuerzo no menor al 40% de la resistencia a la tracción del refuerzo de flexión, se utiliza la Ec. 2.4

$$0.16\sqrt{f'c} + 49 \frac{V_u d_p}{M_u} \quad \text{Fuente: [13]} \quad \text{Ec. 2.4}$$

De la cual $V_u = \text{Fuerza mayorada}$ en la sección, $d_p = \text{distancia de fibra extrema de compresión al centro del acero pre-esforzado}$ y $M_u = \text{Momento mayorado}$.

El valor de la Ec. 2.4 debe ser mayor a $0.53\sqrt{f'c}$, y menor a $1.33\sqrt{f'c}$ [13].

2.2.2.4 Rigidez

Es la capacidad que tienen los elementos para soportar las deformaciones que se producen por una acción. En el hormigón se utiliza el módulo de elasticidad E_c , denominado como rigidez del material.



En la Figura 2.1 se presenta la curva-deformación del hormigón, en donde se observa que está compuesta por una parte elástica (1) y por otra inelástica (2). El valor del módulo de elasticidad (E_c) se obtiene de la Ec. 2.1.

2.2.2.5 Retracción o contracción del hormigón.

La retracción está ligada directamente a la relación agua/cemento, siendo aconsejable bajar al máximo dicha relación y usar áridos bien graduados, con los que se logra disminuir la cantidad de mezcla de cemento, que es la que rellena los vacíos que se forman entre los áridos.

La contracción se da en el secado y en los cambios químicos que efectos de la humedad y tiempo, los cuales son independientes de los esfuerzos a los que está sometido el hormigón, originado principalmente en el endurecimiento [13].

2.2.2.6 Fluencia lenta o deformación plástica del hormigón

Tienen una dependencia directa del tiempo y del esfuerzo permanente que está presente. En los elementos que están sometidos a una fuerza de pretensado, se producen 2 tipos de deformaciones: inicial o inmediata y la que sigue en el transcurso del tiempo, estas son conocidas como deformación elástica y deformación plástica o fluencia lenta, respectivamente.

La deformación elástica como la plástica del hormigón se pueden observar en la Figura 2.2, en el tiempo t_0 , donde se produce el corte de los cables o de carga del elemento con la fuerza permanente de pretensado, t_i corresponde a un tiempo cualesquiera.

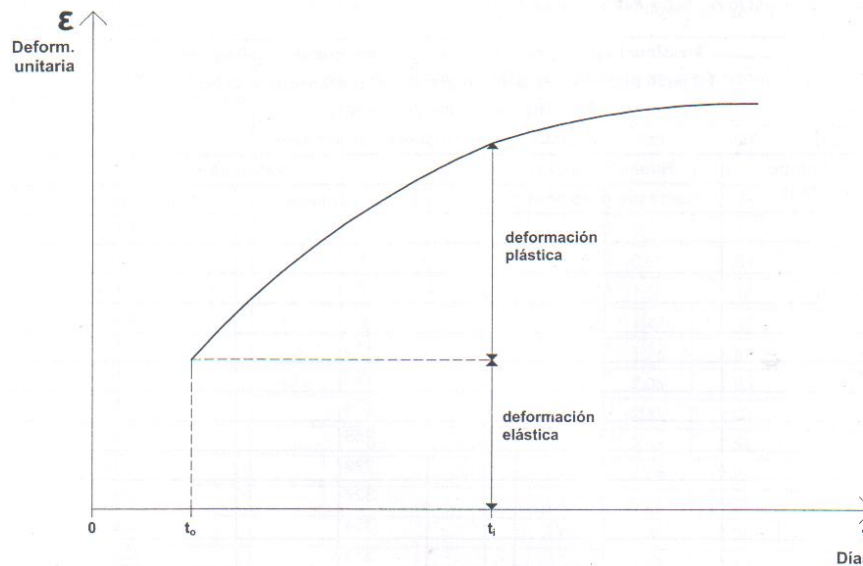


Figura 2.2 Deformación elástica instantánea y deformación plástica, Fuente: [13]

Para este cálculo, se utilizarán las tablas adaptadas del ANEXO I [14], las cuales darán valores promedios para retracción y flujo plástico; tanto la retracción, como el flujo plástico dependen de la relación área/perímetro, la humedad relativa del medio, carga aplicada que incluye la que se va a pretensar, resistencia al hormigón cuando se aplica la carga y también de la cantidad y localización del acero de refuerzo [13].

2.3 Acero de Alta resistencia

El acero es una aleación de hierro y carbono, al que se le adicionan otros elementos, que le confieren propiedades mecánicas, tales como el cobalto, cobre, etc., en los hormigones pretensados se utilizan aceros de alta resistencia, estos deben ser capaces de soportar esfuerzos iniciales muy altos cuando se emplee el pre-esfuerzo.

Para la fuerza del pre-esfuerzo, no se puede utilizar el acero que comúnmente es usado para hormigones convencionales por las deformaciones que se producen en el hormigón, ya que la elongación inicial al tensar el acero se perdería, teniendo en cuenta que ya se han desarrollado aceros con una elongación mayor, los cuales pueden mantener una fuerza de pre-esfuerzo.



Por lo general se utilizan en los hormigones pretensados los aceros en alambres, cables, barras o torón de 7 hilos. Actualmente, se usan cables de baja relajación, concretamente los de 270ksi (kilo libras por pulgada cuadrada) el cual equivale a un esfuerzo mínimo de rotura (f_{pu}) de 19000 kg/cm² y un esfuerzo de mínimo de fluencia de (f_{py}) de 17120 kg/cm² [13].

2.3.1 Características de los cables de pretensado

Las formas de aceros que se emplean como tendones en los concretos preesforzados son tres: alambres, cordones y barras.

2.3.1.1 Alambres

En los alambres el diámetro varía entre 3 a 7mm, tienen un contenido de carbono de 0.7 a 0.85%. Estos se estiran a partir de varillas laminadas en caliente, que luego se calientan a 1000 °C y son enfriados para ser estirados convenientemente; además son estirados en numerosas operaciones, que reducen el diámetro y aumenta la resistencia a la tracción (Alambres Estirados). Estos alambres son almacenados en carretes por lo que al ser desenrollados no se encuentran rectos, siendo necesario realizar el enderezado previo para enhebrarlos dentro de las vainas de pretensados. El enderezado de los alambres se puede realizar por calentamiento por un corto período, mientras son sometidos a altas tensiones, conocidos como relajación normal y relajación baja, respectivamente.

2.3.1.2 Cordones

Se producen mediante el hilado individual de diversos alambres alrededor de un alambre central, están compuestos de siete alambres con diámetros que van de 8 a 18mm. Podemos encontrar dos tipos de cordones:

- Cuando el hilado esta producido con alambre estirado
- O el tratado con calor después de ser hilado para obtener cordones de relajación normal y baja.

2.3.1.3 Barras

Las barras de acero con aleación laminada en caliente pueden tener diámetros desde 20 a 40 mm, son estiradas y luego enfriadas, pero para obtener mejores



propiedades mecánicas, pueden ser corrugadas o lisas y en ambos casos las rocas son empleadas para anclar barras o proveer una unión o acople entre dos barras [12].

2.3.2 Corrosión del acero de pre-esfuerzo

La corrosión se da por un ataque de cloruros, hidrogeno, etc.; que se dan con mayor facilidad a los aceros de pre-esfuerzo que a los normales; cuando los aceros de pre-esfuerzo están sometidos a altas tracciones, este fenómeno se empeora; esto ocurre ya que los aceros carecen de alguna protección por lo que seguramente se rompen. Actualmente, existen técnicas y métodos para el tratamiento de la corrosión en las estructuras. Al realizar pretensados la corrosión se minimiza al utilizar material adecuado y tener condiciones propicias para el trabajo. La forma de contrarrestar este fenómeno se puede encontrar en el código ACI, en donde se indican detalles como: materiales a usarse, recubrimiento mínimos, etc., para la posibilidad de eliminar completamente la corrosión [13].

2.3.3 Relajación del acero de pre-esfuerzo

Al estar sometido a una deformación constante el acero, este sufre una pérdida en su esfuerzo; por lo que se lo denomina relajación del acero. Tiene una semejanza a la fluencia plástica la cual ocurre en el hormigón al transcurrir el tiempo, la diferencia es que en el hormigón se produce un incremento en la deformación y en el acero se produce una pérdida de esfuerzo.

Este fenómeno es no-lineal y tiene un incremento de su magnitud al inicio, el cual va decreciendo con el tiempo. Este se expresa en % (Ec. 2.6) de la pérdida de esfuerzo con relación al inicial; la cual depende directamente de la fuerza de tensado inicial.

$$\Delta f_R = f_{pi} \left(\frac{\log t}{45} \right) \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right)$$

Fuente:[13]

Ec. 2.5

De donde,

f_{py} = Esfuerzo mínimo de Fluencia.

f_{pi} =Esfuerzo Inicial en el acero de pre-esfuerzo.



$$\% \text{Relajación} = \left(\frac{\Delta f_R}{f_{pi}} \right)$$

Ec. 2.6

Fuente:[13]

Se debe considerar la relajación del acero como la retracción y fluencia plástica del hormigón en el cálculo de las pérdidas en la fuerza de pretensado debido al tiempo.[13]

2.3.4 Longitud de desarrollo del acero de pre-esfuerzo

Se le conoce como longitud de desarrollo a la longitud embebida, la cual provoca que la fuerza necesaria para desprender la barra de un bloque de hormigón sea mayor. En el caso de los hormigones pretensados el acero adquiere su fuerza única por adherencia entre cable y hormigón.

La longitud de transferencia en los aceros de pre-esfuerzo es la longitud necesaria para desarrollar toda la fuerza en el cable, permaneciendo constante el esfuerzo y por ende la fuerza de pretensado.

Se recomienda realizar el corte de una forma gradual y no brusca para tener una longitud de transferencia menor.

$$l_d = \left(\frac{f_{se}}{210} \right) d_b + \left(\frac{f_{ps} - f_{se}}{70} \right) d_b$$

Ec. 2.7

Fuente: [13]

De donde f_{se} y f_{ps} son el esfuerzo efectivo luego de las pérdidas y esfuerzo nominal, respectivamente [13].

2.4 Hormigón Pretensado

En los hormigones pretensados, se aplica una fuerza de pre-compresión al elemento para poder reducir o eliminar esfuerzos de tensión no deseables, ya que al no aplicarse esta fuerza, estos estarían presentes. De manera que los distintos agrietamientos con las cargas de servicio pueden ser mínimos o eliminados en su totalidad. Las deflexiones pueden limitarse a valores aceptables, por lo que se pueden diseñar elementos que tengan deflexiones nulas bajo los efectos de la combinación entre carga de servicio y fuerza de pre-esfuerzo. Al controlar las deflexiones y las grietas mediante el pre-esfuerzo, se permite utilizar de manera efectiva y económica los aceros de alta



resistencia en forma de alambres, barras o cordones. Simultáneamente, se pueden utilizar hormigones con resistencias mucho más altas a las normales. Así, el comportamiento del hormigón estructural mejora globalmente al tener un pre-esfuerzo, que puede utilizarse para cargas y luces corrientes ampliando el campo, no solo para luces mayores, sino para la utilización de innovadoras formas estructurales. [15]

2.4.1 Análisis de pérdidas en pretensados

Para el análisis de pérdidas, partimos de la fuerza que se aplica para pre-esforzar un elemento, que puede mermar con el tiempo, produciendo una disminución en su capacidad de resistencia, por lo que se calculan las pérdidas hasta 5 años, ya que luego de esto se vuelven despreciables [13].

Para poder determinar las pérdidas, no existe un cálculo exacto, por lo que son muy difíciles de entender, puesto que algunos factores que se utilizan son difíciles de conocer con precisión, pero es indispensable para obtener un diseño seguro y confiable; de allí que hay que tener una idea clara de las pérdidas en los elementos estructurales. Las pérdidas pueden ser instantáneas; es decir, al momento de transmitir la fuerza de pre-esfuerzo y en el momento cuando el diseñador cree importante.

