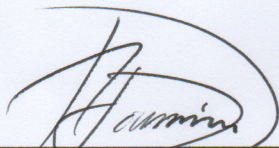
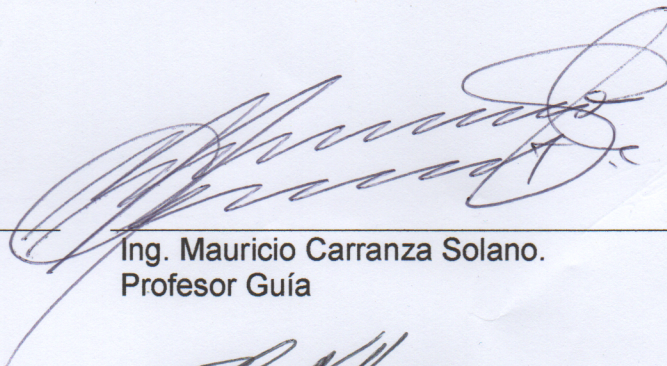


CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

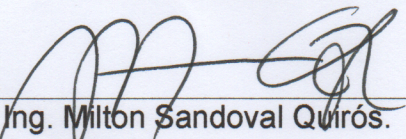
Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Rolando Fournier Zepeda, Ing. Mauricio Carranza Solano, Ing. Milton Sandoval Quirós, Ing. Rommel Cuevas Kauffmann, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



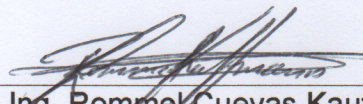
Ing. Rolando Fournier Zepeda.
En representación del Director



Ing. Mauricio Carranza Solano.
Profesor Guía



Ing. Milton Sandoval Quirós.
Profesor Lector



Ing. Rommel Cuevas Kauffmann.
Profesor Observador

Prefabricación, transporte y ensamblaje de la estructura metálica de un tanque de almacenamiento de agua potable para Los Chiles



Abstract

The water supply problem in Costa Rica, lies in the lack of adequate water infrastructure, which prevents us to meet the demand due to population growth as well as commercial, industrial and tourist level.

In this paper, the logistic aspects of shop prefabrication, transport and site assembly in a metal tank for water storage of 250 m³ of capacity located in Los Chiles, Alajuela are analyzed. This by analyzing space and equipment limitations both in plan and on-site, determining the level of pre assembly with which the elements would be manufactured and transported and the development of procedures for the execution of the work. In addition, a dynamic seismic analysis of the structure, using models developed in SAP2000, is performed to determine the most characteristic critical points of the structure, to provide general recommendations regarding the frequency and inspection criteria and some of the preventive maintenance actions.

The analysis concludes that the best way to manufacture and transport the support structure is by independent elements, while the cylinder into two sections. The procedures established in the assembly manual represented a prerequisite for the analysis and understanding of the assembly process. Additionally, the seismic analysis found that the structural design of the tank is very conservative, therefore the stress values found in the characteristic elements are low.

Keywords: metallic structure, prefabrication, transportation, construction process, seismic analysis

Resumen

El problema del abastecimiento del agua en Costa Rica, radica en la carencia de una adecuada infraestructura hídrica, que nos impide satisfacer la demanda debido al crecimiento poblacional, así como en el nivel comercial, industrial y turístico.

En este trabajo se presenta un análisis los aspectos relativos a la logística de prefabricación en planta, transporte y ensamblaje en sitio, de un tanque metálico de 250 m³ de capacidad para el almacenamiento de agua potable ubicado en Los Chiles de Alajuela. Esto se realizó mediante el análisis de las limitaciones espaciales y de equipo tanto en planta como en el sitio de ensamblaje, la determinación del nivel de pre ensamblaje con el que serían fabricados y transportados los elementos y el desarrollo de los procedimientos necesarios para la ejecución de la obra. Además, se realiza un análisis sísmico dinámico de la estructura mediante modelos desarrollados con el programa SAP2000, para determinar los puntos críticos más característicos de dicha estructura, con el objetivo de brindar recomendaciones generales en cuanto a la periodicidad y criterios de inspección y algunas de las acciones de mantenimiento preventivo.

Del análisis realizado se concluye que la mejor forma de fabricar y transportar la estructura de soporte es por elementos independientes y el cilindro en dos secciones iguales. Los procedimientos establecidos en el manual de ensamblaje, representaron una herramienta indispensable para el análisis y la comprensión de los procesos. Además, el análisis sísmico se determinó que el diseño estructural del tanque es muy conservador, por lo que los esfuerzos encontrados en los elementos característicos son valores bajos.

Palabras clave: estructura metálica, prefabricación, transporte, proceso constructivo, análisis sísmico.

Prefabricación, transporte y ensamblaje de la estructura metálica de un tanque de almacenamiento de agua potable para Los Chiles

PAULO NÚÑEZ CORRALES

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Julio de 2014

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

| | |
|---------------------------------|-----|
| PREFACIO..... | 1 |
| RESUMEN EJECUTIVO..... | 2 |
| INTRODUCCIÓN..... | 7 |
| METODOLOGÍA..... | 11 |
| RESULTADOS..... | 25 |
| ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS..... | 57 |
| CONCLUSIONES..... | 63 |
| RECOMENDACIONES..... | 64 |
| APÉNDICES..... | 65 |
| ANEXOS..... | 155 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 185 |

Prefacio

En Costa Rica, el recurso hídrico no ha logrado tener prioridad en los planes y gestiones de los diferentes gobiernos. De acuerdo con el Análisis Sectorial de Agua Potable y Saneamiento concluido en el año 2002, la inversión en este sector representa un 0,70% del producto interno bruto (PIB), mientras que otros sectores como el de Energía y Telecomunicaciones representa un 6,70% (Ministerio de Salud, 2004).

Costa Rica no tiene problemas de disponibilidad del recurso para resolver la demanda de agua potable a nivel nacional. El problema radica en la carencia de una adecuada infraestructura hídrica, que impide satisfacer la demanda debido al crecimiento poblacional así como en el nivel comercial, industrial y turístico.

El estado de la infraestructura rural de los sistemas de agua potable que administra el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) a través de sus regionales, se encuentra en términos generales en regulares condiciones, según los requerimientos de inversión que para estos sistemas se han determinado.

Como parte del proceso de mejoramiento de los acueductos rurales y con el objetivo de garantizar el acceso al agua potable en las comunidades que se encuentran en estas zonas del país, se publica la licitación abreviada N° 2013LA-000057-PRI para la construcción de un tanque de almacenamiento de agua potable en Los Chiles de Alajuela.

A la hora de realizar contratos de la magnitud e importancia como el antes mencionado, cualquier empresa que quiera verse beneficiada con la construcción de proyectos de infraestructura de los sistemas de agua potable, debe garantizar que el trabajo sea realizado bajo los más altos estándares de calidad, debido a la responsabilidad que se asume no solo con el gobierno, sino con la población que se beneficiará con la buena ejecución del proyecto.

Por estos motivos, la empresa Industrias Bendig, como empresa encargada de la construcción, se ve motivada a plantear un proyecto para colaborar en el desarrollo de la logística que contemple la prefabricación de los elementos, el transporte de estos y el proceso de ensamblaje final en el sitio, de forma que se realice un análisis de las variables que puedan afectar el proceso constructivo.

Agradezco a todas aquellas personas que con su colaboración hicieron posible la realización del presente proyecto espacialmente a la empresa Industrias Bendig en la figura del Ing. Víctor Bendig y a mi profesor guía en este proyecto el Ing. Mauricio Carranza.

Dedico este trabajo a mis padres, Johnny Núñez y Mireya Corrales, por su increíble e indispensable apoyo, quienes hicieron posible que me encuentre en esta importante etapa de mi vida. A mi hermano Julio, por todo el apoyo, ayuda y compañía que me ha brindado durante este proceso. Y por último al Ing. Leonardo Corrales, o mejor dicho, Tío Lalito, quien fue la inspiración que me motivó a estudiar Ingeniería.

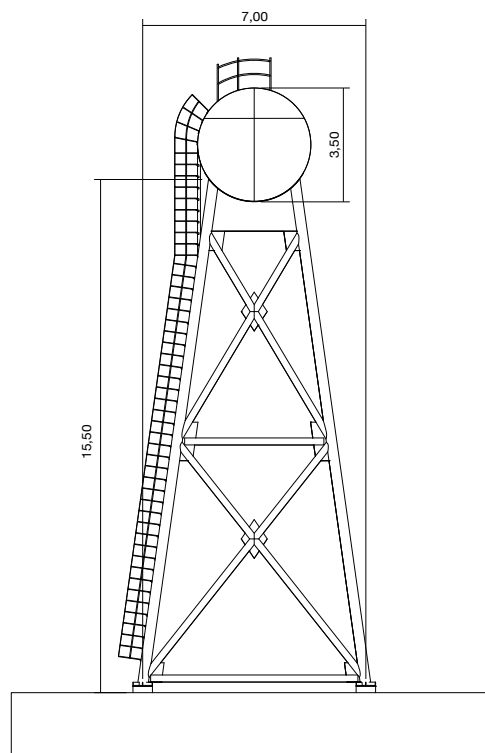
Resumen ejecutivo

El estado de la infraestructura rural de los sistemas de agua potable que administra el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) a través de sus regionales, se encuentra en términos generales en regulares condiciones, según los requerimientos de inversión que para estos sistemas se han determinado.

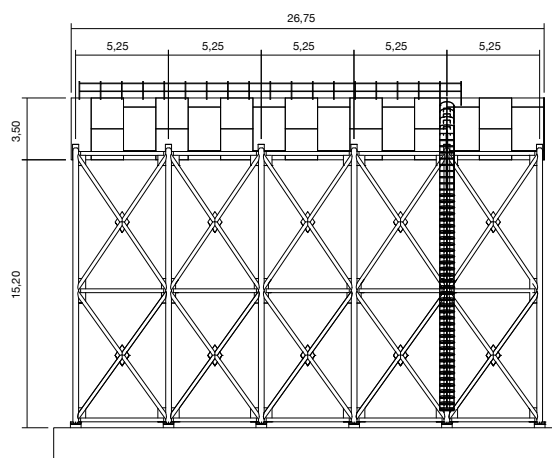
Por estos motivos, como parte del proceso de mejoramiento de los acueductos rurales y con el objetivo de garantizar el acceso al agua potable en las comunidades que se encuentran en estas zonas del país, se publica la licitación abreviada N° 2013LA-000057-PRI para la construcción de un tanque de almacenamiento de agua potable en Los Chiles de Alajuela, la cual fue adjudicada a Industrias Bendig S.A.

El tanque de almacenamiento es un depósito elevado con forma cilíndrica horizontal. La estructura será totalmente metálica y consta de un cilindro de 3,50 m de diámetro y 26,75 m de largo con una estructura interna que le brinda rigidez, además de una estructura de soporte compuesta por seis marcos de 15,50 m, de altura arriostrados lateralmente. Todas las uniones se realizan con soldadura, mediante placas. En las figuras que se muestran a continuación, se presentan vistas del tanque y de la estructura interna del cilindro.

El objetivo que se persiguió con este trabajo fue analizar los aspectos relativos a la logística de prefabricación en planta, transporte y ensamblaje en sitio de un tanque metálico de 250 m³ de dicho tanque. El proyecto se desarrolló en cuatro etapas consistentes con los objetivos, que se describen a continuación.



Vista frontal del tanque de almacenamiento
Fuente: elaboración propia con base en planos de taller

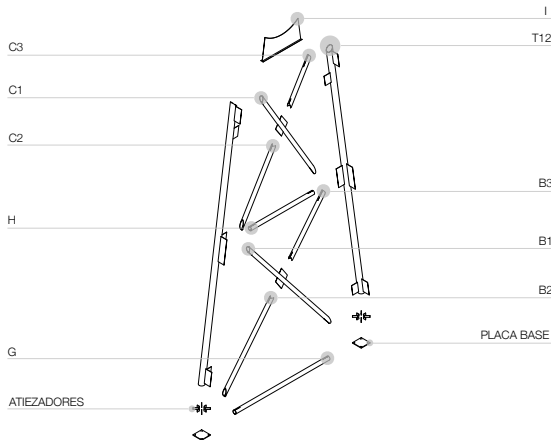


Vista lateral de tanque de almacenamiento
Fuente: elaboración propia con base en planos de taller

Etapa 1: Logística de prefabricación y transporte

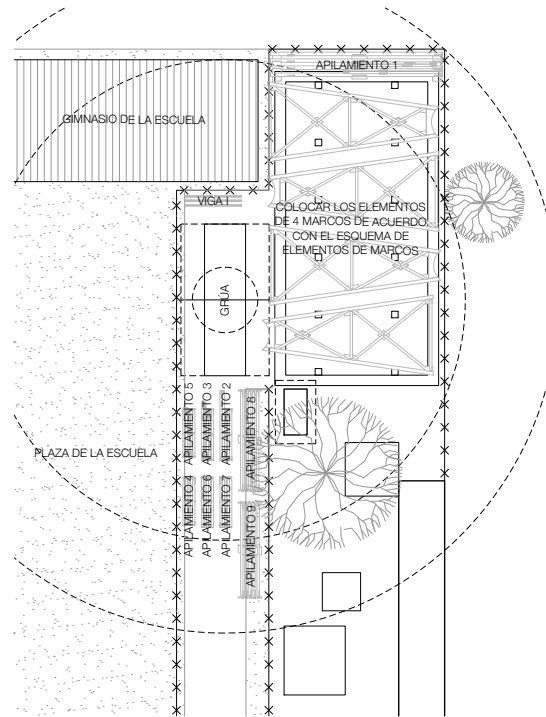
En esta etapa se determinó la forma como debían ser fabricados los elementos en planta (tanto del cilindro como de la estructura de soporte), analizando el nivel de preensamblaje con el que podían ser transportados estos, tomando en consideración las limitaciones para la carga de los elementos en la planta, la descarga en el sitio de ensamble y las regulaciones nacionales para el transporte de cargas por carretera. Se realizaron cuadros y esquemas de carga para determinar la cantidad de viajes por realizar y los equipos necesarios para la carga de los elementos en la planta. Por último, se realizó el diseño de sitio y esquemas de los apilamientos para establecer la forma como los elementos debían ser descargados y las zonas de ensamble en el sitio, además de un análisis del tipo y la ubicación de los equipos para el movimiento de las cargas.