Tabla 2.6 Pérdidas de la fuerza de pretensado, Fuente:[13]

	Hormigón	Acero
Instantáneas	- Acortamiento elástico instantáneo por la fuerza de pretensado	- Corrimiento y ajuste de las cuñas de pretensar
Diferidas con el tiempo	- Retracción del hormigón - Fluencia plástica del hormigón	- Relajación del acero

En algunos códigos, recomiendan valores para poder realizar un control sobre las pérdidas en la fuerza del pretensado de los cables, por ejemplo en el código PCI [14] en donde los valores son de 1.760 a 3.520 kg/cm², en el AASHTO[16] el valor de la suma total de pérdidas para torones y en condiciones normales es de 3.170 kg/cm² con un hormigón de 350 kg/cm², [13].

Las pérdidas se pueden calcular por la Ec. 2.8; las cuales se describen una a una a continuación:

$$\Delta f_{pt} = \Delta f_{pa} + \Delta f_R + \Delta f_{pe} + \Delta f_{cr} + \Delta f_{cf} \quad \text{Fuente: [13] Ec. 2.8}$$

2.4.1.1 Pérdidas por el acortamiento instantáneo del hormigón. (Δf_{pe})

Se produce al introducir una fuerza de compresión al hormigón; por ejemplo, cuando los aceros de pre-esfuerzo producen una fuerza, lo que acorta los cables que están embebidos en el hormigón, disminuyendo la fuerza de pretensado.

La determinación de la elongación o alargamiento de los cables de pretensado, está dada por la ley de Hooke:

La pendiente de la curva esfuerzo-deformación

$$E_p = f_{pi} / \varepsilon \quad \text{Fuente: [13] Ec. 2.9}$$

La cual al sustituir f_{pi} por P_i / A_p y ε por δ / L ; se obtiene la fórmula para poder calcular la elongación:

$$\delta = \frac{f_{pi} L}{E_p} \quad \text{Fuente: [13] Ec. 2.10}$$

Ahora la deformación unitaria del hormigón viene dada por:

$$\varepsilon_c = \frac{P_i}{A_c E_c} \quad \text{Fuente: [13] Ec. 2.11}$$

Esta está en función de la fuerza inicial de pretensar P_i , del módulo de elasticidad de hormigón y del área de la sección transversal, ya que el acero sufre el mismo acortamiento, entonces la pérdida es:

$$\Delta f_{pe} = E_p \varepsilon_c \quad \text{Fuente: [13] Ec. 2.12}$$

Reemplazando la deformación del hormigón obtenido:

$$\Delta f_{pe} = n f_c \quad \text{Fuente: [13] Ec. 2.13}$$



De donde n es la relación del módulo del acero de pre-esfuerzo (E_p) y del módulo del hormigón (E_c), f_c es el esfuerzo promedio del hormigón. Ya que f_c varia linealmente desde el centro de gravedad hasta el extremo de la sección y el acortamiento que interesa es de los cables de pretensar; entonces, se debe encontrar el esfuerzo del hormigón a la altura de los cables. La distancia existente entre el centro de gravedad de la sección y la que están los cables se llama excentricidad “e”. El valor de f_{cp} que es el valor del esfuerzo en el hormigón, a la altura de la excentricidad, tiene la siguiente fórmula (Ec. 2.14) [13].

$$f_{cp} = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2}\right) + \frac{e M_D}{I_c} \quad \text{Ec. 2.14}$$

Fuente: [13]

De donde:

P_i = Fuerza de Pretensar

A_c = Área del hormigón.

I_c = Inercia.

r = Radio de giro.

e = distancia del centro de gravedad de la sección a la que está el cable.

M_D = Momento Flector por peso propio.

La pérdida por acortamiento instantáneo del hormigón es:

$$\Delta f_{pe} = n_i * f_{cp} \quad \text{Fuente: [13]} \quad \text{Ec. 2.15}$$

2.4.1.2 Pérdidas por corrimiento y ajuste de cuñas. (Δf_{pa})

Esto ocurre en las cuñas de anclaje, produciendo un pequeño corrimiento cuando se trasfiere la fuerza del gato hidráulico al anclaje. Las cuñas, que sostienen los cables, se deslizan una distancia pequeña antes que el toro quede amordazado. Tomando en cuenta el AASHTO[16] dice que este corrimiento puede estar en 3mm a 10mm, considerando el equipo usado; por lo que se toma en cuenta el momento de fabricación o en la especificación dada por el constructor de la cuña.



La deformación unitaria ε en (cm/cm) que está en los cables, para su cálculo, depende del corrimiento total (ν) y de la longitud total del cable entre anclajes (L).

$$\varepsilon = \frac{\nu}{L} \quad \text{Fuente:[13] Ec. 2.16}$$

Por tanto, el esfuerzo que se pierde en el pre-esfuerzo será:

$$\Delta f_{pa} = E_p \frac{\nu}{L} \quad \text{Fuente:[13] Ec. 2.17}$$

Es importante conocer este tipo de pérdida, ya que cuando la longitud del cable a tensar es corta y se elimina toda la fuerza del pretensado; el resultado es depreciable en grandes longitudes, [13].

2.4.1.3 Pérdidas por retracción del hormigón. (Δf_{cr})

Como ya se explicó en 2.2.2.5, pueden ser resultados del fraguado y de los cambios químicos, los cuales dependen de la humedad y del tiempo; es decir; por las cantidades que se utilizan en la mezcla producida por la clasificación de los agregados, tipo y cantidad de cemento, etc. Casi el 80% de la retracción se da en el primer año, por lo que la retracción última es de 780×10^{-6} considerando lo indicado en el ACI 209 R-92 [17].

Al tener un acortamiento en el hormigón, la misma que se da en el acero de pre-esfuerzo; se produce una disminución en el esfuerzo del acero, cuyo valor viene dado por:

$$\Delta f_{cr} = \varepsilon_r E_p \quad \text{Fuente:[13] Ec. 2.18}$$

Donde; ε_r es la deformación unitaria por retracción, la cual se necesita conocer en un tiempo para así determinar las pérdidas, esto comúnmente se puede hacer en el final.

El PCI [14] considera un valor de la deformación unitaria última de 8.2×10^{-6} cm/cm, lo cual se lo modifica con la relación al volumen/superficie y por la humedad relativa (HR), dada la siguiente fórmula:

$$\Delta f_{cr} = 8.2 \times 10^{-6} E_p \left(1 - 0.0236 \frac{v}{s}\right) (100 - HR)$$

Ec. 2.19

Fuente:[13]

[13].

2.4.1.4 Pérdidas por fluencia plástica del hormigón. (Δf_{cf})

Estas pérdidas se producen al existir un esfuerzo o carga permanente, la cual varía con el tiempo y depende del valor de la carga aplicada; siendo en este caso el pre-esfuerzo.

De igual manera, influyen los mismos factores que ya se han explicado en 2.2.2.5 por ejemplo: el fraguado del hormigón, cambios químicos, los cuales dependen del tiempo y la humedad del medio, etc. Para los hormigones pretensados la fórmula para calcular las pérdidas de los aceros de pre-esfuerzo es: (Ec. 2.20).

$$\Delta f_{cf} = C_t \frac{E_p}{E_c} f_{cp}$$

Ec. 2.20

Fuente:[13]

el valor de C_t es el coeficiente de deformación plástica, que está en función de la edad t en años y C_u es la relación entre la deformación unitaria por flujo plástico y elástico instantánea que esta entre 2 a 4, utilizando un promedio de 2.35 en la deformación final [13].

$$C_t = \frac{t^{0.60}}{10 + t^{0.60}} C_u$$

Ec. 2.21

Fuente:[13]

2.4.1.5 Pérdidas por relajación del acero de pre-esfuerzo. (Δf_R)

Las pérdidas por relajación se dan con el transcurso del tiempo; produciéndose por la elongación constante a la cual están sometidos, en función directamente proporcional al tiempo y relación del esfuerzo inicial, que actúa en el pre-esfuerzo con la relación la esfuerzo de fluencia (f_{pi}/f_{py}).

En el acero de pre-esfuerzo, los esfuerzos de tracción están restringidos en el ACI:



- Debido a la fuerza del gato de pre-esforzado a $0.94 f_{py}$, pero no mayor que el mínimo entre $0.80 f_{pu}$ y el máximo valor recomendado por el fabricante del acero de pre-esforzado o de los dispositivos de anclaje.
- Inmediatamente, después de la transferencia de pre-esfuerzo $0.82 f_{py}$ pero no mayor que $0.74 f_{pu}$.

Los valores de relajación del pre-esfuerzo se encuentran aplicando la fórmula de la Ec. 2.22 , o bien el fabricante puede proporcionar dicha información.

$$\Delta f_R = f_{pi} \left(\frac{\log t}{45} \right) \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0.55 \right) \quad \text{Ec. 2.22}$$

Fuente:[13]

Es importante conocer que en el momento último en flexión, las pérdidas de pre-esfuerzo no son perjudiciales; ya que el acero de pre-esfuerzo trabaja a su límite de fluencia, las que afectan el comportamiento estructural de elementos con la presencia de cargas de servicio y en el régimen elástico, donde se producen esfuerzos en los materiales y con esto deflexiones, contraflechas, cargas de fisuración, etc. [13]

2.4.2 Tipo de Anclajes

La adherencia entre barra y hormigón se obtiene mediante tres mecanismos: reacción química en la interface hormigón-acero, retracción del hormigón y corrugas. El anclaje se lo realiza entre las barras de armadura pasiva que están ancladas en el hormigón en zonas alejadas, donde se requiere su colaboración a tracción, permitiendo transmitir las tensiones a la masa de hormigón.

Se conoce como esfuerzo de extracción (P), al esfuerzo que se produce cuando se introduce una barra de acero en un bloque de hormigón, y luego extraerla cuando el hormigón ha endurecido. Este esfuerzo es mayor dependiendo de cuánto se haya introducido la barra en el hormigón. El valor límite de P es la resistencia a tracción y se determina mediante la Ec. 2.23.

$$P_{max} = A_s * f_y \quad \text{Fuente:[18] Ec. 2.23}$$

La longitud mínima necesaria para que P sea igual a $A_s * f_y$ se la conoce como longitud de anclaje.

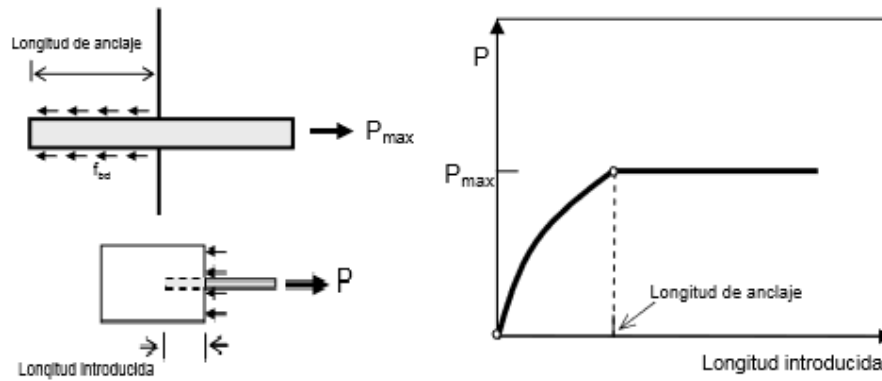


Figura 2.3. Longitud de Anclaje, Tensión última de Adherencia, Adaptado: [18]

Para la longitud de anclaje influyen algunos factores: calidad del acero y de hormigón, tipo de anclaje utilizado y la zona de hormigón que se considera. Si es de mejor calidad el hormigón, se tendrá menor longitud de anclaje; mientras cuanto mejor sea el acero, la longitud de anclaje será mayor.