Se determinó que el cilindro del tanque de almacenamiento será prefabricado en una sola pieza y posteriormente dividido en dos partes para efectos del transporte. Con la estructura de soporte, se estableció que se prefabricará y transportará en elementos independientes con las placas soldadas. Se estimó que serían necesarios cinco viajes para transportar la totalidad de la estructura metálica, de los cuales tres requieren de un permiso especial por sobredimensión.



Nivel de pre ensamblaje de los marcos de la estructura de soporte

Fuente: elaboración propia con base en planos de taller



Diseño de sitio

Fuente: elaboración propia con base en levantamiento realizado

Etapa 2: Logística de ensamble en sitio

En esta fase se realizó la programación del proceso de ensamble mediante el método de la ruta crítica, tomando en consideración las condiciones de sitio y los recursos disponibles, con el uso del programa *Microsoft Project 2013*. Se encuentra que la secuencia propuesta de las actividades definidas es la adecuada para la ejecución del proceso constructivo de la estructura. Sin embargo, las duraciones estimadas no concuerdan con las duraciones reales debido a problemas con el manejo del personal, condiciones climáticas adversas y fallos en los equipos.

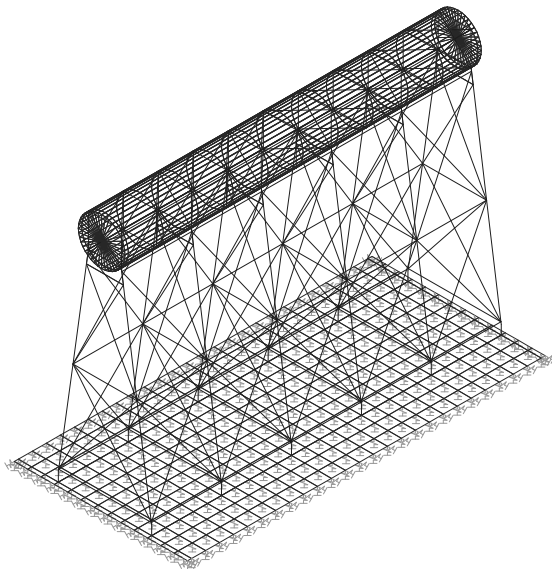
De la misma manera, se desarrolló el manual de ensamble en el que se realiza una descripción de los elementos que conforman tanto el cilindro como la estructura de soporte (de acuerdo con su nivel de pre ensamble), del proceso de ensamble y del equipo necesario para

su ejecución, además de brindar los requerimientos básicos de seguridad y protección personal contenidos en el *Reglamento de seguridad en construcciones*.

Por último, se desarrolló el manual de supervisión de soldadura y recubrimientos en tanques metálicos, que sirve como una guía para las labores y responsabilidades de la persona designada para la supervisión de estos trabajos en campo, proporcionándole las directrices generales para la inspección visual del proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) y la aplicación de pinturas y revestimientos sobre superficies metálicas.

Etapa 3: Análisis estructural

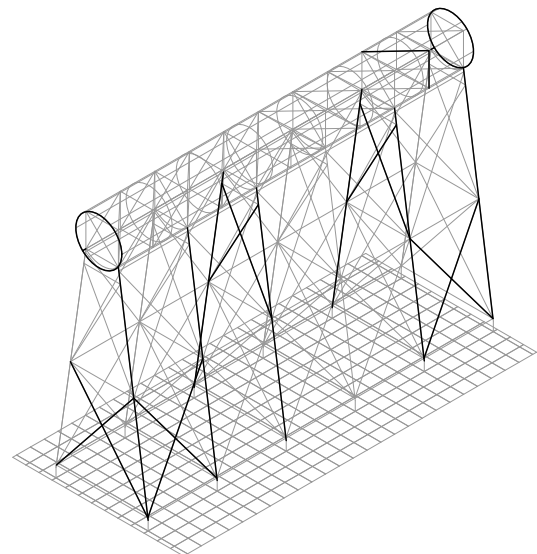
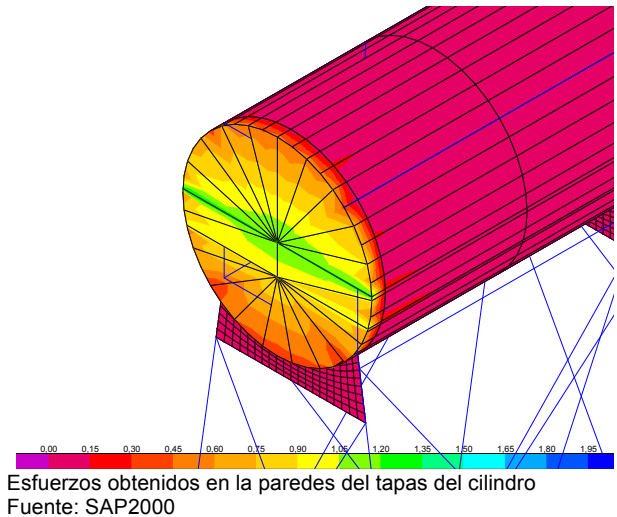
En esta etapa se elaboraron dos modelos tridimensionales del tanque de almacenamiento (incluyendo el cilindro, la estructura de soporte y la losa de cimentación) con el uso del programa *SAP2000 V.16* de *Computers and Structures, Inc.* y la información obtenida de planos, informes y memorias de cálculo; con los que se realizó un análisis sísmico dinámico que permitió determinar los puntos críticos más característicos de la estructura metálica ante un evento sísmico.



Modelo de la estructura
Fuente: SAP2000

Se encuentra que el diseño de la estructura de soporte y estructura interna del cilindro tal y como

se presenta en los planos es muy conservador, debido a que los esfuerzos encontrados mediante las ecuaciones de interacción son bajos. Sin embargo para efectos de inspección, se considera importante seleccionar como puntos críticos más característicos aquellos que presenten los valores más elevados. En cuanto a las paredes del cilindro, se encuentra que las tapas del cilindro forman parte de los puntos críticos, ya que los esfuerzos encontrados son elevados y exceden el esfuerzo permisible debido a los efectos producidos por el oleaje del agua.



Elementos críticos más característicos de la estructura
Fuente: elaboración propia con base en modelo SAP2000

Etapa 4: Protocolo de inspección

Con los resultados obtenidos de dicho análisis se desarrolla un protocolo de inspección de la estructura, en el que se brindan recomendaciones generales en cuanto a la periodicidad y tipos de inspección para garantizar condiciones óptimas de operación a lo largo de la vida útil de la estructura.

Introducción

El acceso al agua potable es esencial para la salud, ya que es un derecho humano básico y componente de las políticas eficaces de manutención de la salud. Todas las personas deben disponer de un suministro adecuado del servicio, principalmente en cuanto a cantidad, calidad y continuidad. La mejora al acceso al agua potable proporciona beneficios tangibles para la salud de las poblaciones.

Costa Rica es un país que se ha distinguido por gozar de altas coberturas en el acceso a los servicios de abastecimiento del agua potable, sin embargo se identifican deficiencias en la calidad de la prestación de los servicios, organización, ausencia de planificación e insuficiente inversión que puedan garantizar en el mediano y largo plazo el sostenimiento de dichas coberturas, de acuerdo con el informe realizado en el 2004 por el Ministerio de Salud acerca de la calidad del agua potable en el país.

En dicho informe se expresa que a pesar de la holgura en la disponibilidad del agua, las deficiencias en la administración nacional y local del recurso han afectado tanto el estado de las aguas subterráneas y superficiales, como la calidad del agua suministrada por acueducto. La creciente vulnerabilidad de los acueductos constituye una de las principales amenazas de la salud de los costarricenses. Este deterioro se debe a un marco institucional disperso en una gran cantidad de entes que dan lugar a problemas de traslape de competencias, vacíos y duplicación de funciones. El racionamiento en época de verano es una realidad para muchas comunidades rurales y urbanas del país. La ausencia de una rectoría clara, fuerte y orientada a la defensa sanitaria de los ciudadanos afecta notoriamente la posibilidad de realizar un uso eficiente de este importante recurso.

El estado de la infraestructura rural de los sistemas de agua potable que administra el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) a través de sus regionales, se encuentra en términos generales en regulares condiciones, según los requerimientos de

inversión que para estos sistemas se han determinado. Un ejemplo de ello es el sistema de agua potable de la comunidad de Los Chiles en Los Chiles de Alajuela, cuyo tanque de almacenamiento se muestra en la Figura 1, demostrando la falta de mantenimiento a la que están sometidas dichas estructuras.



Figura 1. Estado actual del sistema de abastecimiento de agua potable en la comunidad de Los Chiles
Fuente: elaboración propia

Por estos motivos, como parte del proceso de mejoramiento de los acueductos rurales y con el objetivo garantizar el acceso al agua potable en las comunidades que se encuentran en estas zonas del país, se publica la licitación abreviada N° 2013LA-000057-PRI para la construcción de un tanque de almacenamiento de agua potable en Los Chiles de Alajuela, la cual fue adjudicada a Industrias Bendig S.A.

Dicho tanque de almacenamiento es completamente metálico; sus elementos serían prefabricados en las instalaciones de la empresa ubicadas en el cantón de Desamparados, San José, y transportados vía terrestre hasta el sitio de ensamblaje. Esta es la razón que motiva a la empresa a plantear un proyecto para colaborar en el desarrollo de la logística que contemple la prefabricación de los elementos, el transporte de ellos y el proceso de ensamblaje final en el sitio, de forma que se realice un análisis de las

variables que puedan afectar el proceso constructivo.

De esta manera, el presente trabajo tiene como objetivo general analizar los aspectos relativos a la logística de prefabricación en planta, transporte y ensamblaje en sitio de un tanque metálico de 250 m³ de capacidad para el almacenamiento de agua potable en Los Chiles de Alajuela.

Los objetivos específicos que se desarrollaron en este proyecto fueron:

- Determinar el nivel de preensamblaje con el que pueden ser transportados el cilindro y la estructura de soporte, tomando en consideración las limitaciones de carga en la planta y descarga en el sitio de ensamblaje y las regulaciones nacionales para el transporte de carga.
- Determinar la cantidad de viajes necesarios para el transporte de los elementos y el equipo necesario para la carga y descarga de estos.
- Elaborar el diseño de sitio y la programación del proceso de ensamblaje mediante el método de la ruta crítica.
- Desarrollar un manual de ensamblaje que describa la ejecución de las actividades del proceso, el equipo necesario y los requerimientos básicos de seguridad y protección personal.
- Desarrollar una manual de supervisión en sitio para el proceso de soldadura de arco con electrodo revestido (SMAW) y la aplicación de revestimientos en superficies metálicas.
- Realizar un análisis sísmico dinámico que permita determinar los puntos críticos más característicos de la estructura metálica ante un evento sísmico.
- Elaborar un protocolo de inspección del tanque de almacenamiento en el que se brinden recomendaciones generales en cuanto a la periodicidad y tipos de inspección.

Descripción de la estructura

El tanque de almacenamiento es un depósito elevado con forma cilíndrica horizontal y se ubicará en el distrito de Los Chiles del cantón Los Chiles en la provincia de Alajuela. La

estructura será totalmente metálica y consta de un cilindro de 3,50 m de diámetro y 26,75 m de largo con una estructura interna que le brinda rigidez, además de una estructura de soporte compuesta por seis marcos de 15,50 m de altura arriostrados lateralmente. Todas las uniones se realizan con soldadura, mediante placas. En las *Figuras 2, 3, 4 y 5* que se presentan vistas del tanque y de la estructura interna del cilindro.

Alcances y limitaciones

Dentro del alcance del proyecto se analizó el proceso constructivo de la estructura metálica del tanque de almacenamiento (desde la definición del nivel de preensamblaje de los elementos en planta hasta el ensamblaje en el sitio), por lo que no se contempló la construcción de la losa de cimentación, la conexión de las tuberías al tanque, la colocación de equipos para el bombeo y cloración del agua, entre otras actividades contenidas en los lineamientos de la licitación.

Se supervisó el proceso de carga de los elementos en la empresa para verificar que se cumplieran todos los requerimientos previstos para el transporte de los mismos.

La programación se realizó con el programa Microsoft Project 2013 para el proceso de ensamblaje, debido a que la producción en planta depende del volumen de trabajo que se tenga en el momento, por lo que empresa tiene asignado un encargado para realizar el control de la producción.

Para el análisis de la estructura se realizaron un modelos tridimensionales en el programa SAP2000 V.16 y se contemplaron únicamente los elementos estructurales del tanque de almacenamiento como el cilindro (estructura interna y láminas externas), la estructura de soporte y la losa de cimentación. Las cargas por considerar fueron: permanentes, temporales y sísmicas.

Las pruebas de laboratorio que se realizaron a lo largo del proceso para comprobar la calidad de la soldadura y la pintura dependerán de los requerimientos de los ingenieros inspectores del AyA y de las disposiciones que se tomen a lo interno de la empresa, por lo que estos aspectos quedan fuera del alcance del proyecto.

Una de las principales limitaciones del proyecto es la no realización del control y

seguimiento del proceso de ensamblaje de la estructura, debido a que se realizaron pocas visitas al sitio, y al no contar con un ingeniero residente en el proyecto que pudiera brindar información veraz acerca del avance de la obra, la información obtenida mediante el

subcontratista de la mano de obra, en algunas ocasiones, no concordaba con el avance real del proceso. Sin embargo, con la información obtenida se puede analizar si la secuencia de las actividades propuesta es la adecuada para la ejecución del proyecto.