Hay que tener en cuenta tanto las zonas buenas para realizar la adherencia, como las zonas deficientes; por lo que para zonas de buena adherencia podemos considerar:

- Si las barras tienen una inclinación de 45° a 90° con la horizontal.
- En caso de que la barra tenga una inclinación de 0 a 45° , se considera de buena adherencia. Si la pieza tiene menos de 250mm de espesor en dirección al hormigonado, las barra está en la mitad inferior de la pieza o más de 300mm de la superficie superior[18].

Cuando las barras no presentan una buena posición para la adherencia, se considera que tienen una adherencia deficiente. Los tipos de anclajes que se muestran en la Figura 2.4 se utilizan para trabajar a tracción, de los cuales se tienen: por prolongación recta, por patilla, por gancho, por gancho en U y mediante barras transversales soldadas. Para evitar la degradación del hormigón y del acero durante su función, los diámetros internos y patillas deben cumplir unos valores mínimos. [18]

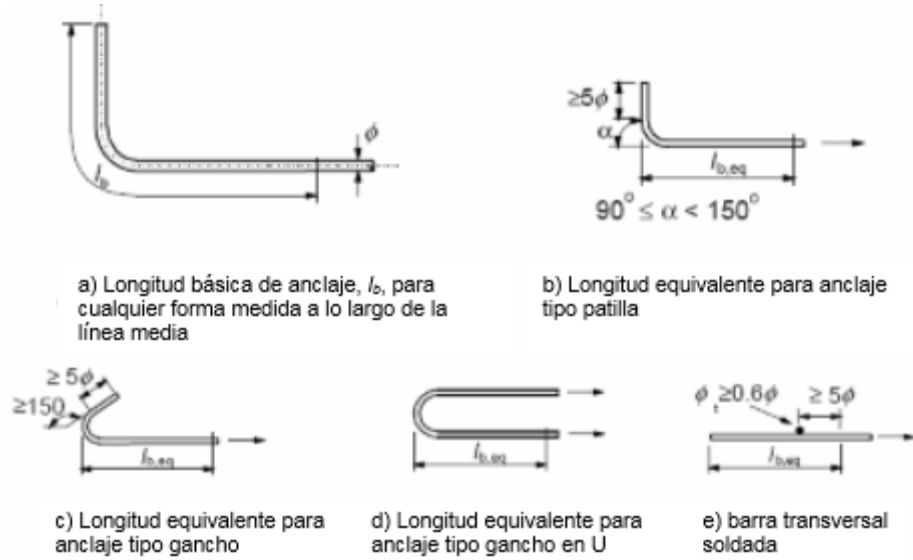


Figura 2.4. Tipos de Anclajes, Adaptado: [18]

Capítulo III: METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO

3.1 Pre dimensionamiento del tanque de gas licuado de petróleo

Para el pre dimensionamiento del tanque de gas licuado de petróleo, se inicia imponiendo el volumen de almacenamiento, que será de 35.000 m³. La estructura del tanque está compuesta de una altura de 20m y un radio de 25m, además de estas dimensiones es necesario identificar la altura efectiva de 18m la cual es la altura que contiene el gas licuado de petróleo. Los elementos para el análisis del tanque están basados en los datos presentados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros para pre dimensionamiento de elementos pretensados más usuales, con peraltes y luces de mayor uso. Fuente:[13]

$0.40 \leq h(m) \leq 1.50$
$b(m) \geq 0,25$
b/h
$b/h \geq 0,3$

La longitud del tanque es de 156.10 m, para lo cual se ha dividido en 10 partes formando un ángulo de 36° con una longitud de 15.61m. Con estos datos establecidos se realizará el análisis del tanque superficial para gas licuado de petróleo.

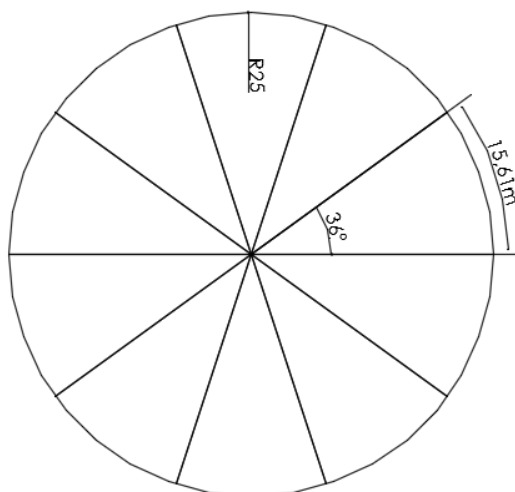


Figura 3.1. Pre dimensiones de Tanque de gas licuado de petróleo.

3.2 Análisis de esfuerzos externos

Para el análisis de los esfuerzos externos a los cuales está sometido el tanque debido al gas licuado de petróleo, solo se considerara el empuje que ejerce dicho gas en las paredes del mismo; la distribución se incrementara proporcionalmente y de forma triangular desde la altura máxima hacia la base.

Para obtener los esfuerzos generados por el empuje del gas licuado de petróleo se tomará en cuenta la siguiente ecuación:

$$F. \text{ externa} = \gamma * h \quad (\text{kg/m}) \quad \text{Ec. 3.1}$$

Para completar el análisis de cargas, se tomará en cuenta el código [19] ACI 318, capítulo N°9 sección 9.2, que indica la combinación de cargas para estructuras que soportan presiones de fluidos igual a:

$$1.4*CM+1.4*F \quad \text{Ec. 3.2}$$

En base a los resultados obtenidos, se modeló el tanque de almacenamiento de gas licuado de petróleo en el software Sap 2000, en el cual se muestra como la presión del gas afecta a las paredes del tanque; por lo que es necesario lograr que las fuerzas externas lleguen a un equilibrio con las fuerzas internas. Para mayor precisión en el diseño, se realizó un análisis de discretización de 1m en largo y ancho, como se observa continuación:

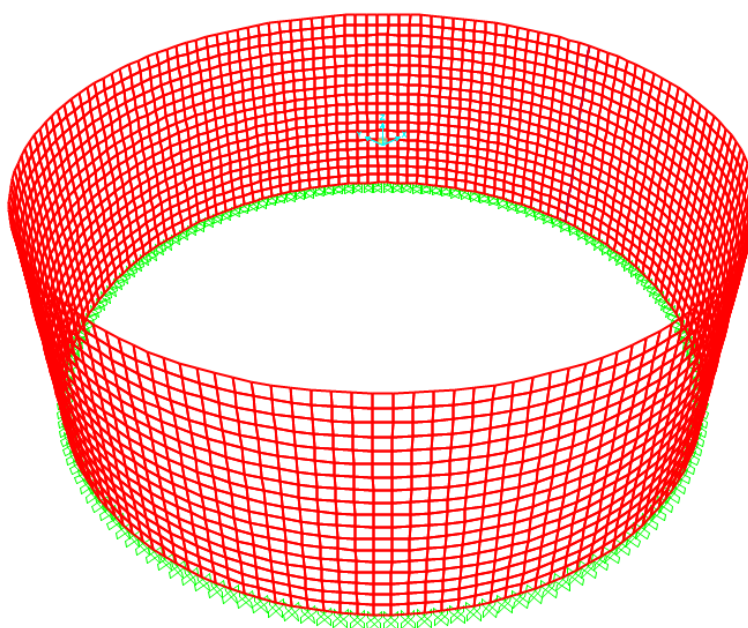


Figura 3.2 Modelamiento del Tanque de gas licuado de petróleo

Mediante el software Sap 2000, a partir del modelamiento del tanque, se puede observar como la presión del líquido afecta a las paredes del tanque, lo que indica de manera visual el punto más crítico de la estructura y que por ende, necesitará un mayor refuerzo, de forma que se puedan controlar las deformaciones excesivas en estos puntos.

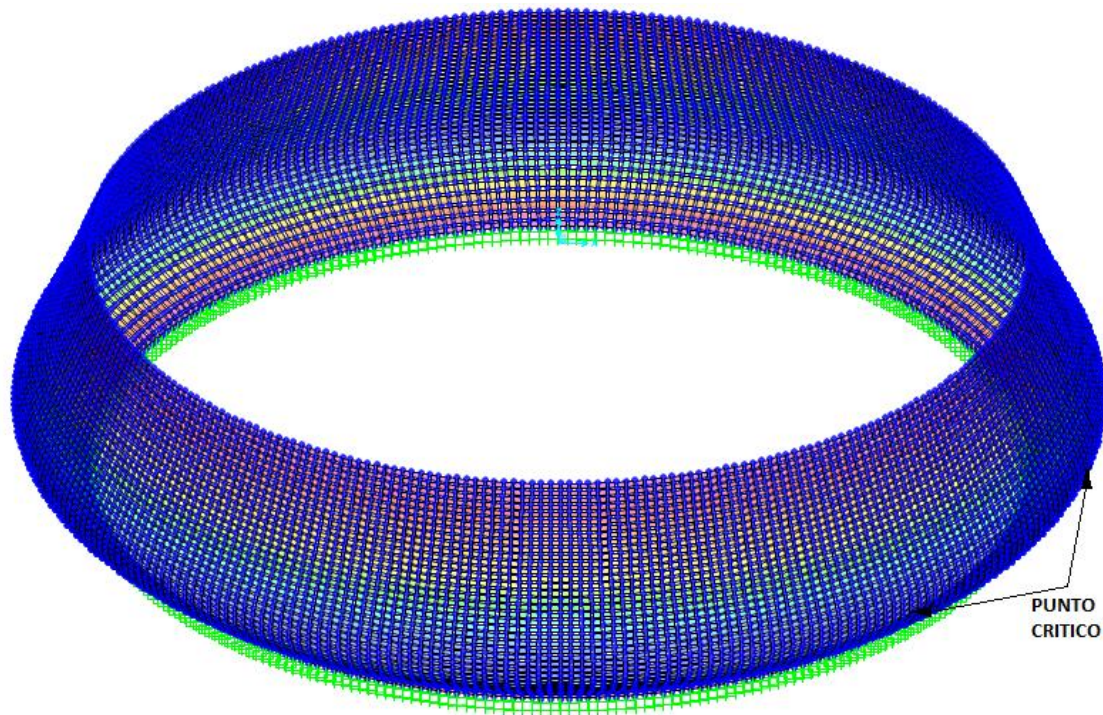


Figura 3.3 Presión del líquido en las paredes del tanque.

3.3 Análisis de esfuerzos internos

Este análisis consiste en llegar a un equilibrio de fuerzas internas (F) y fuerzas externas (Q) que son las que se generan por la presión del líquido almacenado, esto se presenta en la siguiente ecuación:

$$F. Internas - F. Externas = 0 \quad \text{Ec. 3.3}$$

La fuerza interna (Ec. 3.4), está en función del radio de curvatura y de la fuerza inicial con la que se tensan los cables (P). A partir de esta fuerza, se podrá determinar el trazado que tomarán los cables al momento de pretensarlos.

$$F = \frac{P}{\rho} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Fuente:[20]

El radio de curvatura (ρ) está en función de los diferenciales ds (longitud de arco) y $d\theta$ (ángulo); es necesario tomarlos en cuenta ya que las deformaciones que se produce son considerables.

Debido a que las paredes del tanque son tramos curvos y se encuentran en función de los diferenciales dx , $d\theta$ como se observa en la Figura 3.4, se considerará el uso de coordenadas polares en lugar de rectangulares.

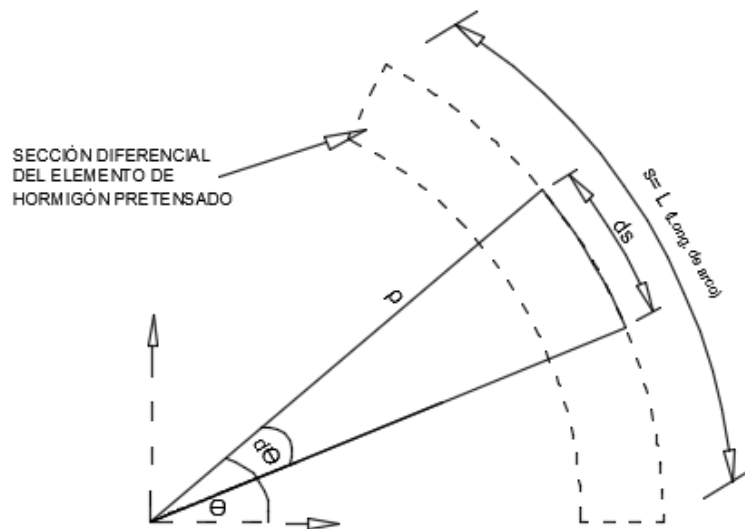


Figura 3.4. Elemento diferencial, Radio de curvatura.

Entonces, para encontrar el trazado, así como la fuerza de pretensado inicial del cable, se tomará en cuenta (Figura 3.5),

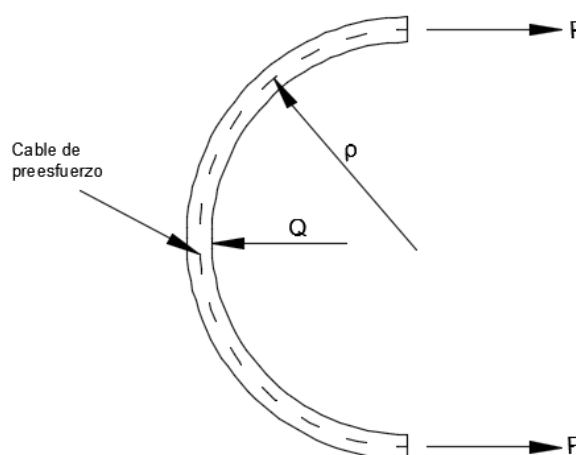


Figura 3.5 Equilibrio de fuerzas internas (P) y fuerzas externas (Q).

Partiendo de esto, se reemplazará la fuerza interna en función de (P, ρ) .

$$Q = \frac{P}{\rho} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Y, el radio de curvatura $\rho = ds/d\theta$, para obtener:

$$\frac{ds}{d\theta} = \frac{P}{Q} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Resolviendo la Ec. 3.6 analíticamente, se obtendrá la ecuación (Ec. 3.7) que representa en términos generales el trazado que tendrá el cable dentro del elemento pretensado, así:

$$s(\theta) = \frac{P}{q} \theta + C_1 \quad \text{Ec. 3.7}$$

La constante de integración C_1 de la Ec. 3.7, se determinará en base a las condiciones iniciales en las que se encuentra el elemento analizado, las cuales están en función de la longitud de arco (s) y el ángulo (θ) que conforma cada elemento.

Además, es necesario ubicar el punto de origen para determinar las condiciones iniciales y encontrar la constante de integración. Para ello, el punto del origen del trazado será $(0,0)$ y el radio 24.85, valores con los que se calculará la longitud del arco. (Ver Figura 3.6) A partir de esto se podrán confirmar las condiciones iniciales, $s = a$ y $\theta = b$, ya que si se reemplazan en Ec. 3.7 permitirán determinar el valor de la constante C_1 :

$$C_1 = a - \frac{b * P}{Q} \quad \text{Ec. 3.8}$$

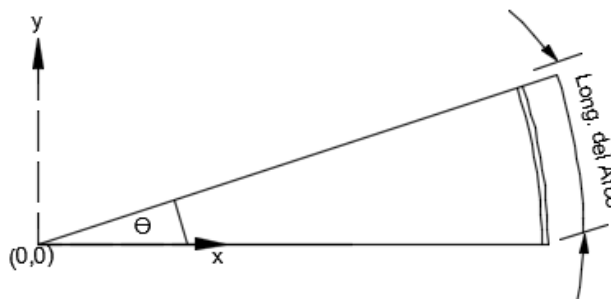


Figura 3.6 Características de la longitud de arco



Al obtener el valor de $C1$ (Ec. 3.8), se reemplazará en la ecuación (Ec. 3.7) obteniendo una nueva ecuación (Ec. 3.9), determinando el trazado que generará el cable a partir del pretensado:

$$s(\theta) = \frac{P}{q} \theta + a - \frac{b * P}{Q} \quad \text{Ec. 3.9}$$

A partir de esto, se puede determinar la fuerza de pretensado inicial, para ello se propondrá una condición que deberá cumplir esta fuerza, que está dada en la mitad de la longitud de arco, por ser el único punto que está equidistante en toda la longitud; con esto las condiciones serán: $s=d$ y $\theta = e$, donde $d= s/2$ y el $e= \theta/2$, donde θ es el valor del ángulo de cada tramo, respectivamente.

Estas condiciones obtenidas serán sustituidas en la ecuación (Ec. 3.9) para así obtener una nueva expresión (Ec. 3.10), que se resolverá analíticamente para obtener el valor de la fuerza del pretensado inicial (p).

$$d = \frac{P}{q} e + a - \frac{b * P}{Q} \quad \text{Ec. 3.10}$$

$$P = \frac{Q(a - d)}{(b - e)} \quad (kg) \quad \text{Ec. 3.11}$$

Reemplazando en la Ec. 3.5, el valor del pretensado inicial y del radio de curvatura, se puede determinar la fuerza interna.

Como ya se describió en la sección 2.4.1, las pérdidas que se producen en los elementos pretensados, deberán ser determinadas ya que estas afectarán a la fuerza del pretensado inicial, dando lugar a la reducción en las fuerzas internas.

Por lo que en base a todo lo obtenido, se determina que al ir aumentando el número de torones se logrará un equilibrio de fuerzas en el tanque.

3.3.1 Resistencia A Cortante

Es importante verificar la resistencia al cortante, considerando que el elemento es una viga empotrada en un extremo con carga distribuida, donde el cortante más crítico se dará a 0.30cm del empotramiento, se puede verificar si el

hormigón utilizado es capaz de resistir el esfuerzo a cortante producido por el elemento empotrado o se debe colocar acero de refuerzo (transversal).

Para obtener la resistencia a cortante del hormigón se utiliza la Ec. 3.12,

$$\phi V_c = \phi \left(0.16 \lambda \sqrt{f'_c} + 49 \frac{V_u d_p}{M_u} \right) b_w d \quad (\text{kg}) \quad \text{Ec. 3.12}$$

Con la cual se debe verificar si es mayor, a la resistencia a cortante producida por la presión del gas licuado de petróleo (Ver Figura 3.7), el análisis se realizará en la sección donde existe una mayor carga ejercida por el líquido.

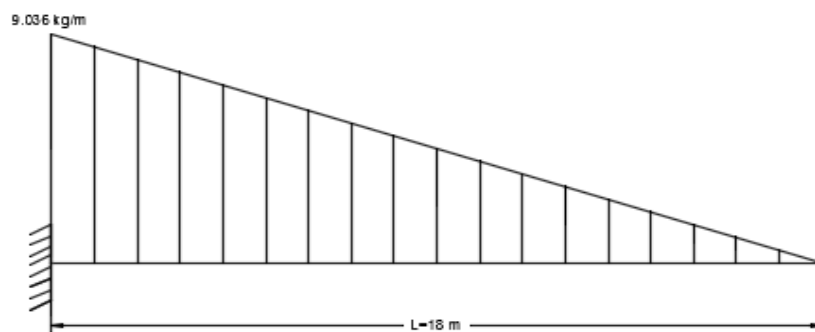


Figura 3.7. Diagrama de fuerzas distribuidas para una viga empotrada.

En la Tabla 4.6 se puede observar que la resistencia al cortante del hormigón es mayor a la resistencia ejercida por el gas licuado de petróleo, por lo que no es necesario el diseño de acero transversal.

3.3.2 Análisis de Losa de contrapiso

Para el análisis de la losa de contrapiso se utilizó el software Sap 2000, para el modelamiento de la losa, se observa cómo actúa la carga muerta de las paredes del tanque y el gas licuado de petróleo, además se puede apreciar en la Figura 3.8.b, los puntos donde actúa la carga de la pared en color celeste y como va disminuyendo al acercarse al centro del tanque.

Utilizando la misma combinación de cargas descrita en 3.2, en la Figura 3.8.a, se observa el tanque modelado, realizando el estudio de las fuerzas en cada metro para poder obtener un análisis de momentos y fuerzas cortantes aproximado al real.

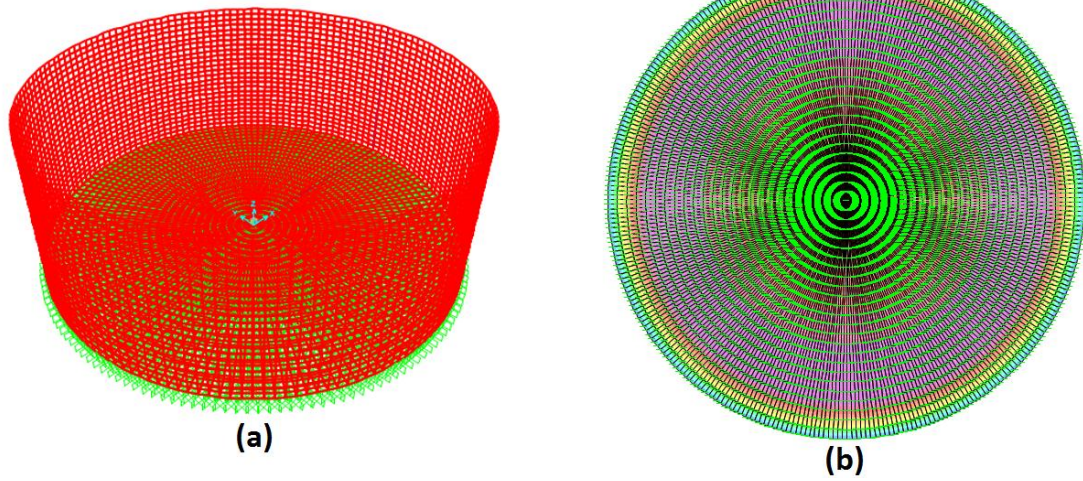


Figura 3.8 Modelamiento de Losa de contrapiso.

Capítulo IV: ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 Análisis de las fuerzas de pretensado

4.1.1 Pre dimensionamiento del Tanque

Para el pre dimensionamiento de los elementos de hormigón pretensado, se han de considerar las siguientes dimensiones: 1m de alto y 0.30m de ancho, basados en la Tabla 3.1.

En la siguiente figura

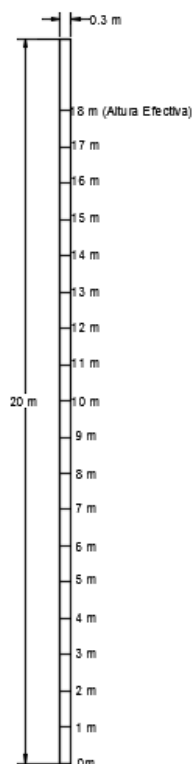


Figura 4.1 Pre dimensionamiento de Elementos para análisis de tanque pretensado superficial.

4.1.2 Fuerzas Externas

En base a los análisis realizados en el Capítulo 3 y considerando que el peso específico para el gas es de 502 kg/m^3 , del que se obtienen las fuerzas externas que produce el gas licuado de petróleo, se considerará la Ec. 3.1 para obtener la siguiente distribución de los esfuerzos.

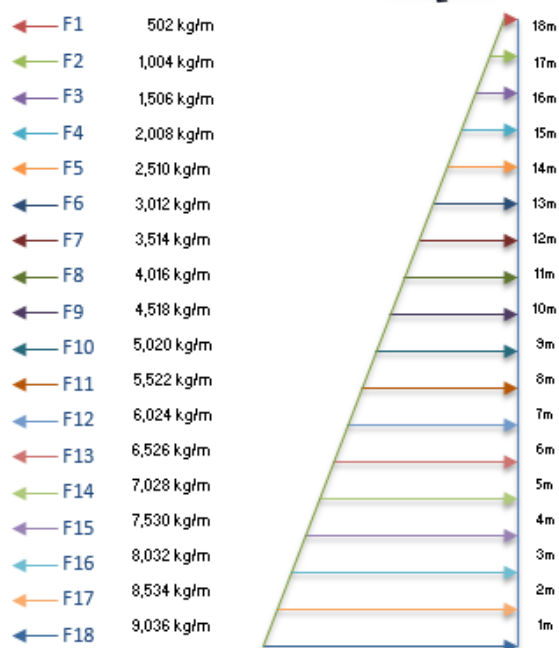


Figura 4.2. Distribución de las presiones del gas en las paredes del tanque.