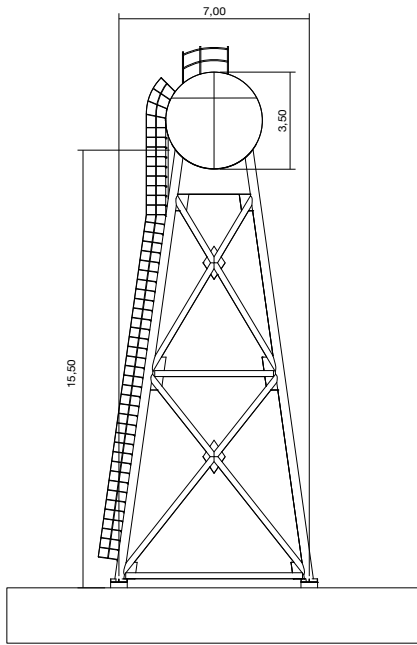


Figura 2. Elevación transversal del tanque de almacenamiento
Fuente: elaboración propia con base en planos de taller

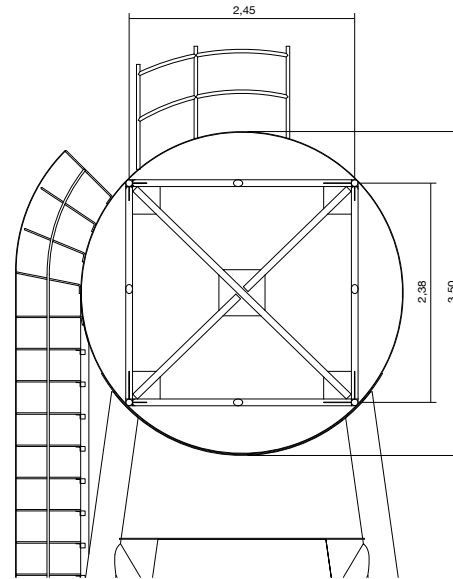


Figura 3. Sección transversal de la estructura interna del cilindro
Fuente: elaboración propia con base en planos de taller

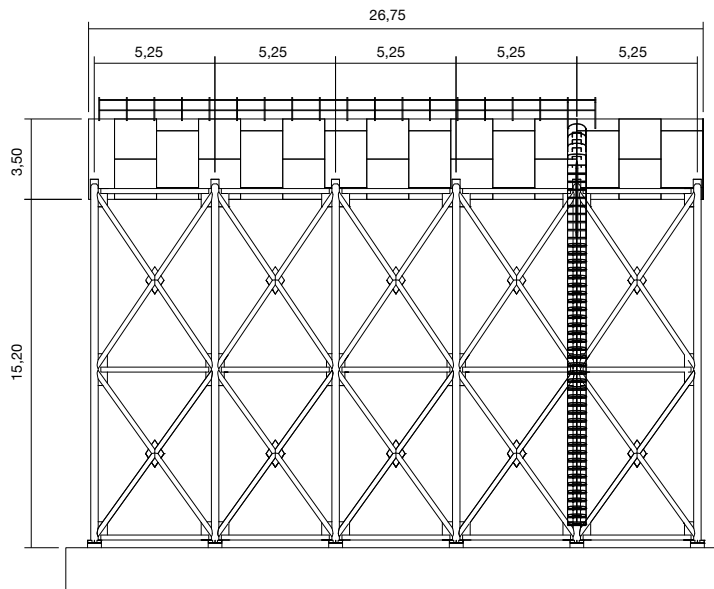


Figura 4. Elevación longitudinal del tanque de almacenamiento
Fuente: elaboración propia con base en planos de taller

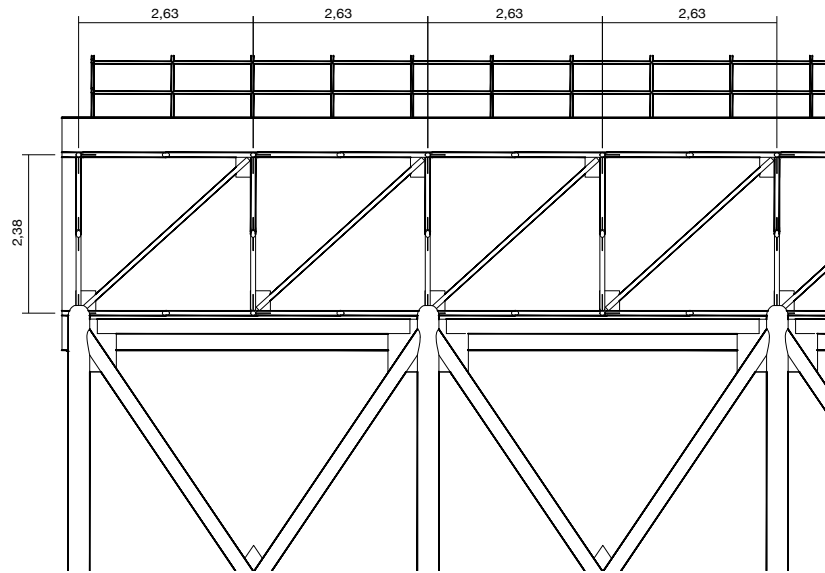


Figura 5. Sección longitudinal de estructura interna del cilindro
Fuente: elaboración propia con base en planos de taller

Metodología

Para cumplir con los objetivos planteados se utilizó la metodología que se menciona a continuación, esta se desarrolló en cuatro etapas:

- Etapa 1: Logística de prefabricación y transporte

En esta etapa se determinó la forma como debían ser fabricados los elementos en planta (tanto del cilindro como de la estructura de soporte), analizando el nivel de pre ensamblaje con el que podían ser transportados estos, tomando en consideración las limitaciones para la carga de los elementos en la planta, la descarga en el sitio de ensamblaje y las regulaciones nacionales para el transporte de cargas por carretera. Se realizaron cuadros y esquemas de carga para determinar la cantidad de viajes por realizar y los equipos necesarios para la carga en la planta de los elementos. Por último, se realizó el diseño de sitio y los esquemas de los apilamientos para establecer la forma como los elementos debían ser descargados y las zonas de ensamblaje en el sitio, además de un análisis del tipo y la ubicación de los equipos para el movimiento de las cargas.

- Etapa 2: Logística de ensamblaje en sitio

En esta fase se realizó la programación del proceso de ensamblaje mediante el método de la ruta crítica, tomando en consideración las condiciones de sitio y los recursos disponibles, con el uso del programa *Microsoft Project 2013*.

De la misma manera, se desarrolló el manual de ensamblaje en el que se realiza una descripción de los elementos que conforman tanto el cilindro como la estructura de soporte (de acuerdo con su nivel de preensamblaje), del proceso de ensamble y del equipo necesario para su ejecución, además de brindar los requerimientos básicos de seguridad y protección personal contenidos en el *Reglamento de seguridad en construcciones*.

Por último, se desarrolló el manual de supervisión de soldadura y recubrimientos en tanques metálicos, que sirve como una guía para

las labores y responsabilidades de la persona designada para la supervisión de estos trabajos en campo, proporcionándole las directrices generales para la inspección visual del proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) y la aplicación de pinturas y revestimientos sobre superficies metálicas.

- Etapa 3: Análisis estructural

En esta etapa se elaboró un modelo tridimensional del tanque de almacenamiento (incluyendo el cilindro, la estructura de soporte y la losa de cimentación) con el uso del programa *SAP2000 V.16* de *Computers and Structures, Inc.* y la información obtenida de planos, informes y memorias de cálculo con el que se realizó un análisis sísmico dinámico que permitió determinar los puntos críticos más característicos de la estructura metálica ante un evento sísmico.

- Etapa 4: Protocolo de inspección

Con los resultados obtenidos de dicho análisis, se desarrolla un protocolo de inspección de la estructura en el que se brindan recomendaciones generales en cuanto a la periodicidad y tipos de inspección.

Etapa 1: Logística de prefabricación y transporte

La planificación es una herramienta fundamental para mejorar la toma de decisiones en la construcción, ya que marca un precedente para determinar el camino a seguir para cumplir los objetivos específicos propuestos. Una correcta planificación asegura que cada actividad del proyecto sea ejecutada correctamente, en el lugar apropiado y en el momento oportuno. Es importante acotar que no es posible realizar una adecuada planificación de las actividades si no se

tiene conocimiento de los factores que intervienen en ella y que pueden afectar negativamente su ejecución.

La prefabricación en planta y el transporte no pueden apreciarse como dos actividades separadas, pues la forma en la que los elementos son producidos afecta la manera como estos deben ser transportados y viceversa. Por lo que para determinar el nivel de preensamblaje con el que se deben fabricar los elementos, se deben analizar los factores que afectan ambas actividades, como los que se mencionan a continuación:

- Las limitaciones espaciales y de equipo de carga a nivel de planta para la carga de los elementos.
- Las limitaciones espaciales y de equipo de descarga a nivel de sitio para la descarga, manipulación y ensamblaje de los elementos.
- Las regulaciones nacionales para el transporte de cargas por carretera.
- Las dimensiones y peso de los elementos.

Limitaciones en planta

Para conocer las limitaciones espaciales de la planta de producción de Industrias Bendig, se realizó un levantamiento (utilizando la cinta métrica y un plano que fue proporcionado por la empresa) en los alrededores de la zona de carga de las instalaciones, el cual se ilustra en la *Figura 6*. La planta de producción tiene un área aproximada de 2000 m² y una zona de carga (andén) de 200 m². La primera cuenta con dos accesos principales: el primero se ubica al frente de la zona de carga y sus dimensiones son 5,30 m de ancho y 4,00 m de altura y el segundo se ubica frente a la rampa y tiene dimensiones de 4,95 m de ancho y 4,50 m de altura. La zona de carga tiene un acceso constituido por dos portones de 5,15 y 5,35 m de ancho y aproximadamente 8,00 m de altura cada uno.

Al momento de realizar el levantamiento ya se había iniciado con la fabricación del cilindro, cuya ubicación bloquea aproximadamente el 80% del primer acceso a la planta, por lo que en este caso se analiza la capacidad de acceso a la planta y los movimientos que se pueden realizar con el equipo de carga que posee la empresa

Limitaciones en sitio

Se realizó un croquis (utilizando la cinta métrica y el paso promedio) del sitio de ensamblaje para determinar las limitaciones espaciales del mismo, el cual se ilustra en la *Figura 7*. En él se reconoce una zona de ensamblaje (que corresponde a la losa de cimentación y al relleno perimetral) que tiene 16,00 m de ancho y 29,50 m de largo, aproximadamente, y una zona destinada para el almacenamiento de los elementos y la ubicación de la grúa que cuenta con 7,75 m de ancho y 58,00 m de largo, aproximadamente. En cuanto a los accesos, el sitio tiene un acceso principal (Acceso 1) de 5,50 m de ancho y un acceso secundario (Acceso 2) de 5,00 m que atraviesa la plaza de la Escuela Ricardo Vargas.

En este caso se analizó tanto la capacidad de acceso como la capacidad espacial para almacenar los elementos, sin obstruir la circulación ni entorpecer el proceso de ensamblaje.

Regulaciones nacionales para el transporte de carga

Con el fin de conocer las regulaciones nacionales para el transporte de carga se analiza el *Reglamento de Circulación por Carretera con Base en el Peso y las Dimensiones de los Vehículos de Carga* y se realizan consultas a diferentes empresas que se especializan en el transporte de carga pesada (como Cargas Especiales Mincho y DACOTRANS). De dicho reglamento se desprende el *Cuadro 1* que describe las dimensiones máximas permitidas y la carga útil para diferentes tipos de vehículo.

El vehículo de transporte que se utiliza en estos casos es el T3-S2, cuyo semirremolque (plataforma) tiene generalmente 2,44 m de ancho, 12,00 m de largo y una altura normal promedio de 1,50 m o tipo “Lowboy” con una altura promedio de 0,50 m en la parte delantera y 1,00 m en la parte posterior.

Es importante acotar que para el transporte de cargas que excedan el peso o las dimensiones máximas permitidas se debe poseer un permiso especial para cada viaje que presente estas condiciones. Sin embargo, dicho permiso es generalmente otorgado a cargas que por su configuración sean indivisibles.