Como se observa en la Figura 4.2, la presión que ejercida por el gas licuado de petróleo en su máxima altura es de 502 kg/m , y aumenta proporcionalmente al llegar a la base con un valor de 9.036 kg/m .

4.1.3 Fuerzas Internas

Consiste en determinar el trazado que deben tomar los cables al aplicar una fuerza de pretensado inicial, para ello se utiliza la Ec. 3.9 y además se considerará la acción de la fuerza externa a $1/10$ de la altura del tanque. En base a esto se obtuvieron los siguientes resultados:

CURVA	
θ	s
0	0.00
0.16	3.90
0.31	7.81
0.47	11.71
0.63	15.61

Tabla 4.1 Resultados del trazado para los cables de preesfuerzo.

Con los datos de la Tabla 4.1 se puede graficar el trazado del cable, el cual será el mismo, en cualquier parte de los elementos de hormigón pretensado.

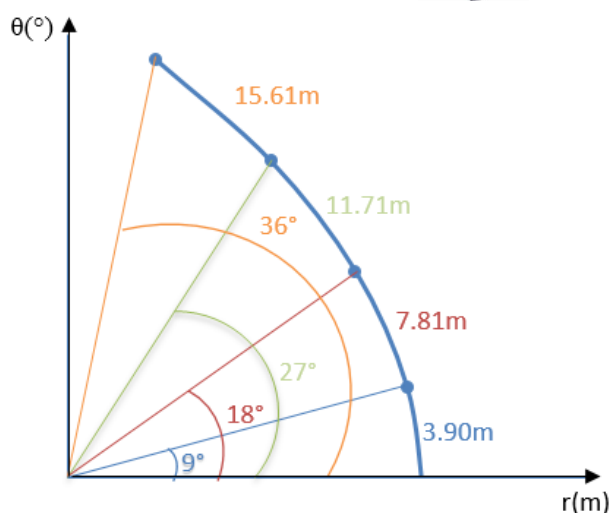


Figura 4.3 Trazado del cable de pretensado.

La fuerza de pretensado inicial con la que se va a tensar los cables, está dada por la Ec. 3.11 y tiene un valor de $P=22.450 \text{ kg}$, con un esfuerzo inicial de pretensado $F_{pi}=24.165 \text{ kg/cm}^2$.

Partiendo de la fuerza de pretensado, se ha de calcular la fuerza interna por medio de la Ec. 3.4, calculando primero las pérdidas que se producen en el acero de pre-esfuerzo, las que se desarrollan tanto en el hormigón como en el acero.

Para realizar el análisis de las pérdidas es importante definir algunas características que pueden ser impuestas como son: el hormigón a utilizarse en el análisis de un tanque de gas licuado de petróleo de $f'_c= 400 \text{ kg/cm}^2$, por ser considerado un hormigón de alta resistencia a la compresión inicial al momento de cortar los cables de $f'_{ci}= 280 \text{ kg/cm}^2$, con un módulo de elasticidad $E_c=30200 \text{ kg/cm}^2$ y de $E_{ci}= 252671 \text{ kg/cm}^2$ respectivamente.

Por lo tanto las pérdidas serán: por acortamiento elástico instantáneo 69.9 kg/cm^2 , corrimiento y ajuste de cuñas 838.8 kg/cm^2 , retracción del hormigón 477.4 kg/cm^2 , fluencia plástica del hormigón 123.8 kg/cm^2 , relajación del acero de preesfuerzo 2147.2 kg/cm^2 , como se puede observar en la Tabla 4.2; además de los porcentajes de pérdida con relación a la fuerza de pre-esfuerzo inicial del acero.



RESUMEN PERDIDAS EN LA FUERZA DE PREESFUERZO		
Perdidas últimas o finales en el acero de preesfuerzo	L=	15.61m
	kg/cm ²	%
Acortamiento Elástico instantaneo	69.9340999	0.29%
Corrimietno y ajuste de Cuñas	832.80	3.45%
Retracción del hormigón	477.366154	1.98%
Fluencia plástica del hormigón	123.822409	0.51%
Relajación del acero de preesfuerzo	2147.24	8.89%
TOTALES	3651.16142	15.11%

Tabla 4.2 Pérdidas en la fuerza de preesfuerzo.

El total de las pérdidas es de 3651.16 kg/cm^2 , la que se restará del esfuerzo inicial de acero de pre-esfuerzo. Al utilizar la Ec. 3.4, se obtendrá como fuerza interna $F=1200 \text{ kg/m}$ y una fuerza de pretensado inicial de $P=22499 \text{ kg}$.

Los cables a utilizarse serán de 7 hilos, con un diámetro de 0.929 cm^2 y una fuerza de ruptura de $F_u=17.940 \text{ kg/cm}^2$, de los cuales se obtendrá una fuerza de 16.350 kg/m . Esta es la fuerza que soportará un cable, por lo cual dependerá del número de cables necesarios para que la fuerza interna sea mayor a la externa.

Como se describe en la sección 2.1.2 el factor de seguridad que se utilizará para el análisis de tanques de almacenamiento de gas licuado de petróleo será de 4, determinando cuanto mayor debe ser la fuerza interna, la que estará en función de la fuerza que producen los cables pretensados y que deberá ser mayor en relación a la externa.

En la Tabla 4.3 se puede observar como el acero de pre-esfuerzo, al aumentar el número de cables aumenta la fuerza interna, la cual debe ser mayor a la fuerza exterior producida por el gas licuado de petróleo

EQUILIBRIO ENTRE FUERZAS INTERNAS Y FUERZAS EXTERNAS					
ALTURA(m)	#CABLES	F INTERNA TOTAL		F EXTERNA TOTAL	
		F _{ui}		Q	
1	3	49051.2	kg/m	9036	kg/m
2	3	49051.2	kg/m	8534	kg/m
3	2	32700.8	kg/m	8032	kg/m
4	2	32700.8	kg/m	7530	kg/m
5	2	32700.8	kg/m	7028	kg/m
6	2	32700.8	kg/m	6526	kg/m
7	2	32700.8	kg/m	6024	kg/m
8	2	32700.8	kg/m	5522	kg/m
9	2	32700.8	kg/m	5020	kg/m
10	2	32700.8	kg/m	4518	kg/m
11	1	16350.4	kg/m	4016	kg/m
12	1	16350.4	kg/m	3514	kg/m
13	1	16350.4	kg/m	3012	kg/m
14	1	16350.4	kg/m	2510	kg/m
15	1	16350.4	kg/m	2008	kg/m
16	1	16350.4	kg/m	1506	kg/m
17	1	16350.4	kg/m	1004	kg/m
18	1	16350.4	kg/m	502	kg/m

Tabla 4.3 Fuerza Interior vs. Fuerza Exterior

La relación para obtener el factor de seguridad calculado está dada por fuerza interna para la fuerza externa, teniendo que ser mayor el factor de seguridad calculado que el factor de seguridad de la sección 2.1.2, la cual se puede observar en la Tabla 4.4.

ALTURAS (m)	$\frac{FUERZA\ INTERNA}{FUERZA\ EXTERNA} > 4$	
1	5.43	CUMPLE
2	5.75	CUMPLE
3	4.07	CUMPLE
4	4.34	CUMPLE
5	4.65	CUMPLE
6	5.01	CUMPLE
7	5.43	CUMPLE
8	5.92	CUMPLE
9	6.51	CUMPLE
10	7.24	CUMPLE
11	4.07	CUMPLE
12	4.65	CUMPLE
13	5.43	CUMPLE
14	6.51	CUMPLE
15	8.14	CUMPLE
16	10.86	CUMPLE
17	16.29	CUMPLE
18	32.57	CUMPLE

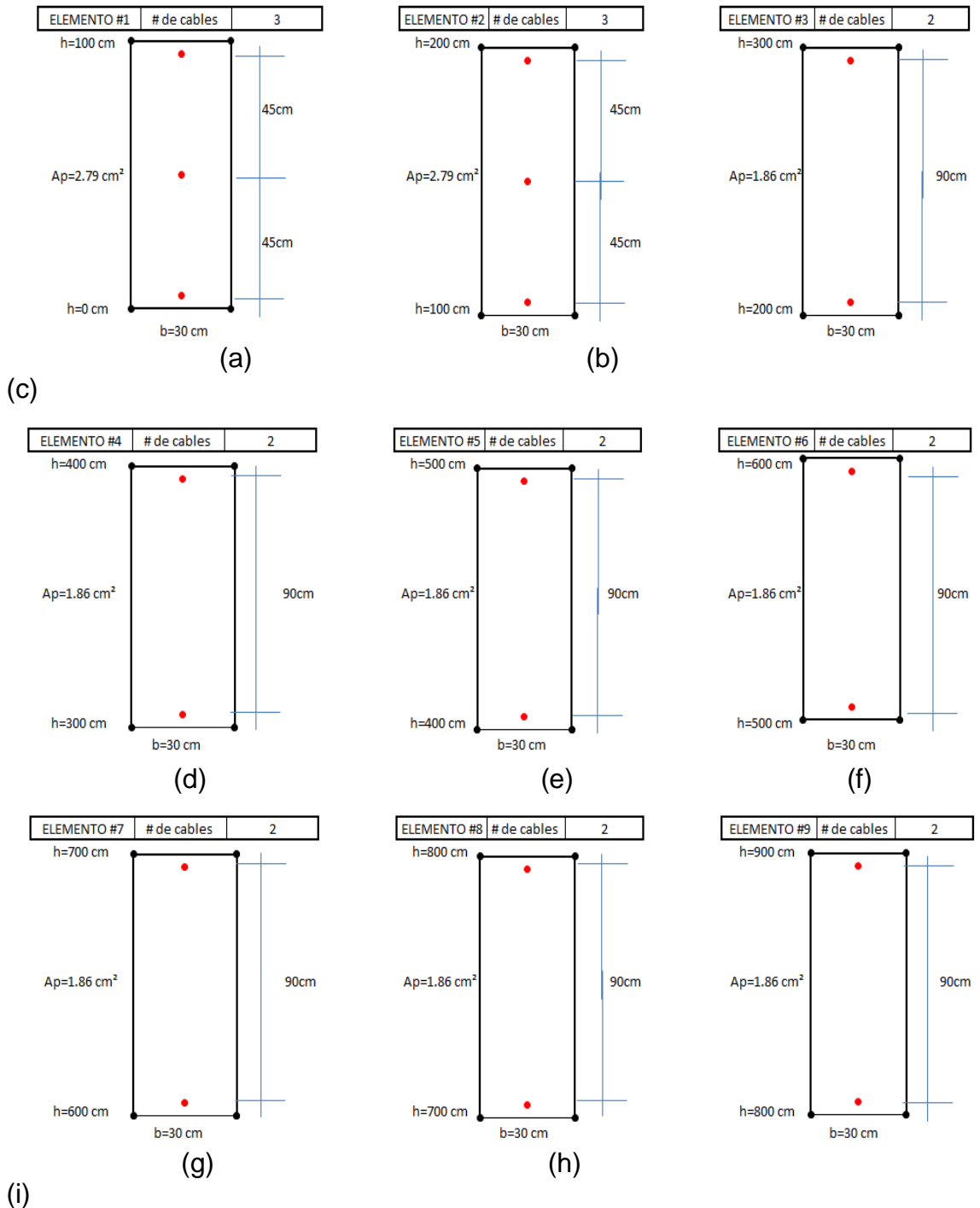
Tabla 4.4 Comparación entre Factor de Seguridad y Fuerzas Internas, Externas.

Al verificar que se cumpla el parámetro del factor de seguridad, se procederá a realizar la distribución de los cables en los elementos de hormigón pretensado.