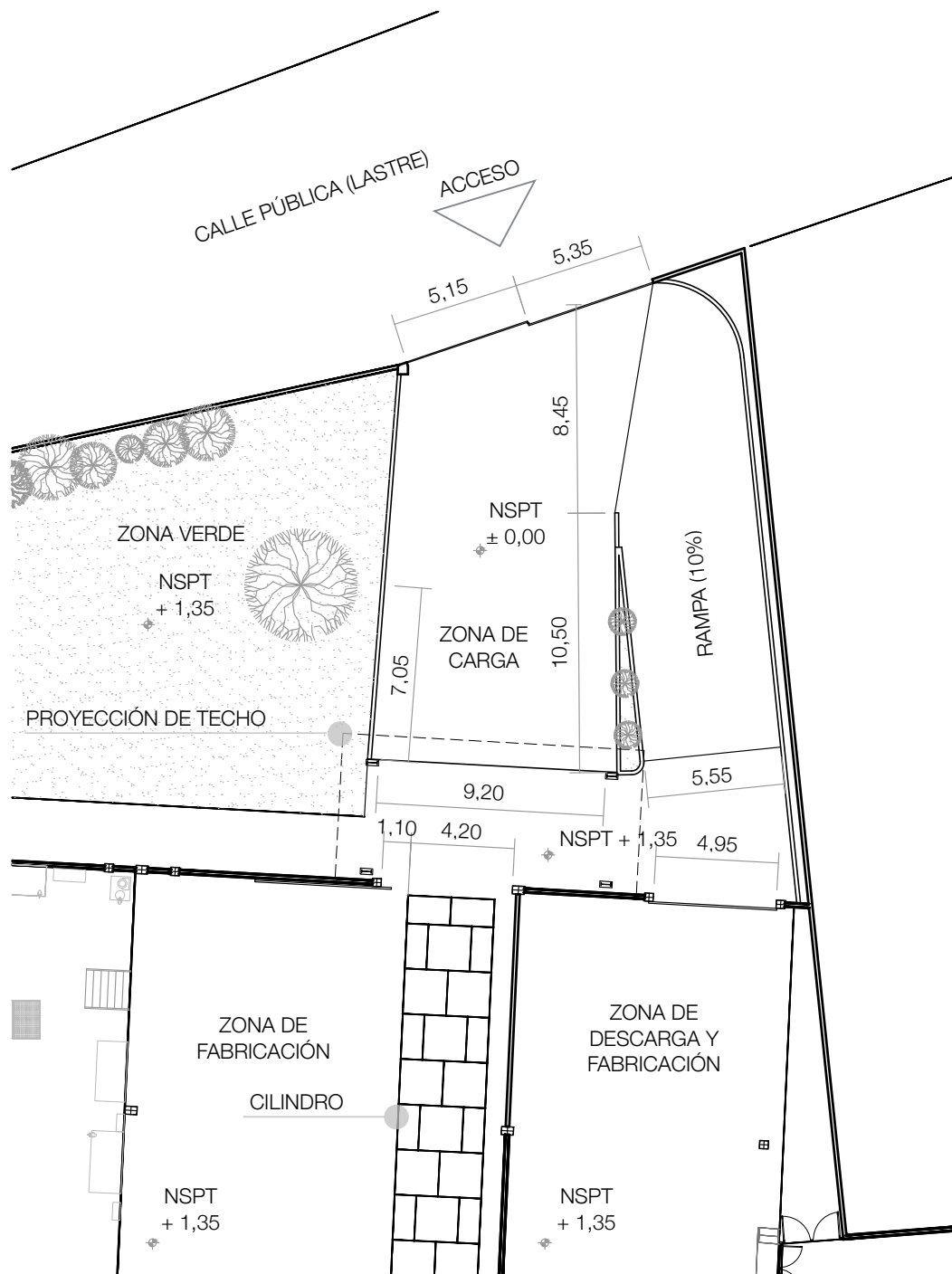


Figura 6. Esquema de la zona de carga de Industrias Bendig
Fuente: elaboración propia con base en plano de la planta

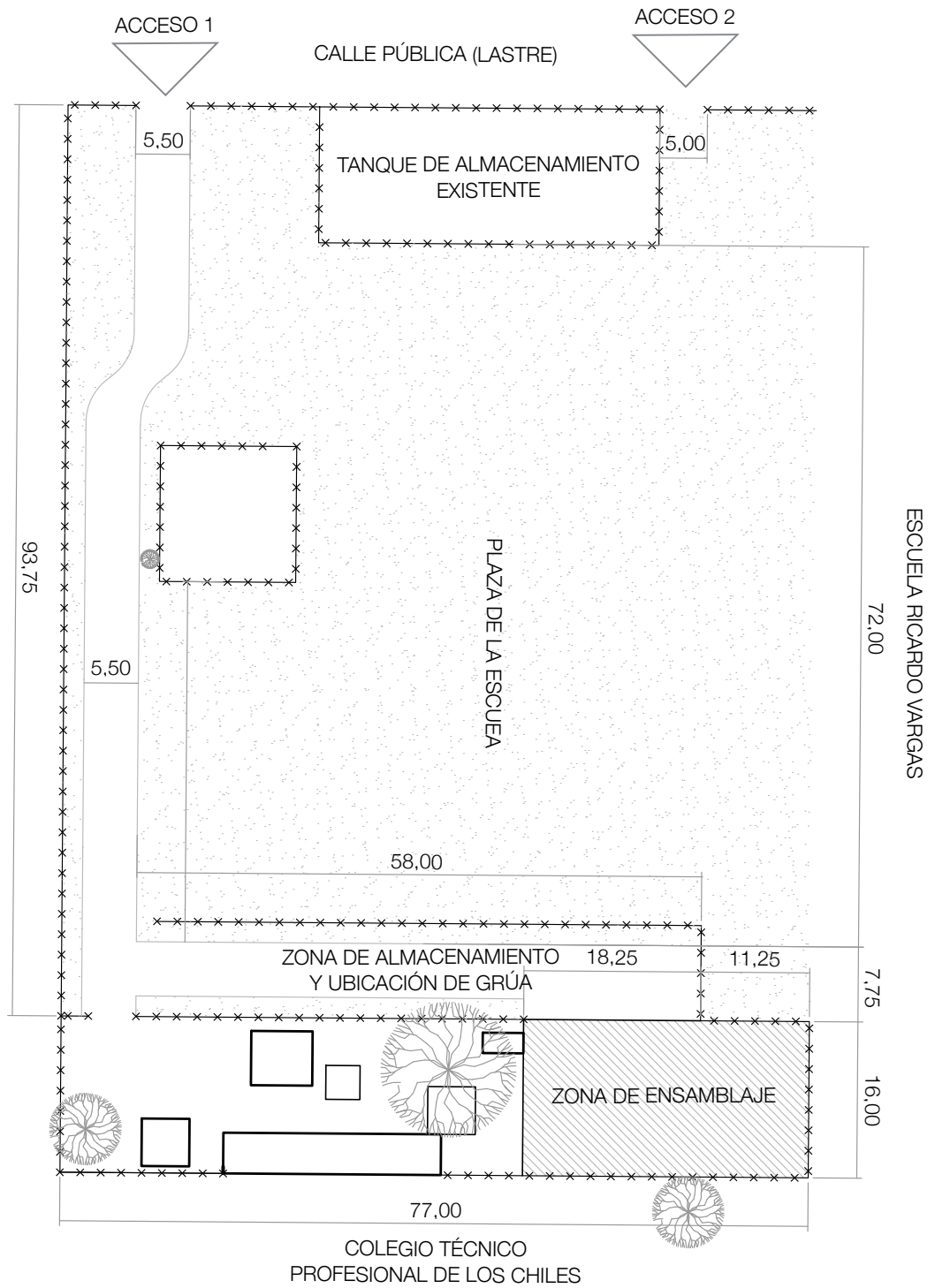


Figura 7. Esquema del sitio de ensamble del tanque de almacenamiento
Fuente: elaboración propia con base en croquis realizado

Preensamblaje de elementos

Conociendo las limitaciones de la planta y el sitio de ensamblaje, las regulaciones nacionales para el transporte de carga y las dimensiones y peso de la estructura (mediante el cálculo realizado con los planos estructurales), se procedió a determinar el nivel de preensamblaje con el que iban a ser fabricados y transportados los elementos tanto del cilindro como de la estructura de soporte, analizando los diferentes escenarios de carga disponibles. Como aporte adicional, se realizaron plantillas de los marcos y arriostres laterales a escala natural, que permitieron dimensionar de una mejor manera el proyecto y así tener un mejor criterio para la determinación de la forma como se fabricaron y transportaron los elementos y del equipo necesario para la carga y descarga de estos. En la *Figura 8* se muestra el esquema utilizado para analizar el nivel de pre ensamblaje de los marcos. En la *Figura 9* se muestra una fotografía de la plantilla realizada para los marcos de la estructura de soporte en la planta.

Elaboración de cuadros y esquemas

Una vez determinada la forma como se iban a fabricar y transportar los elementos, se procedió a elaborar los cuadros y esquemas de carga para determinar la cantidad de viajes, los equipos de carga necesarios y representar el procedimiento de carga de estos en la planta. También, se desarrolló el diseño de sitio y los esquemas de apilamientos de acuerdo con los lineamientos establecidos en el *Reglamento de Seguridad en Construcciones*.

Para el análisis del tipo y ubicación del equipo para el movimiento de cargas se realizaron consultas a la empresa designada para el alquiler del servicio (Cargas Especiales Mincho), quienes recomendaron la configuración de grúas a utilizar para el izaje tanto de la estructura de soporte como del cilindro del tanque. A pesar de esto, se analizaron los cuadros de carga de cada grúa para poder ubicarlas en la posición más conveniente de acuerdo con la actividad por ejecutar.

| CUADRO 1. DIMENSIONES MÁXIMAS PERMITIDAS Y PESO MÁXIMO PARA LAS CARGAS EN DIFERENTES TIPOS DE VEHÍCULO | | | | |
|---|-------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------|
| Tipo de vehículo | Ancho máximo (m) | Altura máxima (m) | Longitud máxima (m) | Peso (ton) |
| Tractocamión con doble semirremolque (T2-S1-S1) | 2,60 | 4,15 | 21,00 | 12,00 |
| Camión con remolque pesado (C2-R1) | | | 21,00 | 8,50 |
| Tractocamión con semirremolque (T3-S2) | | | 21,00 | 22,50 |
| Camión sin remolque | | | 12,00 | – |
| Camioneta "pick up" y "doble cabina" | | | 6,00 | – |
| Autobús articulado | | | 18,50 | – |
| Autobús normal | | | 14,00 | – |
| Buseta | | | 12,00 | – |
| Microbús | | | 8,00 | – |

Fuente: Reglamento de Circulación por Carretera con Base en el Peso y las Dimensiones de los Vehículos de Carga

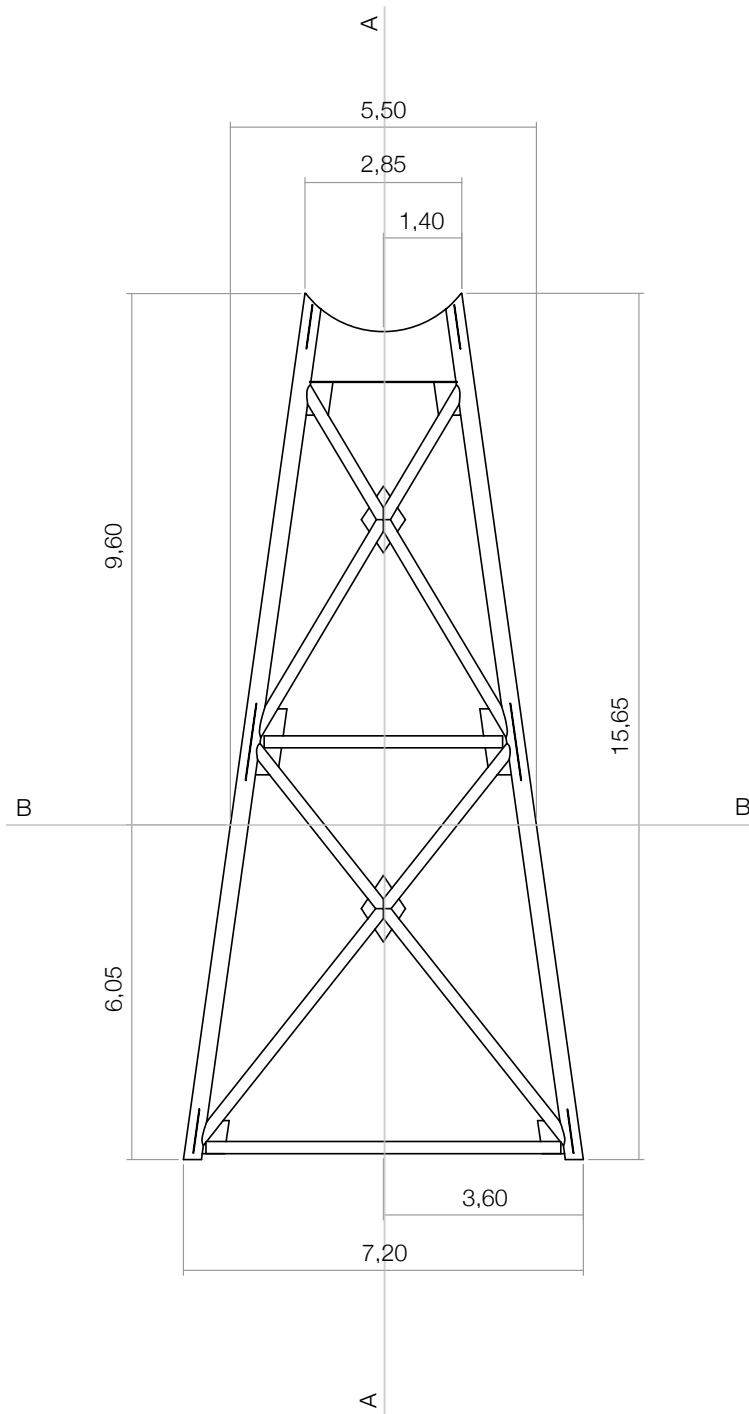


Figura 8. Esquema para el análisis del nivel pre ensamblaje de los marcos
Fuente: elaboración propia con base en planos de constructivos



Figura 9. Plantilla de marco a escala natural
Fuente: elaboración propia

Etapa 2: Logística de ensamblaje en sitio

Esta etapa consistió en la planificación de todas las actividades relacionadas con el ensamblaje en sitio de la estructura metálica del tanque de almacenamiento, con el objetivo de considerar todos los factores que las afecta. Se elaboró un programa de ensamblaje en el que se secuenciaron las actividades de forma que se optimizara el proceso; un manual de ensamblaje que dicta un protocolo para acoplar los elementos y un manual de supervisión de los procesos de soldadura y pintura, que se visualiza como una herramienta útil que permite la inspección visual para las personas designadas para llevar a cabo estas labores en el sitio.

Programación del proceso de ensamblaje

Las duraciones de las actividades se determinaron con base en las estimaciones realizadas por el subcontratista de la mano de obra del proyecto, las cuales se aumentaron en un 25% para tomar en consideración factores como las condiciones climáticas de la zona, problemas con el equipo (como las máquinas de soldar, el equipo Airless o la grúa) y la deficiencia en el suministro eléctrico. Tanto la definición de las actividades como la secuencia de estas fueron determinadas con base en la experiencia que tiene la empresa en la construcción de tanques de almacenamiento metálicos y en

consultas realizadas al subcontratista de la mano de obra.