Los que van variando al incrementar la altura hasta llegar hasta la altura efectiva de 18m como se puede observar en la Figura 4.1. De la cual se obtendrán los siguientes resultados:

DISTRIBUCION DE CABLES EN ELEMENTOS PRETENSADOS



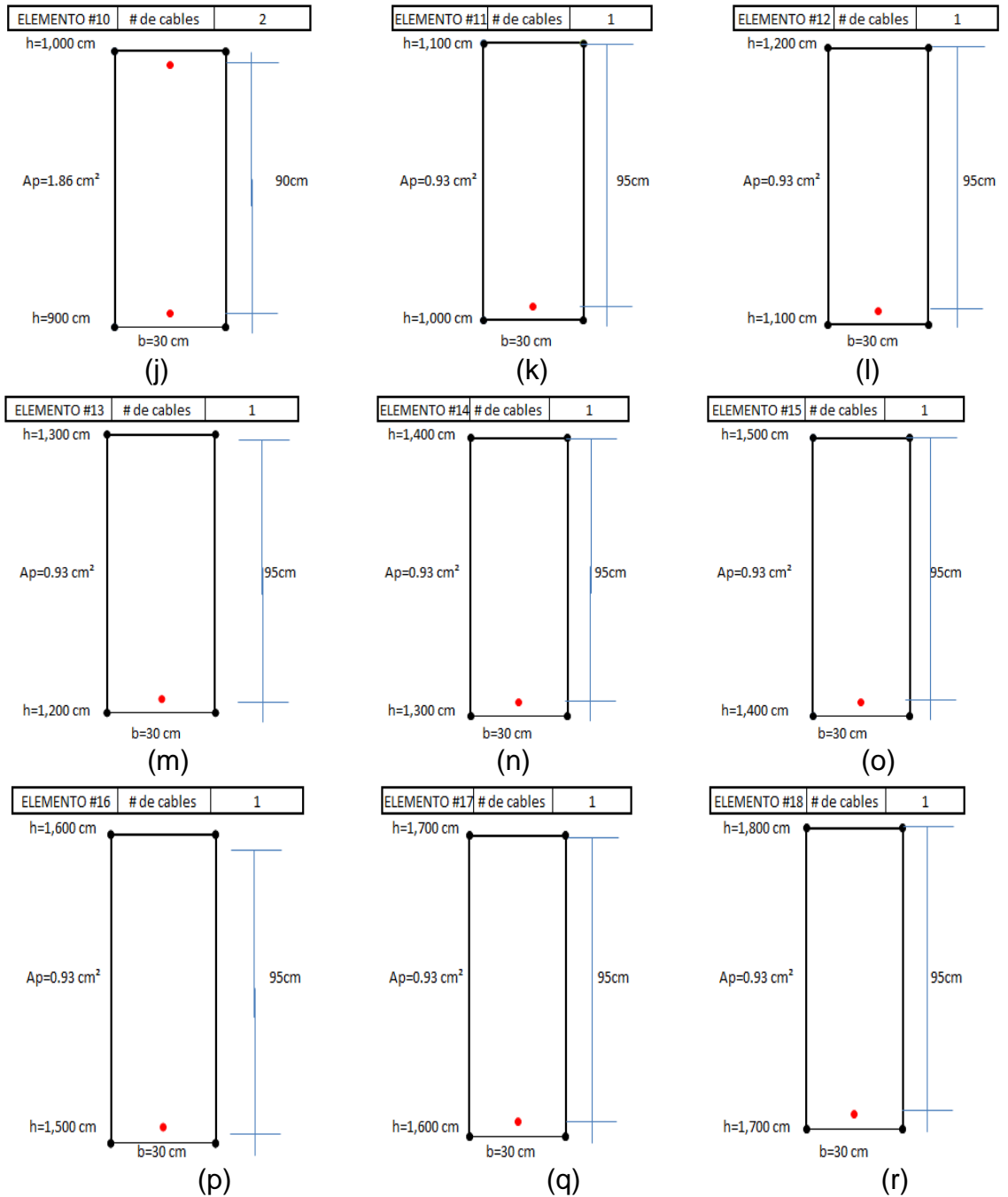


Figura 4.4 Distribución de Cables en elementos de Hormigón Pretensado.

En la Figura 4.4 se puede observar las alturas de los elementos de hormigón pretensado hasta la altura efectiva, la cantidad de aceros y la distribución de los mismos en los elementos.



4.1.4 Resistencia a la Compresión

Una vez realizado el análisis a la compresión se obtendrá control sobre las fisuras que se pueden producir en los elementos de hormigón pretensado, pudiendo por lo tanto, determinarse si la resistencia a compresión del hormigón, es mayor a las fuerzas internas producida por la fuerza de pretensado.

En la Tabla 4.5 se observa que la resistencia a la compresión del hormigón es mayor a la fuerza interior producida por el pretensado.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN		
COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN		23800 kg/cm
		2380000 kg/m
<i>FUERZAS INTERNAS < COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN</i>		
ALTURAS (m)	FUERZAS INTERNAS	
1	49051	CUMPLE
2	49051	CUMPLE
3	32701	CUMPLE
4	32701	CUMPLE
5	32701	CUMPLE
6	32701	CUMPLE
7	32701	CUMPLE
8	32701	CUMPLE
9	32701	CUMPLE
10	32701	CUMPLE
11	16350	CUMPLE
12	16350	CUMPLE
13	16350	CUMPLE
14	16350	CUMPLE
15	16350	CUMPLE
16	16350	CUMPLE
17	16350	CUMPLE
18	16350	CUMPLE

Tabla 4.5 Compresión al Hormigón vs. Fuerzas Internas.

4.1.5 Análisis al Cortante

Como ya se describió en la sección 3.3.1, es necesario verificar la resistencia al cortante que se puede dar en la estructura. Al comparar el cortante producido por el gas licuado de petróleo y el cortante del hormigón (Tabla 4.6); se obtiene que el hormigón esté en la capacidad de soportar la fuerza cortante que genera el líquido.



CORTANTE		
V. Externo	1355.4	kg
V. Hormigon	337950	kg

Tabla 4.6 Análisis de cortantes.

4.1.6 Análisis de Losa de Contrapiso

En la sección 4.1.6, ya se modeló la losa de contrapiso, obteniéndose momentos radiales y tangenciales explicados en la Tabla 4.7; de los cuales se obtuvieron los datos para poder realizar los cálculos de las cuantías y por ende, de la cantidad de acero necesaria para la losa.

	MOMENTOS RADIALES			MOMENTOS TANGENCIALES		
	Radio (m)	Momento (kg*cm/cm)	Unidad	Radio (m)	Momento (kg*cm/cm)	Unidad
0.1R	2.5	196.63	kg*cm/cm	2.5	317.67	kg*cm/cm
0.20R	5	-509.43	kg*cm/cm	5	133.67	kg*cm/cm
0.3R	7.5	2209.86	kg*cm/cm	7.5	-476.98	kg*cm/cm
0.4R	10	2938.57	kg*cm/cm	10	-1521.027	kg*cm/cm
0.5R	12.5	664.91	kg*cm/cm	12.5	-845.88	kg*cm/cm
0.6R	15	34681.64	kg*cm/cm	15	9328.67	kg*cm/cm
0.7R	17.5	53732.12	kg*cm/cm	17.5	16844.29	kg*cm/cm
0.8R	20	-72438.31	kg*cm/cm	20	1474.88	kg*cm/cm
0.9R	22.5	-340728.81	kg*cm/cm	22.5	-73563.87	kg*cm/cm
1.0R	25	-1160868.95	kg*cm/cm	25	-341303.46	kg*cm/cm

Tabla 4.7 Momentos Radiales y Tangenciales

Se puede observar que el momento radial máximo es de 1160868.95 $kg*cm$ y el momento tangencial máximo es de 341308.46 $kg*cm$, dándose en el radio máximo de 25m, lo cual es lógico ya que soporta la carga muerta de las paredes y la presión de gas licuado de petróleo.

Utilizando la ecuación de la cuantía y verificando que sea mayor a la cuantía mínima que es de 0.0033, se podrá determinar la cantidad de acero de refuerzo el cual se observa en la siguiente tabla:

ACERO DE REFUERZO			
As	9.24	cm ²	ACERO RADIAL
4 VARILLAS DE 16mm @ 40cm			
As	4.62	cm ²	ACERO TANGENCIAL
3 VARILLAS DE 14mm @ 28cm			

Tabla 4.8 Acero de refuerzo radial y tangencial.



4.2 Análisis de precios

Para poder obtener un costo real del tanque de hormigón pretensado, se deberá realizar un estudio de costos de los materiales necesarios; pero como se trata de un tipo de obra que no se realiza con frecuencia, existe falta de información en el comercio; por consiguiente se ha recurrido a la experiencia del Ing. Vladimir Carrasco, quien produce distintas piezas de hormigón pretensado y ha prestado su colaboración con algunas pautas de cómo obtener el costo del tanque:

- Hormigón de $400\text{kg}/\text{cm}^2$

El precio por metro cúbico del hormigón de $400\text{kg}/\text{cm}^2$ está alrededor de \$182.03. Se conoce también que una planta de hormigón puede producir alrededor 200m^3 , siendo necesario conocer lo que produce la planta para determinar exactamente el número de piezas que se podrán producir.

- Encofrado

El encofrado que se realiza en este tipo de estructuras debe ser extremadamente exacto y al tener forma de un arco, el espesor de la placa a utilizarse deberá ser alrededor de 12mm.

Es importante conocer la reutilización que se le dará al encofrado, que podría estar entre los 3 o 4 días, por lo que el número total de encofrados dependería de la proyección de la obra a construirse. Este tipo de encofrado se encuentra entre un valor aproximado de 6 a 8 dólares el metro lineal.

El número de encofrados a calcularse tiene como base la duración del proyecto de 420 días (aproximadamente 1 año y 2 meses), con un re-uso de 4 días, por lo que el número de encofrados totales serían de 200, con un re-uso de 4 días (2 piezas por día).



- Acero de preesfuerzo

El precio del acero de preesfuerzo tiene un valor que rodea los 15 dólares por kilogramo, pues se trata de un acero que mantendrá la forma de las piezas pretensadas, en este precio se encuentran incluidos los tipos de accesorios (anclajes) que podrían estar sujetos al encofrado para poder mantener la forma de las piezas de hormigón pretensado.

- Transporte y montaje

Para el montaje y transporte de los elementos se deberá utilizar grúas, plataformas de 15m o 16m, cuyo costo está alrededor de 100 a 200 dólares, fijándose un precio referencial de 200 dólares.

En la Tabla 4.9 se encuentran las cantidades de los rubros descritos como el precio aproximado del hormigón pretensado, que alcanza el valor de 325,017.5 dólares americanos.

ANÁLISIS DE PRECIOS PARA HORMIGÓN PRETENSADO					
CODIGO	DESCRIPCION DEL RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO DEL RUBRO(\$)	PRECIO GLOBAL DEL RUBRO(\$)
00001	Hormigon de 400 kg/cm2	m ³	940	182.03	205329.84
00002	Encofrado de 15.7x1x0.30m	ml	157	8	1507.2
00003	Acero de Preesfuerzo de fpu=270ksi	kg	211.5	15	3807
00004	Transporte y Colocación	piezas	200	200	48000
				Subtotal	258644.04
				Iva	12%
				total	289681.32

Tabla 4.9 Análisis de precios para hormigón pretensado.

- Losa de Contrapiso

El valor de la losa de contrapiso alcanza un costo de \$153.48 dólares el m² para el hormigón de 280kg/cm² y de \$4,76 dólares el kg de acero de refuerzo $f_y=4200\text{kg/cm}^2$, cuya descripción se encuentra en la siguiente Tabla 4.10 :



ANÁLISIS DE PRECIOS- LOSA DE CONTRAPISO					
CODIGO	DESCRIPCION DEL RUBRO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO DEL RUBRO(\$)	PRECIO GLOBAL DEL RUBRO(\$)
00005	Hormigon de 280 kg/cm2	m ³	790	153.48	121249.2
00006	Acero de refuerzo en barras fy= 4200kg/cm2	kg	21492.01	1.76	37825.9376
				Subtotal	159075.14
				Iva 12%	19089.02
				total	178164.16

Tabla 4.10 Análisis de precios para losa de contrapiso

El costo total del tanque se fija por lo tanto en \$ 467 845.48 (Cuatrocientos sesenta y siete mil ochocientos cuarenta y cinco dólares con cuarenta y ocho centavos).