Debido a que se utilizarían diferentes equipos para el movimiento de las cargas, en la programación se indican las fechas en las que estos deben entrar y salir del proyecto, de manera que se pudiera analizar la necesidad de cada equipo desde el punto de vista de tiempo y costo. Se realiza el mismo ejercicio con el andamiaje, en el que además se realiza un esquema para determinar la cantidad necesaria de andamios.

Elaboración de los manuales

El manual de ensamblaje se elaboró tomando como referencia principal la programación realizada y las plantillas a escala natural que se realizaron en la planta. La información de los aspectos de seguridad relevantes se obtuvo del *Reglamento de Seguridad en Construcciones*.

El manual de supervisión de soldadura y pintura se realizó basándose en la normativa internacional que rige para ambos procesos. En el caso de la supervisión de la soldadura por arco con electrodo revestido se utiliza lo estipulado por la *American Welding Society (AWS)* y para la inspección de los recubrimientos sobre superficies metálicas se utilizan los lineamientos establecidos por *The Society of Protective Coating (SSPC)*.

Etapa 3: Análisis estructural

En esta etapa se elaboraron dos modelos estructurales para realizar un análisis sísmico dinámico. En el primero se estudia los efectos del sismo en la estructura de soporte (considerando el peso del agua como carga permanente) y en el segundo, se evalúa la respuesta dinámica del cilindro con el líquido en su interior. La información para realizar los modelos se obtuvo de los planos estructurales y especificaciones técnicas, una memoria de cálculo proporcionada por el AyA, así como un informe elaborado por el Ing. Orlando Gei Brealey para la evaluación estructural de la losa de cimentación de concreto.

Definición de las unidades, propiedades y secciones

Los modelos se trabajaron en kilogramos y metros como unidades. Las propiedades de los materiales y las secciones utilizadas se definen de acuerdo con la información contenida en el Cuadro 2 y Cuadro 3, respectivamente.

Dibujo de la estructura

Con las propiedades y secciones definidas, se procede con el dibujo de los elementos de acuerdo con lo especificado en los planos estructurales, obteniendo como resultado el modelo que se observa en la Figura 10. La dirección X es paralela en la sección longitudinal del tanque y la Y es paralela a la sección transversal del mismo.

Como se menciona en párrafos anteriores, se crean dos modelos que, aunque en apariencia son iguales, su diferencia radica en la forma como es considerada el agua (ver definición de cargas). Los elementos definidos como secciones de área (Shell) se subdividen de manera que representen de una mejor manera los efectos generados por las cargas en ellos.

Es importante acotar que debido a que la cimentación en este caso se realiza mediante una losa flotante, en los nudos de la misma se asignan resortes (springs) cuya rigidez se determinó mediante el módulo de balasto para representar la interacción terreno – estructura.

El valor del módulo de balasto vertical (k_{30}) fue obtenido de la literatura para una placa de 0,30 m de lado en grava arenosa compactada

(debido a que la losa está rodeada por una sustitución con lastre compactado de 1,00 m de profundidad), por lo que debe ser convertido al valor de referencia (k_{BL}) con las dimensiones de las placas que se tienen en el modelo mediante la Ecuación 1:

$$k_{BL} = k_{30} \left(\frac{0,30}{B} \right) \left(1 + \frac{B}{2L} \right)^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

B: ancho de la placa

L: largo de la placa

El coeficiente teórico para el módulo de balasto horizontal (k_h), se determina con base en el valor de n_h obtenido de la literatura y con la Ecuación 2:

$$k_h = n_h \cdot 0,5H \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

H: espesor de la placa

| CUADRO 2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LOS MODELOS | | | | | |
|--|----------------------------------|--|---|--|--|
| Material | Densidad (kg/m ³) | Resistencia a la compresión (F' _c) (kg/cm ²) | Esfuerzo de fluencia (F _y) (kg/cm ²) | Esfuerzo de ruptura (F _u) (kg/cm ²) | Módulo de elasticidad (E) (kg/cm ²) |
| Concreto | 0,00 | 210,00 | – | – | 253456,35 |
| A500 – Grado B | 7850,00 | – | 3796,58 | 4485,58 | 2038901,90 |
| A36 | 7850,00 | – | 3248,18 | 4485,58 | 2038901,90 |

Fuente: elaboración propia con base en especificaciones técnicas

Nota: no se considera la densidad del concreto porque su peso no se toma en cuenta para efectos sísmicos.

CUADRO 3. SECCIONES UTILIZADAS EN LOS MODELOS

| Nombre | Abreviación | Tipo | Material | Dimensiones | | |
|-----------------------------------|-----------------|--------------|----------------|---------------|-----------------------|--------------|
| | | | | Diámetro (cm) | Ancho / Largo (cm) | Espesor (cm) |
| Nervadura | NERV | Frame | Concreto | – | 50,00 x 25,00 / 75,00 | – |
| Pedestal | PDSTL | Frame | Concreto | – | 60,00 / 60,00 | – |
| Tubo de 2,5" (estructura interna) | T2,5" | Frame | A500 – Grado B | 8,89 | – | 0,55 |
| Tubo de 8" (marco) | T8" (MARCO) | Frame | A500 – Grado B | 21,91 | – | 0,82 |
| Tubo de 8" (arriostre) | T8" (ARRIOSTRE) | Frame | A500 – Grado B | 21,91 | – | 0,82 |
| Tubo de 12" (marco) | T12" | Frame | A500 – Grado B | 32,39 | – | 0,95 |
| Ala inferior Viga I | VI15 | Frame | A36 | – | 15,00 | 0,95 |
| Ala superior Viga I | VI30 | Frame | A36 | – | 30,00 | 0,95 |
| Lámina de cilindro* | LC | Area (Shell) | A36 | – | – | Variable |
| Losa de cimentación | PC | Area (Shell) | Concreto | – | – | 100,00 |
| Alma Viga I | VI | Area (Shell) | A36 | – | – | 0,95 |

Fuente: elaboración propia con base en los planos constructivos y especificaciones técnicas

* El espesor del elemento varía de acuerdo con el modelo, ya que se utiliza para considerar o no el peso del agua (ver definición de cargas)

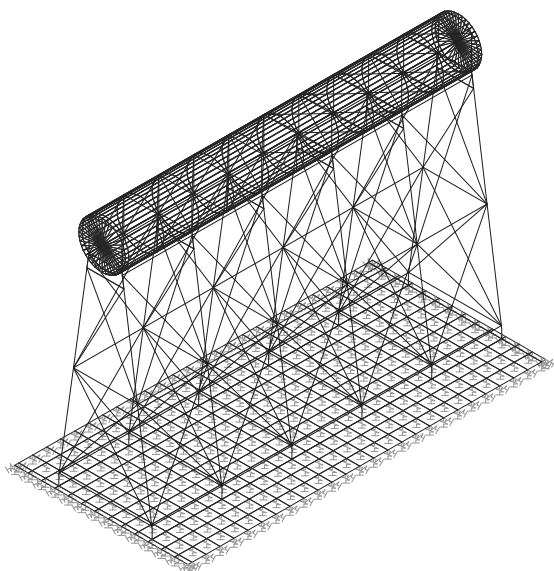


Figura 10. Modelo de la estructura
Fuente: SAP2000

Definición de cargas

En el modelo donde se estudian los efectos del sismo en la estructura de soporte (Modelo 1), se considera como carga permanente el peso propio de los elementos (calculado por el programa) y la carga debida a la totalidad del peso del agua, que se introduce cambiando el espesor de la lámina del cilindro por un espesor equivalente.

Por otra parte, en el modelo donde se evalúa la respuesta dinámica del cilindro con el líquido en su interior (Modelo 2), se considera el peso propio de los elementos (calculado por el programa) como carga permanente y el agua se introduce de acuerdo con lo establecido por el modelo de Housner, para determinar los efectos de la presión hidrodinámica que actúa sobre las paredes del depósito. Dicho modelo corresponde a una interpretación física de la ecuación de movimiento, transformando la acción oscilatoria

del líquido en apoyos elásticos (resortes) conectados a una masa convectiva, mientras que la masa impulsiva se interpreta como si estuviera unida en forma rígida a las paredes del depósito. En la *Figura 11* se muestra un esquema que representa el modelo.

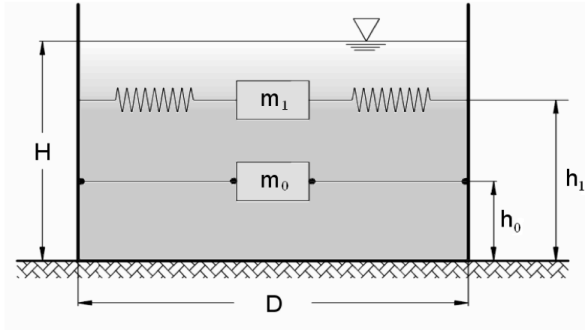


Figura 11. Esquema del modelo de Housner
Fuente: Penalba Sánchez, 2010

Debido a que las soluciones que se presentan del modelo se refieren a tanques cilíndricos verticales y tanques rectangulares, ambos rígidos y sometidos a movimiento de translación, los parámetros se determinan para un tanque rectangular equivalente con un ancho ($2a$) de 2,85 m, un largo ($2L$) de 26,75 m y una altura del nivel del agua de (H) de 3,30 m, cuyas ecuaciones se muestran a continuación:

$$m_0 = \frac{m \cdot \tanh\left(\frac{0,85a}{H}\right)}{\frac{0,85a}{H}} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$m_1 = \frac{0,83m \cdot \tanh\left(\frac{3,20H}{a}\right)}{\frac{3,20H}{a}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$z_0 = 0,38H \left[1 + \alpha \left(\frac{m}{m_0} - 1 \right) \right] \quad \text{Ecuación 5}$$

$$z_1 = H \left[1 - 0,0825 \frac{m}{m_1} \left(\frac{a}{H} \right)^2 \right] \quad \text{Ecuación 6}$$

$$+ 0,315\beta \frac{a}{H} \sqrt{0,07 \left(\frac{ma}{m_1 H} \right)^2 - 1} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$k_1 = 12g \frac{m_1^2 \cdot H}{m \cdot a^2}$$

Donde:

W : peso del líquido contenido
 g : aceleración de la gravedad

m : masa total del líquido contenido. $m = W/g$

m_0 : masa conectada rígidamente a la estructura (impulsiva)

m_1 : masa dinámica correspondiente al líquido en movimiento (convectiva)

z_0 : distancia del fondo a la conexión de la masa m_0

z_1 : distancia del fondo a la conexión de la masa m_1

k_1 : rigidez del resorte para la masa m_1

$\alpha = 0$

$\beta = 1$

Para asignar la masa convectiva y los resortes en el modelo se utiliza un elemento tipo "Link" y para la masa impulsiva se define un nudo en un diafragma.

Propiedades sísmicas de la estructura

Para realizar un análisis sísmico dinámico en SAP2000, es necesario definir las propiedades sísmicas de la estructura de acuerdo con lo establecido en el Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CSCR2010). El primer parámetro es el espectro de diseño, donde los pasos para su determinación se muestran en el *Cuadro 4* y el espectro se ilustra en la *Figura 12*.

| CUADRO 4. DETERMINACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO | | |
|--|--------------------|----------------------|
| Descripción | Resultado | Sección del CSCR2010 |
| Zona sísmica | II | 2.1. |
| Sitio de cimentación | S3 | 2.2. |
| Sistema estructural | Muro | 4.2.3. |
| Regularidad | Irregular moderado | - |
| Ductilidad local | Óptima | - |
| Ductilidad global asignada (μ) | 1,5 | Tabla 4.3. |
| Espectro de diseño | Figura 5.3. | Figura 5.3 |

Fuente: Código Sísmico de Costa Rica, 2010

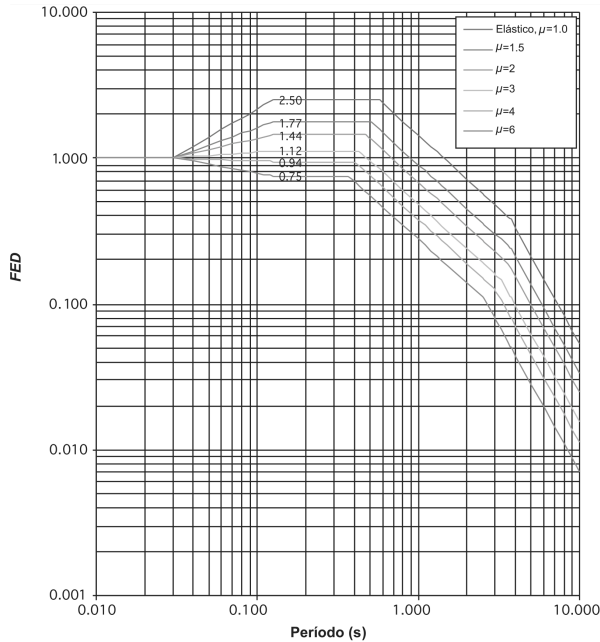


Figura 12. Gráfico del espectro de diseño para los sitios S_3 en la zona 2
Fuente: Código Sísmico de Costa Rica, 2010

Posteriormente, se procede con el cálculo del factor de escala para sismo, de acuerdo con la Ecuación 8.

$$F = \frac{a_{ef} \cdot I \cdot g}{SR} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde

a_{ef} : aceleración pico efectiva
 I : factor de importancia
 g : aceleración de la gravedad
 SR : factor de sobrerresistencia

Finalmente, las combinaciones de carga utilizadas se indican a continuación, con base en los apartados 6.3. y 7.3. del CSCR2010.

$$III \text{ COMB } X = 1,05CP \pm CSX \pm 0,30CSY \quad \text{Ecuación 9}$$

$$III \text{ COMB } Y = 1,05CP \pm CSY \pm 0,30CSX \quad \text{Ecuación 10}$$

$$IV \text{ COMB } X = 0,95CP \pm CSX \pm 0,30CSY \quad \text{Ecuación 11}$$

$$IV \text{ COMB } Y = 0,95CP \pm CSY \pm 0,30CSX \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

CP : carga permanente
 CSX : carga sísmica en sentido X

CSY : carga sísmica en sentido Y

Verificación del modelo

Para verificar que la información del modelo sea confiable, se realiza una comparación del primer modo de vibración determinado en el SAP2000 con la determinación realizada con el método estático. Los parámetros comparados son el periodo de vibración y el cortante en la base.

Determinación de los elementos críticos

Para determinar los puntos críticos más característicos de la estructura metálica ante un evento sísmico, se aplicaron los criterios de esfuerzo y redundancia (capacidad de otros elementos estructurales de tomar la carga del elemento que falla). Para el criterio de esfuerzo, se utilizaron las ecuaciones de interacción de acuerdo con lo establecido por el *American Institute of Steel Construction (AISC)*, que se muestran a continuación:

$$\text{Si } P_u \geq 0,20\phi P_n \quad \frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} \right) \leq 1,00 \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\text{Si } P_u < 0,20\phi P_n \quad \frac{P_u}{2\phi P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi M_{ny}} \right) \leq 1,00 \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

P_u : carga última en tensión o compresión
 ϕP_n : resistencia nominal a la tensión o compresión
 M_{ux} : momento último en sentido X
 ϕM_{nx} : momento nominal en sentido X
 M_{uy} : momento último en sentido Y
 ϕM_{ny} : momento nominal en sentido Y

La resistencia nominal a la tensión de los tubos redondos se determinó como el menor de los valores obtenidos con base en los estados límites de fluencia con el área neta efectiva y ruptura con el área gruesa, que se determinan mediante la Ecuación 15 y Ecuación 16, respectivamente.

$$\phi_{ty} P_n = 0,90 \cdot F_y \cdot A_{ne} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\phi_{tu}P_n = 0,75 \cdot F_u \cdot A_g \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

ϕ_{ty} : factor de reducción de la resistencia a la tensión en fluencia

A_{ne} : área neta efectiva

ϕ_{tu} : factor de reducción de la resistencia a la tensión en ruptura

A_g : área gruesa

Para determinar la resistencia nominal a la compresión de los tubos redondos, fue necesario determinar el esfuerzo crítico de pandeo (F_{cr}) como se muestra a continuación

$$\text{Si } F_e \geq 0,44F_y$$

$$F_{cr} = \left(0,658 \frac{F_y}{F_e}\right) F_y \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\text{Si } F_e < 0,44F_y$$

$$F_{cr} = 0,877F_y \quad \text{Ecuación 18}$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

F_e : esfuerzo crítico de pandeo elástico

K : factor de longitud efectiva

L : longitud del elemento

r : radio de giro del elemento

Con el esfuerzo crítico de pandeo se determinó la resistencia nominal a la compresión con la *Ecuación 20*:

$$\phi_c P_n = 0,90 \cdot F_{cr} \cdot A_g \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

ϕ_c : factor de reducción de la resistencia a la compresión

Debido a que las secciones de los tubos redondos utilizados son compactas, el momento nominal se determina mediante la *Ecuación 21* que corresponde al estado límite de fluencia. Al ser elementos simétricos, el momento nominal en ambas sentidos de análisis es el mismo.

$$\phi_b M_{nx} = \phi_b M_{ny} = 0,90 \cdot F_y \cdot Z \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde:

ϕ_b : factor de reducción de la resistencia a la flexión

Z : módulo de sección plástico

En cuanto a las paredes del cilindro, se revisan solo las tapas circulares del mismo (sentido X) de acuerdo con los resultados obtenidos mediante el método de Housner, verificando que el esfuerzo último no excediera el esfuerzo permisible establecido en la Tabla 5-2a de la norma API STANDARD 650 ($\sigma_u \leq \sigma_{perm}$), que se muestra en el *Anexo 1*.

En el caso de las placas de apoyo, se revisa el aplastamiento del concreto y el espesor de estas. Las ecuaciones utilizadas se muestran a continuación:

$$\phi_a R_n = 0,65(0,85F'_c) \cdot A_p \quad \text{Ecuación 22}$$

$$\phi_t P_n = \frac{0,90 \cdot F_y \cdot t^2 \cdot A_p}{2 \cdot m^2} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

ϕ_a : factor de reducción de la resistencia para el aplastamiento

A_p : área de la placa

t : espesor de la placa

m : tamaño de ala de la placa

También se realizó una revisión en flexión de la losa de cimentación y de la interacción de los pedestales. En cuanto a la losa, se verificó, en ambas direcciones de análisis, que el momento último no excediera el momento nominal ($M_u \leq \phi M_n$), que se calcula como se muestra a continuación:

$$a = \frac{A_s \cdot F_y}{\beta \cdot F'_c \cdot b} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$\phi_b M_n = 0,90 \cdot F_y \cdot A_s \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde:

A_s : área de acero por unidad de longitud

$\beta = 0,85$

b : ancho de franja

d : distancia a la fibra en compresión

Los valores para graficar el diagrama de interacción de los pedestales se obtuvieron por medio del SAP2000, sin aplicar los factores de reducción de la resistencia. Dichos valores se muestran en el *Cuadro 5*. Como los pedestales son simétricos, se evalúan ambas direcciones de análisis con el mismo diagrama.

CUADRO 5. VALORES PARA EL DIAGRAMA DE INTERACCIÓN DE LOS PEDESTALES

| P_n (kg) | M_n (kg-m) |
|------------------------------|--------------------------------|
| -660.872,00 | 0,00 |
| -660.872,00 | 31.654,00 |
| -606.537,00 | 48.418,00 |
| -515.308,00 | 61.833,00 |
| -416.768,00 | 72.155,00 |
| -303.052,00 | 80.538,00 |
| -220.904,00 | 78.376,00 |
| -137.042,00 | 71.146,00 |
| -46.581,00 | 57.363,00 |
| 65.013,00 | 32.703,00 |
| 191.597,00 | 0,00 |

Fuente: SAP2000

Etapa 4: Protocolo de inspección

Para la elaboración del protocolo de inspección se tomó como referencia principal el libro *Steel Water Storage Tanks: Design, Construction, Maintenance, and Repair*, que hace referencia a lo estipulado en el Manual M42 *Steel Water-Storage Tanks* publicado por la *American Water Works Association (AWWA)*. Además, se incluyó la información obtenida del análisis estructural realizado

Resultados

Prefabricación y transporte

Limitaciones en planta y sitio

El análisis de las limitaciones espaciales y de equipo de carga y descarga que se encontraron, tanto en la planta de producción como en el sitio de ensamblaje, se resumen en el *Cuadro 6*.

| CUADRO 6. LIMITACIONES ESPACIALES Y DE EQUIPO DE CARGA Y DESCARGA EN LA PLANTA DE PRODUCCIÓN Y EL SITIO DE ENSAMBLAJE | | |
|--|---|---|
| Ubicación | Espaciales | De equipo |
| Planta de producción | <ul style="list-style-type: none"> Solo se tiene capacidad para fabricar 2 marcos completos simultáneamente (en la zona de descarga y fabricación). El único acceso que se tiene a la planta es el que se encuentra en el frente de la rampa, debido a que el otro está obstruido por el cilindro. La zona de carga, la zona verde y la rampa son los únicos lugares donde una grúa tiene la capacidad para realizar movimientos, debido a que la planta está techada. Además, la comunicación entre estos lugares se ve interrumpida por la vegetación. | <ul style="list-style-type: none"> Solo se cuenta con un montacargas de 2000 kg de capacidad. Debido al ancho de la zona de carga, no es posible ubicar una plataforma (carreta) a la par de una grúa, por lo que para este efecto la última debe colocarse en la parte baja de la rampa. |
| Sitio de ensamblaje | <ul style="list-style-type: none"> La única entrada que se tiene al sitio es el Acceso 1 (para utilizar la plaza se debe contar con una autorización expresa de la escuela de la comunidad). La zona de ensamblaje es insuficiente para armar la totalidad de los marcos. La zona de almacenamiento y ubicación de la grúa es angosta, por lo que se debe planificar de manera adecuada el ingreso de la grúa. | <ul style="list-style-type: none"> Se debe evaluar el alquiler de distintos tipos de equipos para la descarga como: <ul style="list-style-type: none"> Grúas. Montacargas. Montacargas telescópicos. Retroexcavadoras. Se debe verificar que las plataformas puedan ingresar al sitio por el Acceso 1. Los equipos para el movimiento de carga solo pueden colocarse donde se indica, ya que solo se cuenta con un acceso al sitio de ensamblaje. |

Fuente: elaboración propia con base en análisis realizado



Figura 13. Obstrucción de acceso debido al cilindro
Fuente: elaboración propia



Figura 14. Zona de carga
Fuente: elaboración propia



Figura 15. Acceso 1 en el sitio de ensamblaje
Fuente: elaboración propia

Regulaciones nacionales

En cuanto al transporte de las cargas por carretera se debe considerar lo siguiente:

- Las dimensiones máximas de la carga son: 2,60 m de ancho, 2,65 m de alto y 12,00 m de largo.
- El peso máximo de un elemento o conjunto de elementos no puede exceder las 22,50 toneladas de peso.
- Se debe contar con un permiso para los elementos que excedan las dimensiones y el peso establecido. Sin embargo, se debe tener en cuenta que dichos elementos deben ser indivisibles, así como la dificultad que representa la carga de los mismos.

Determinación del nivel de preensamblaje

Con base en las limitaciones, regulaciones, dimensiones (obtenidas de los planos de taller) y peso de la estructura (que se muestran en el Cuadro 7), se determina que el cilindro se transportará en dos mitades. En cuanto a la estructura de soporte, se determina que será fabricada y transportada en elementos independientes, de acuerdo con lo mostrado en las Figuras 16 y Figura 17.

| CUADRO 7. DETERMINACIÓN DEL PESO DE LA ESTRUCTURA | | |
|--|-----------------|---------------|
| Descripción | Cantidad | Unidad |
| Peso por marco | 5,70 | ton |
| Peso por cuerpo de arriostres | 2,48 | ton |
| Peso total de la estructura de soporte | 59,00 | ton |
| Peso del cilindro | 20,10 | ton |
| Peso total del tanque de almacenamiento | 79,10 | ton |

Fuente: elaboración propia con base en cálculos realizados

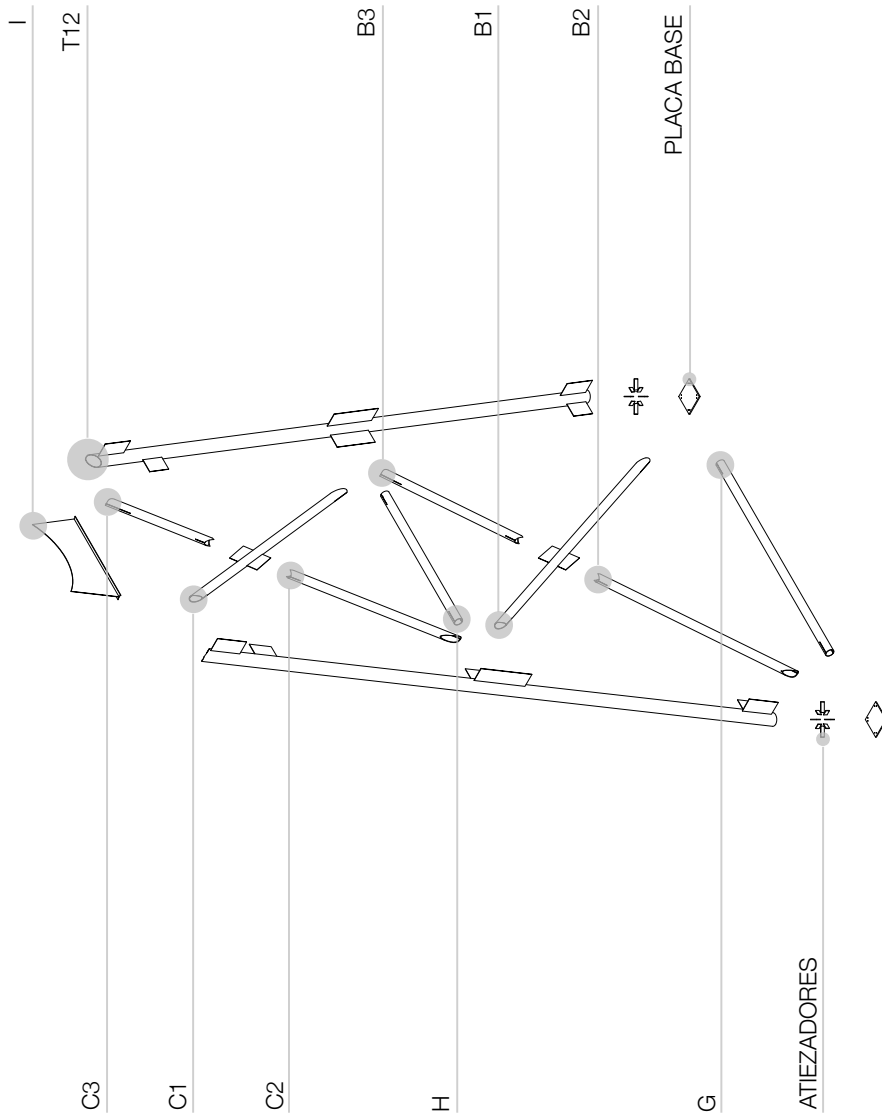


Figura 16. Esquema del fabricación de elementos de los marcos de la estructura de soporte
Fuente: elaboración propia con base en planos de taller