Capítulo V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Es importante realizar el estudio de las pérdidas del pre-esfuerzo, hasta un tiempo aproximado de 5 años, tomando en cuenta que la fuerza que se utiliza para pretensar disminuirá con el pasar del tiempo, afectando al diseño y a la obra.
- Dentro de este análisis de pérdidas de la fuerza de pre-esfuerzo, se deben conocer las características de los materiales: el tipo de hormigón a utilizar, resistencia a compresión, tipo de acero, esfuerzo mínimo de rotura de los cables, etc., ya que estos son parámetros esenciales para el análisis.
- En el análisis del tanque de almacenamiento de gas licuado de petróleo, se utiliza el método en el cual se tensan los cables primero y luego se procede a verter el hormigón, cortando los cables para obtener una resistencia a compresión inicial en 28 días de $f'_{ci} = 280 \text{ kg/cm}^2$, evidenciándose transcurrido este tiempo, una resistencia de $f'_c = 400 \text{ kg/cm}^2$.
- Una de las características más importantes que se deben determinar en un tanque circular, es la fuerza de pretensado $P = 22499 \text{ kg}$, ya que esta debe ser adecuada para que el acero mantenga la forma del tanque y no regresen a su forma horizontal.
- Para tanques de almacenamiento de gas licuado de petróleo, el factor de seguridad es de 4, pudiéndose realizar un análisis seguro y confiable, en el que se cumple con los elementos que conforman el tanque.
- Se debe verificar la resistencia a la compresión del hormigón, ya que por la fuerza del pretensado hay que tener control sobre las fisuras que se pueden darse en la estructura.
- La resistencia al cortante se ha verificado que solo el hormigón es capaz de soportar las fuerzas a cortante, o en caso contrario se puede, aumentar la sección para que el hormigón pueda resistir dicha fuerza cortante.
- Se realizó ensayos para analizar la influencia del combustible al entrar en contacto con el hormigón, realizando 8 probetas de 15cm de diámetro



por 30cm de alto con una resistencia esperada a los 28 días de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$, el cual 2 se rompieron a los 7 días con una resistencia $f'ci = 156.17 \text{ kg/cm}^2$ curadas en agua, de las 6 restantes probetas, 3 continuaron su curado en agua y las otras 3 son curadas en combustible teniendo los siguientes resultados a los 9, 12, 15 días respectivamente, la resistencia en las probetas en agua fueron de: $f'ci = 173.31 \text{ kg/cm}^2$, $f'ci = 190.90 \text{ kg/cm}^2$, $f'ci = 192.61 \text{ kg/cm}^2$, respectivamente y las otras 3 probetas en combustible (diésel) es de $f'ci = 174.92 \text{ kg/cm}^2$, $f'ci = 192.34 \text{ kg/cm}^2$ y $f'ci = 203.55 \text{ kg/cm}^2$, con lo cual se puede observar que aumenta la resistencia del hormigón al estar en contacto con el combustible.

5.2 Recomendaciones

- Se deberían dar materias optativas para obtener mayor información sobre los hormigones pretensados, ya que es un método de construcción que va tomando mucha fuerza en nuestro medio y han sido aplicados en grandes proyectos de nuestra ciudad.
- Hay que tomar precauciones en cuanto al cuidado y mantenimiento de los encofrados, ya que para este tipo de sistema de hormigón pretensado, las dimensiones de los encofrados deben ser precisos y al momento de darle mantenimiento, es recomendable realizarlo con cuidado para no dañar ni modificar su forma, ya que con un simple golpe podría deformarse.
- Al entrar en contacto el hormigón con el combustible, este hace que la velocidad de fraguado se altere, por lo que es recomendable que el hormigón obtenga su resistencia máxima antes de entrar en contacto con el combustible.

5.3 Estudios Futuro

- Estudiar el diseño de las juntas entre los elementos pretensados.
- Realizar el análisis del tanque para elementos postensados para comparar con el análisis expuesto.
- Análisis y diseño losa de cubierta para el tanque de hormigón pretensado.



REFERENCIAS

1. Proaño Rodríguez, M.G., *Sisteman de almacenamiento de gas licuado de petróleo (GLP) en la planta oyambar- Petrocomercial*, in *Tecnología en petróleo. 2004-2005*, Universidad Tecnológica Equinoccial.
2. www.petrocomercial.com.
3. Fernández, R., Rivas, J.L., *Descripción del Diseño y Construcción de un Depósito de Hormigón Pretensado para 80.000m³ de capacidad de gas natural licuado*. Revista Informes de la Construcción, 1981. **33**: p. 35-42.
4. Fang-yuan, L. and J.b. Han. *FEM Aided Prestress Design for Large-scale Ultra-low-temperature LNG Tank*. in *Information and Computing (ICIC), 2010 Third International Conference on*. 2010.
5. C., D., *Propano y Butano de Lynn*.
6. www.diccionarios.com.
7. Gualtieri, P., *Manual de GNC, 1ra Edición*. 2003, Buenos Aires: Artes graficas Negri.
8. Sebastián, E.S.A. and S.R.F. Javier, *Diseño y construcción de un tanque para crudo de 13000 litros, con chasis*.
9. *Diseño y análisis estructural de recipientes a presión ASME*.
10. González Cuevas, Ó.M. and F. Robles Fernández-Villegas, *Aspectos fundamentales del concreto reforzado IV ed*, ed. Limusa. 2005.
11. M.Sc. Proaño Romo, M., *Fundamentos de Hormigón Simple*. Quito.
12. Hernández Montejó, A., *Diseño de Estructuras de Concreto Preesforzado*. 2000: Veracruz.
13. Carrasco Castro, F., *Hormigón Pretensado, Diseño de Elementos Isostáticos*. I ed. 2010.
14. PCI, d.h., *Precast and Prestressed Concrete Ved*. 1999, Chicago, Illinois 60604.
15. Nilson H., A., *Diseño de Estructuras de Concreto*. 1999: Mc Graw Hill.
16. AASHTO, *Especificaciones AASHTO para Diseño de Puentes por el metodo LRFD-Unidades SI*. 2002.
17. Edward, N.G., *Prestressed Concrete: A Fundamental Aproach*. Fifth ed. 2006.
18. Hernández Montes, E. and L.M. Gil Martín, *Hormigon Armado y Pretensado-Concreto Reforzado y Preesforzado*. 2007, Granada: Grupo de Investigación TEP-90 Ingeniería e infraestructuras.
19. *ACI-318S-08*.
20. Ferdinand, S.S. and P. Andrews, *Resistencia de materiales*. VIII ed. 1987: Arrangemente with Harper & Row. 171-172.

ANEXOS

7.1 ANEXO I

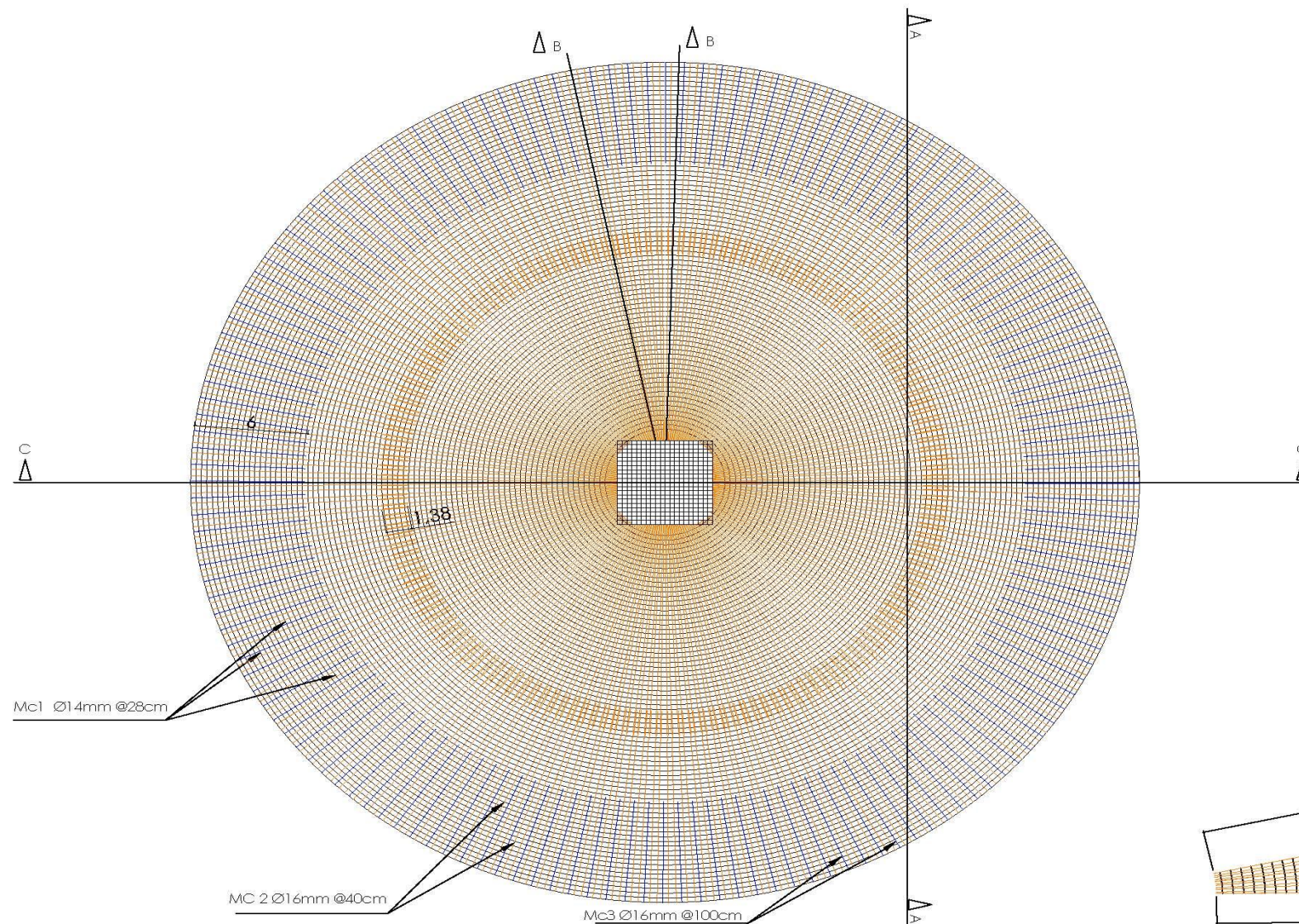
Tabla 7.1 Influencia Plástica y Retracción del hormigón, [13]



Resistencia del hormigón al destensar los cables = 250 kg/cm ² Esfuerzo promedio en el hormigón por el pretensado = 42 kg/cm ² Humedad Relativa = 70% Relación Volumen/Superficie = 3,8cm			
Tiempo Días	Fluencia Plástica	Retracción	
	Hormigón peso normal	Curado Húmedo	Curado Acelerado
1	29	16	9
3	51	44	26
5	65	70	43
7	76	93	58
9	86	115	72
10	90	124	78
20	118	204	136
30	137	258	180
40	150	299	215
50	161	329	243
60	169	354	266
70	177	373	286
80	183	390	302
90	188	403	317
100	193	415	329
200	222	477	400
1 año	244	511	443
3 años	273	543	486
5 años	283	549	495
Final	315	560	510