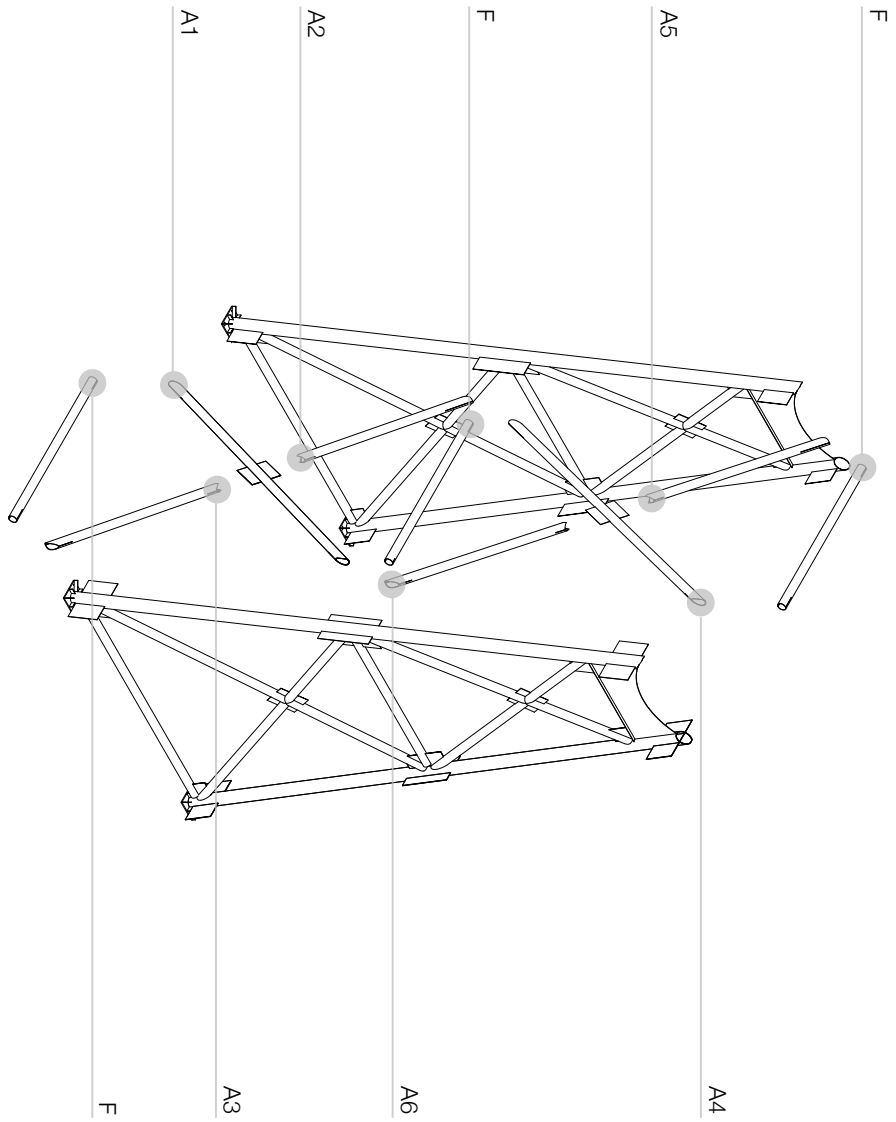


Figura 17. Esquema del fabricación de elementos de los arriostres de la estructura de soporte
Fuente: elaboración propia con base en planos de taller

Cuadros y esquemas

En el *Cuadro 8* se muestra la determinación de la cantidad de viajes que se realizarán, el contenido (especificando la cantidad y el peso) y los equipos necesarios para la carga y transporte de cada uno. Para los viajes 2, 4 y 5 se realizaron

esquemas de carga donde se especifica la forma como iban a ser cargados. Dichos esquemas se muestran en las *Figuras 18* y *Figura 19*. El diseño de sitio se muestra en la *Figura 20* y los esquemas de apilamiento se ilustran en la *Figura 21*.

| CUADRO 8. ELEMENTOS PREFABRICADOS POR VIAJE | | | | | | | | |
|---|-------|---|---------------|----------|--------|---------------------|------------------|----------------------|
| Número de Viaje | Ítem | Descripción | Dimensión (m) | Cantidad | Unidad | Peso unitario (ton) | Peso total (ton) | Peso por viaje (ton) |
| 1 ^{1,4} | B1 | Tubo de 8" + Placa C (marco) | 9,11 | 6 | unidad | 0,42 | 2,49 | 11,37 |
| | B2 | Tubo de 8" (marco) | 5,37 | 6 | unidad | 0,22 | 1,34 | |
| | B3 | Tubo de 8" (marco) | 3,70 | 6 | unidad | 0,15 | 0,93 | |
| | C1 | Tubo de acero de 8" + Placa C (marco) | 7,25 | 6 | unidad | 0,34 | 2,03 | |
| | C2 | Tubo de 8" (marco) | 4,52 | 6 | unidad | 0,19 | 1,13 | |
| | C3 | Tubo de 8" (marco) | 2,71 | 6 | unidad | 0,11 | 0,68 | |
| | G | Tubo de 8" (marco) | 6,40 | 6 | unidad | 0,27 | 1,60 | |
| | H | Tubo de 8" (marco) | 4,30 | 6 | unidad | 0,18 | 1,08 | |
| | AT | Atiezadores | – | 96 | unidad | 0,00 | 0,10 | |
| 2 ^{2,5,7} | T12.1 | Tubo de 12" + Placa A + Placa B + Placa A.1 + Placa B.1 (marco) | 15,75 | 4 | unidad | 1,30 | 5,20 | 17,60 |
| | T12.2 | Tubo de 12" + Placa A.1 + Placa B.1 + Placa D y E + Placa F (marco) | 15,75 | 8 | unidad | 1,55 | 12,40 | |
| 3 ^{1,4} | A1 | Tubo de 8" + Placa C (arriostre) | 8,78 | 10 | unidad | 0,40 | 4,02 | 22,45 |
| | A2 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,38 | 10 | unidad | 0,18 | 1,83 | |
| | A3 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,39 | 10 | unidad | 0,18 | 1,83 | |
| | A4 | Tubo de 8" + Placa C (arriostre) | 9,17 | 10 | unidad | 0,42 | 4,18 | |
| | A5 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,57 | 10 | unidad | 0,19 | 1,90 | |
| | A6 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,59 | 10 | unidad | 0,19 | 1,91 | |
| | F | Tubo de 8" (arriostre) | 4,70 | 30 | unidad | 0,20 | 5,88 | |
| | I | Viga I | – | 6 | unidad | 0,15 | 0,90 | |
| 4 ^{3,6,7} | S1 | Sección de cilindro 1 (6 anillos 1,83 m + 1 anillo 1,13 m) | 13,94 | 1 | global | 10,05 | 10,05 | 10,05 |
| 5 ^{3,6,7} | S2 | Sección de cilindro 2 (6 anillos 1,83 m) | 12,81 | 1 | global | 10,05 | 10,05 | |
| 6 ^{1,4} | EL | Escalera lateral | – | 1 | global | 0,55 | 0,55 | 2,75 |
| | BS | Secciones baranda superior | – | 9,5 | global | 0,02 | 0,20 | |
| | SA | Secciones de anillos | – | 8 | unidad | 0,25 | 2,00 | |

Fuente: elaboración propia con base en planos de constructivos y cálculos realizados

¹ Plataforma de 2,44 x 12,00 m, ² Plataforma de 2,44 x 14,00 m, ³ Lowboy, ⁴ Montacargas, ⁵ Grúa de 15 ton de capacidad, ⁶ Grúa de 35 ton de capacidad, ⁷ Requiere permiso especial por sobredimensión.

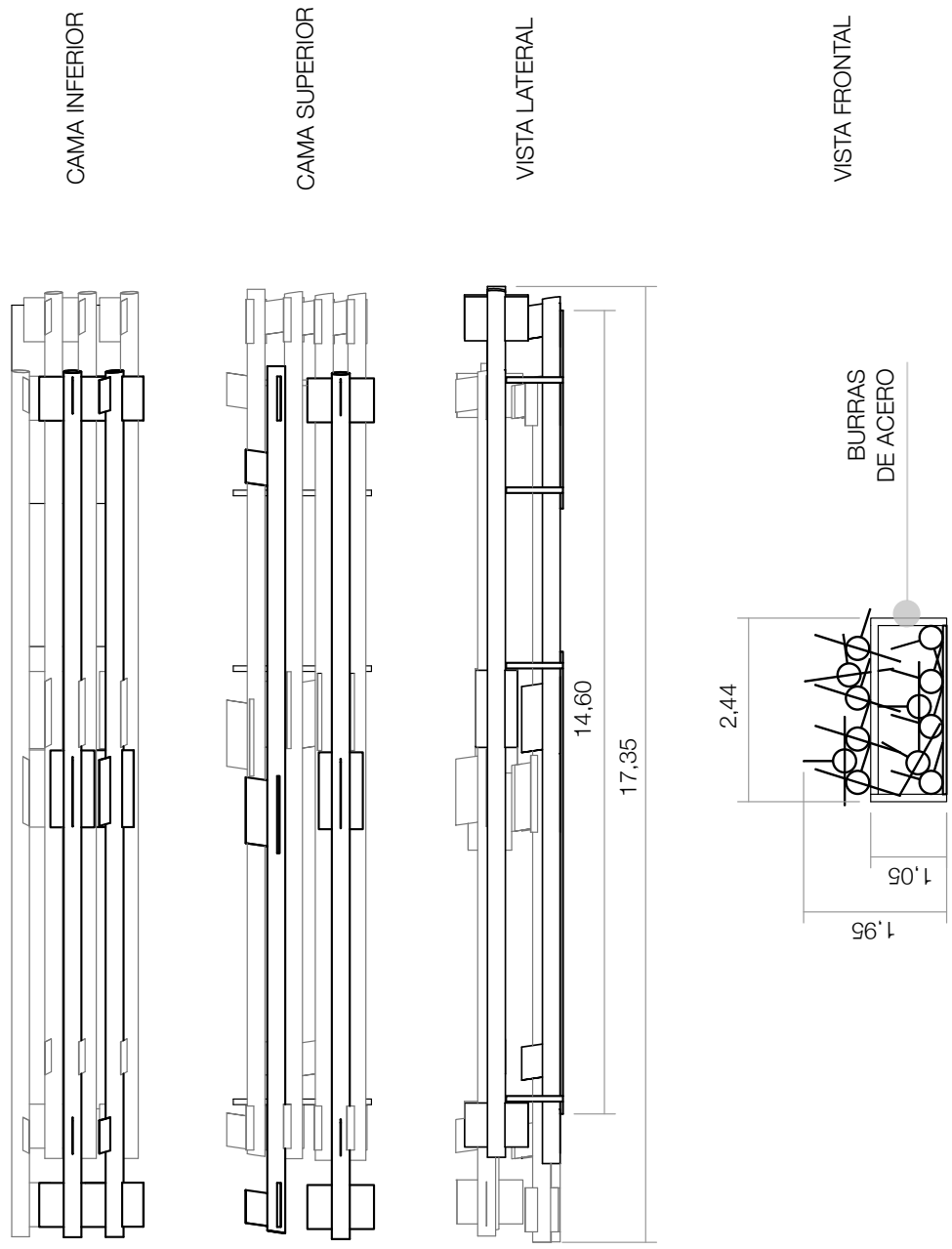


Figura 18. Esquema de carga del viaje 2
Fuente: elaboración propia con base en planos de taller e información del transportista

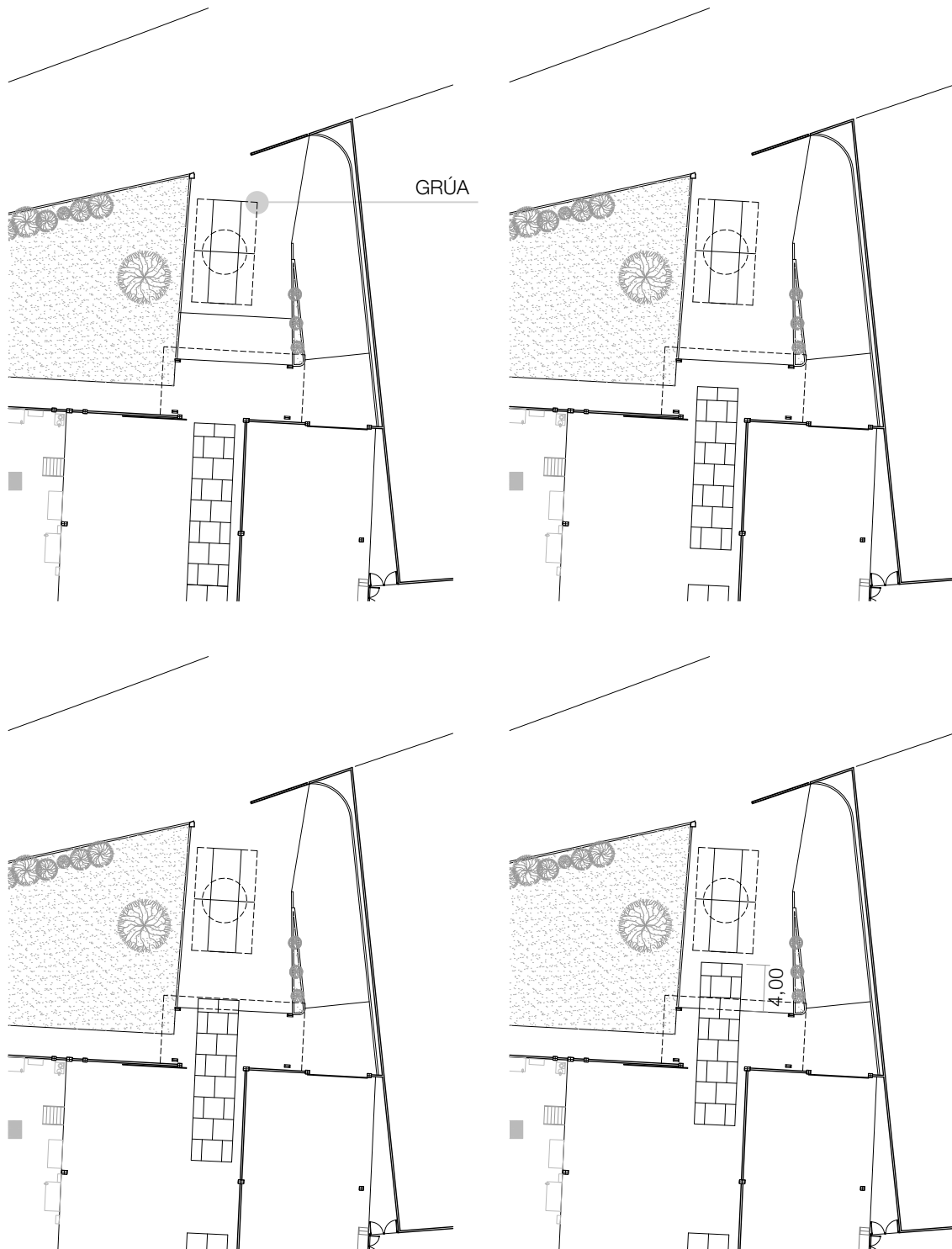


Figura 19. Planteamiento del procedimiento de carga de las secciones del cilindro
 Fuente: elaboración propia con base en plano de la planta