7.2 Esquematización



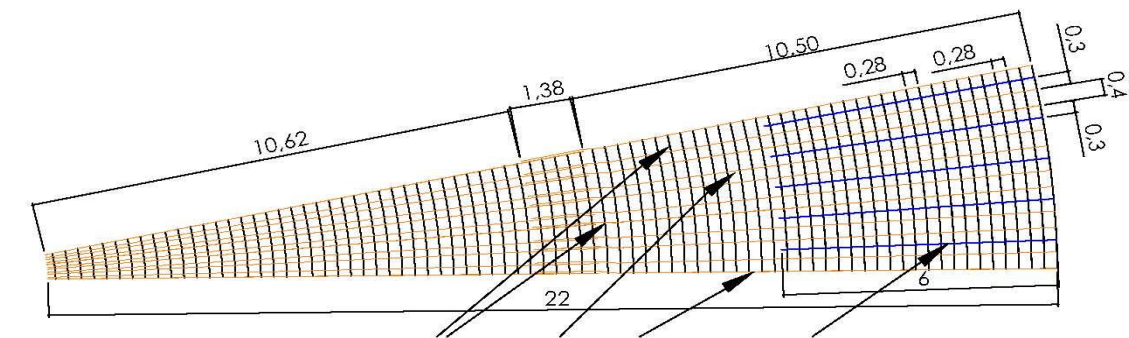
ARMADURA RADIAL Y TANGENCIAL

ESC. _____ 1:300

RESUMEN				
Diámetro (mm)	Cantidad (m)	Peso / m (kg/m)	10% adicional desperdicio	Peso total (kg)
14	2184.00	1,208	263.82	2902.09
16	10709.72	1,578	1689.99	18589.92
TOTAL PESO (kg):				21492.01

PLANILLA DE HIERROS									
Marca (Mc)	Cant.	Tipo	Diámetro [mm]	Dimensiones [m]			Longitud [m]	Long. Total [m]	Observaciones
				a	b	c			
1	75	O	14	156.00			156.00	2184	Longitud variable
2	390	C	16	22.5	0.30	0.30	23.1	9009	
3	156	L	16	6.00	0.30		6.30	982.8	
4	40	I	16	5			5	200.0	
5	156	J	16	1	1.32	1	3.32	517.92	

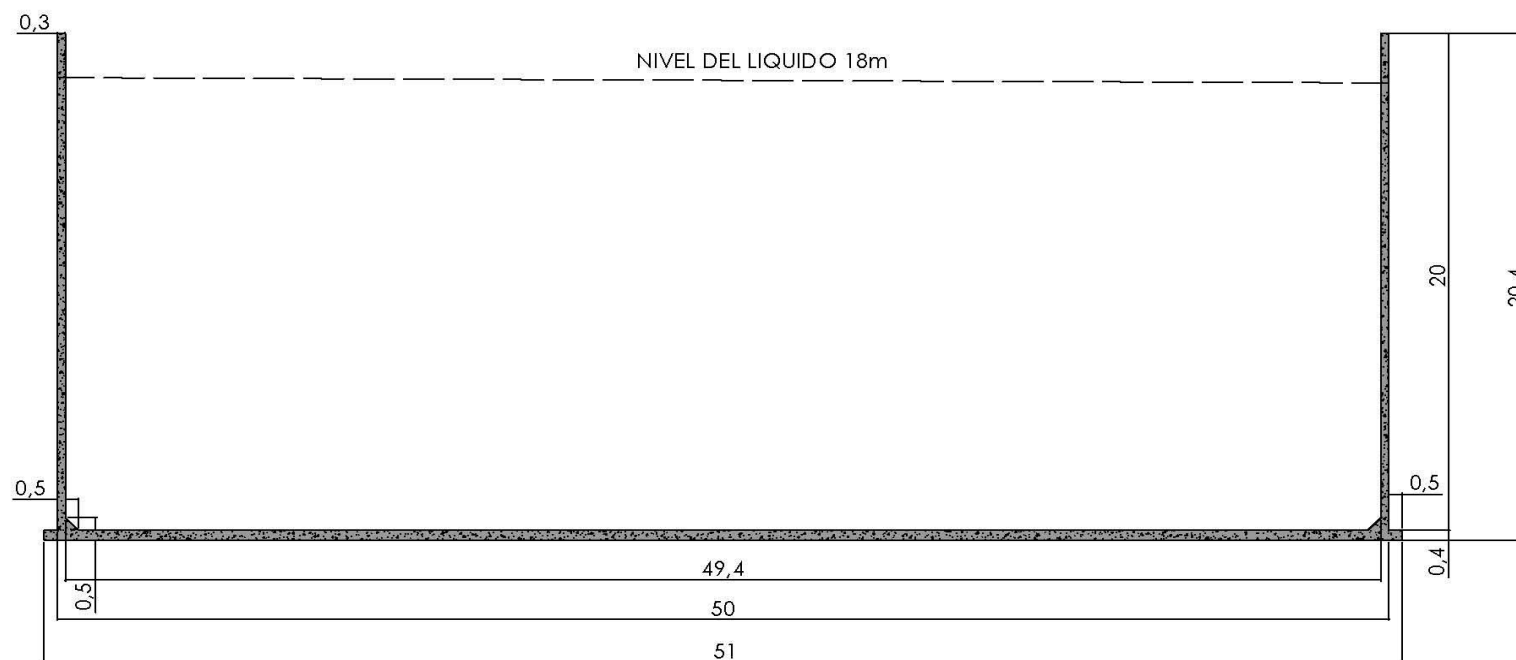
Especificaciones Técnicas de los Materiales	
Material	Descripción
Replanteo de hormigón pobre	f _c =140 kg/cm ²
Hormigón en losas	f _c =280 kg/cm ²
Acero de refuerzo	f _y = 4200 kg/cm ² , corrugado



CORTE B - B

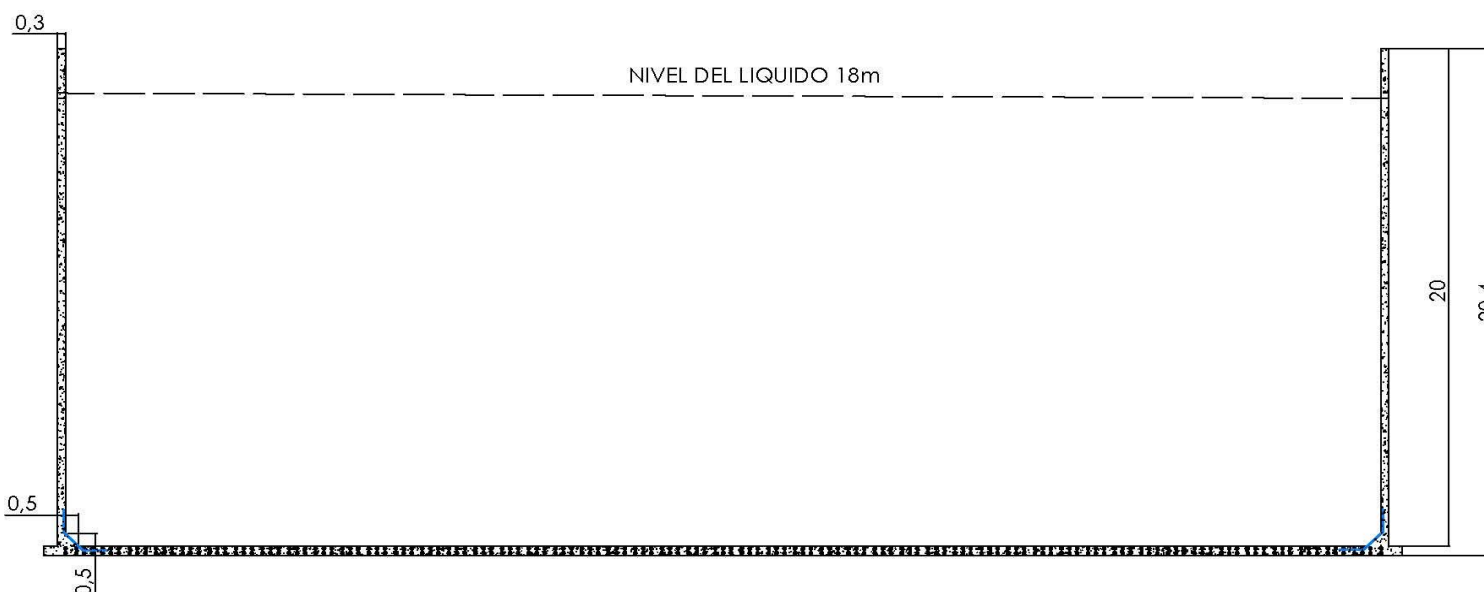
ESC. _____ 1:150

UNIVERSIDAD DE CUENCA			
ESCALA:	Las indicadas	PROYECTO DE TESIS DE PREGRADO	
		DISEÑO:	Pablo Sebastián Carrera Vanegas.
		DIBUJO:	Pablo Sebastián Carrera Vanegas.
		REVISIÓN:	Ing. Jorge Moscoso.
CONTIENE:	Armadura radial y tangencial Corte B - B	FECHA:	25 de marzo de 2015
		LÁMINA:	1_2



CORTE C-C DETALLE GEOMETRÍA DEL TANQUE

ESC. 1:250

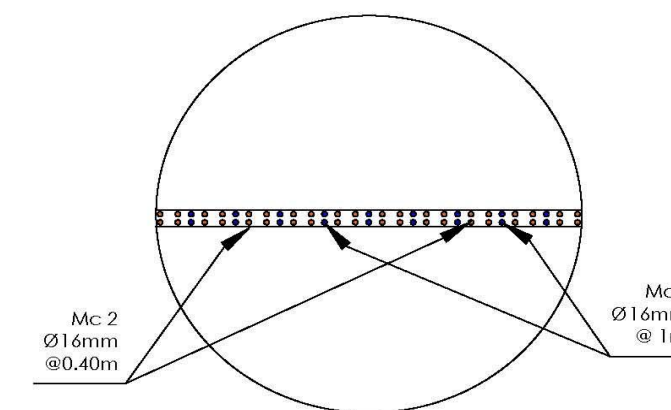
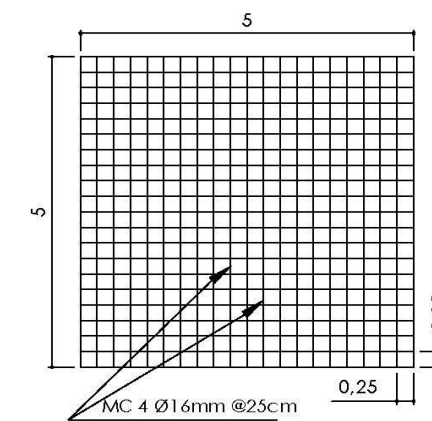


CORTE A-A DETALLE ARMADURA DEL TANQUE

ESC. 1:250

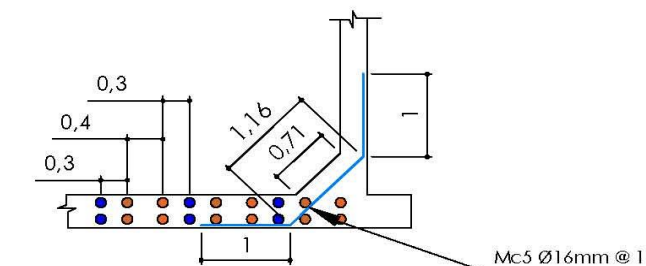
MALLA DE ACERO RADIAL

ESC. 1:100



DETALLE ARMADURA DEL TANQUE (CORTE A-A)

ESC. 1:150



CORTE A-A DETALLE UNION LOSA-PAREDES TANQUE

ESC. 1:75

UNIVERSIDAD DE CUENCA			
ESCALA:	Las indicadas	PROYECTO DE TESIS DE PREGRADO	
		DISEÑO:	Pablo Sebastián Carrera Vanegas.
		DIBUJO:	Pablo Sebastián Carrera Vanegas.
		REVISIÓN:	Ing. Jorge Moscoso.
CONTIENE:	Corte A - A, Corte C - C, Detalles Malla de Acero Radial	FECHA:	25 de marzo de 2015
		LÁMINA:	2 _2