Figura 14. Continuación
Fuente: elaboración propia con base en plano de la planta

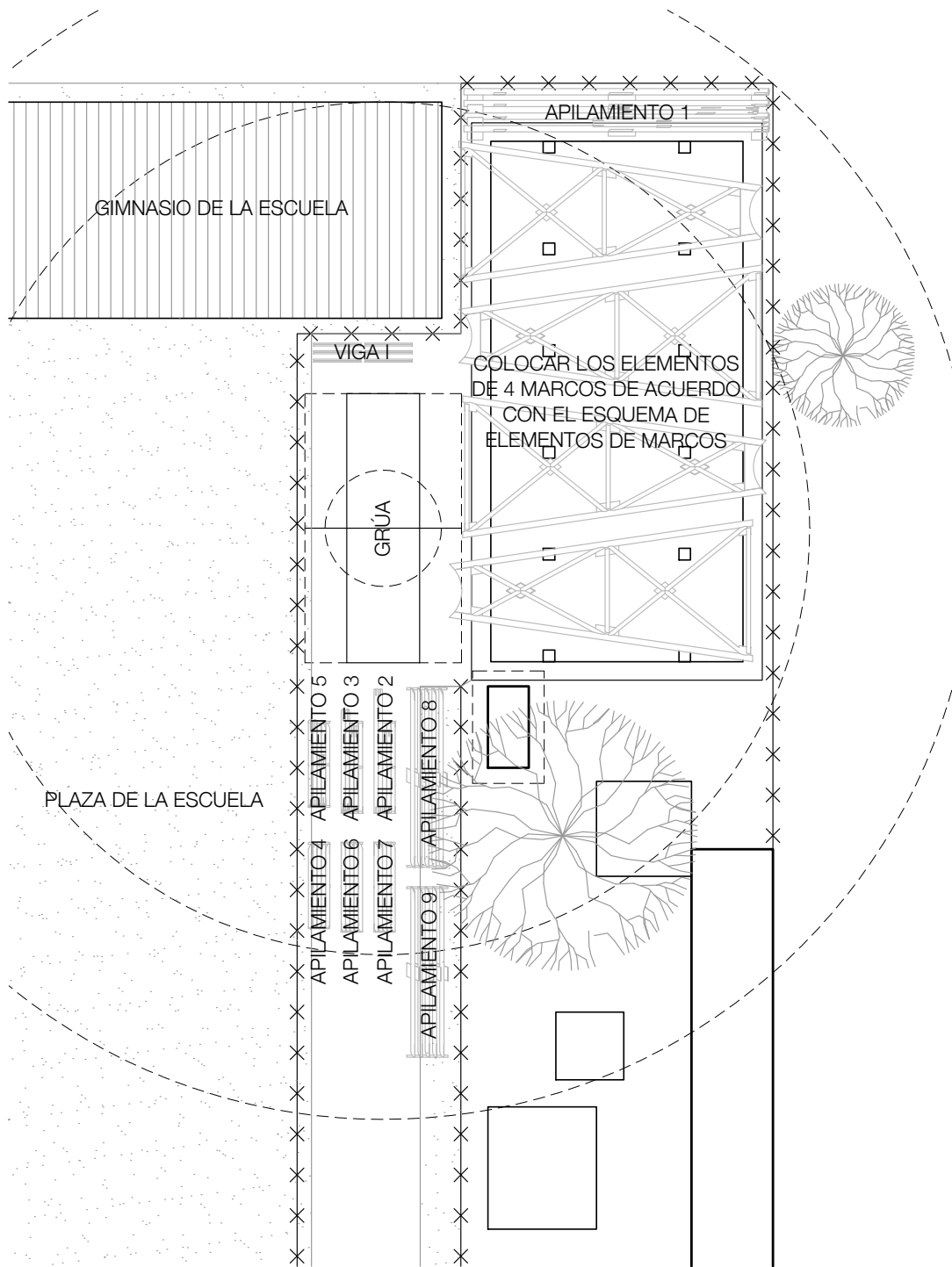


Figura 20. Diseño de sitio
 Fuente: elaboración propia con base en croquis realizado

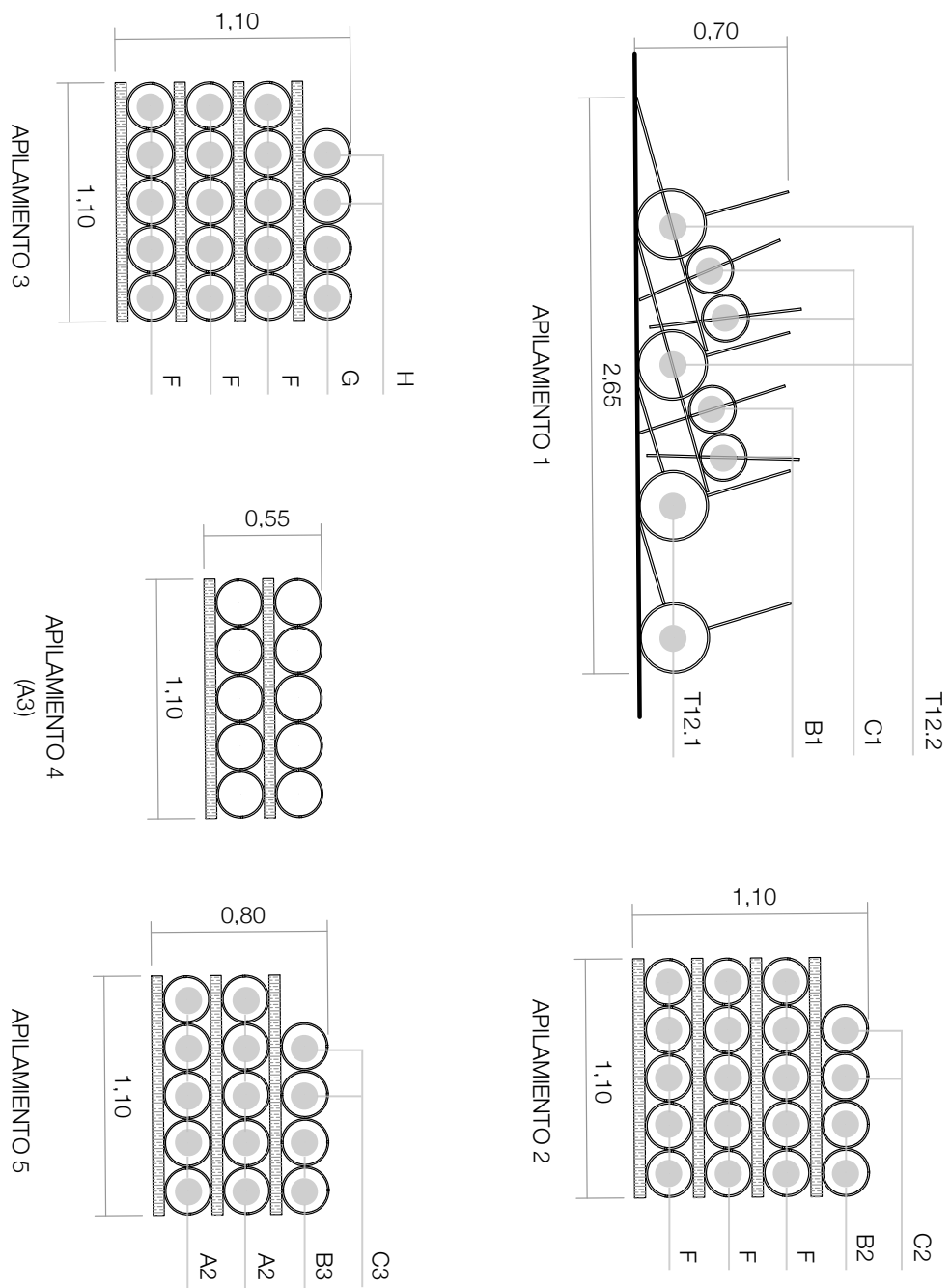


Figura 21. Esquema de apilamientos
Fuente: elaboración propia con base en planos de taller y lo estipulado en el Reglamento de seguridad en construcciones

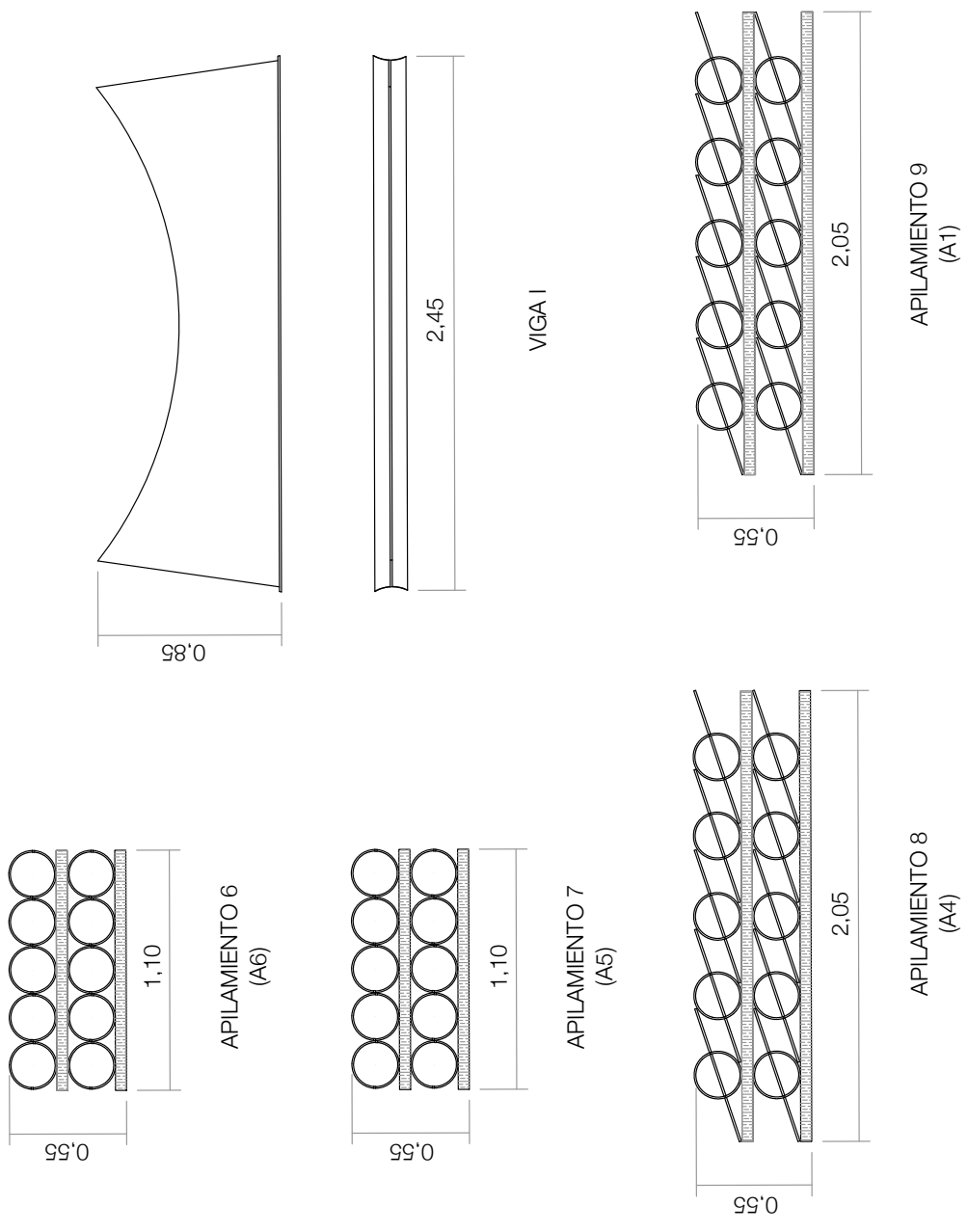


Figura 21. Continuación
Fuente: elaboración propia con base en planos de taller y lo estipulado en el Reglamento de seguridad en construcciones

Con la información proporcionada por la empresa donde se alquila el equipo para el movimiento de cargas, se desarrollan los diagramas de alcance y carga de las grúas (como el que se muestra en la *Figura 22*) para determinar la ubicación de

cada una. La grúa que se muestra en el diseño de sitio corresponde a la grúa de 80 toneladas de capacidad que es la que estaría más tiempo en el sitio de ensamblaje.

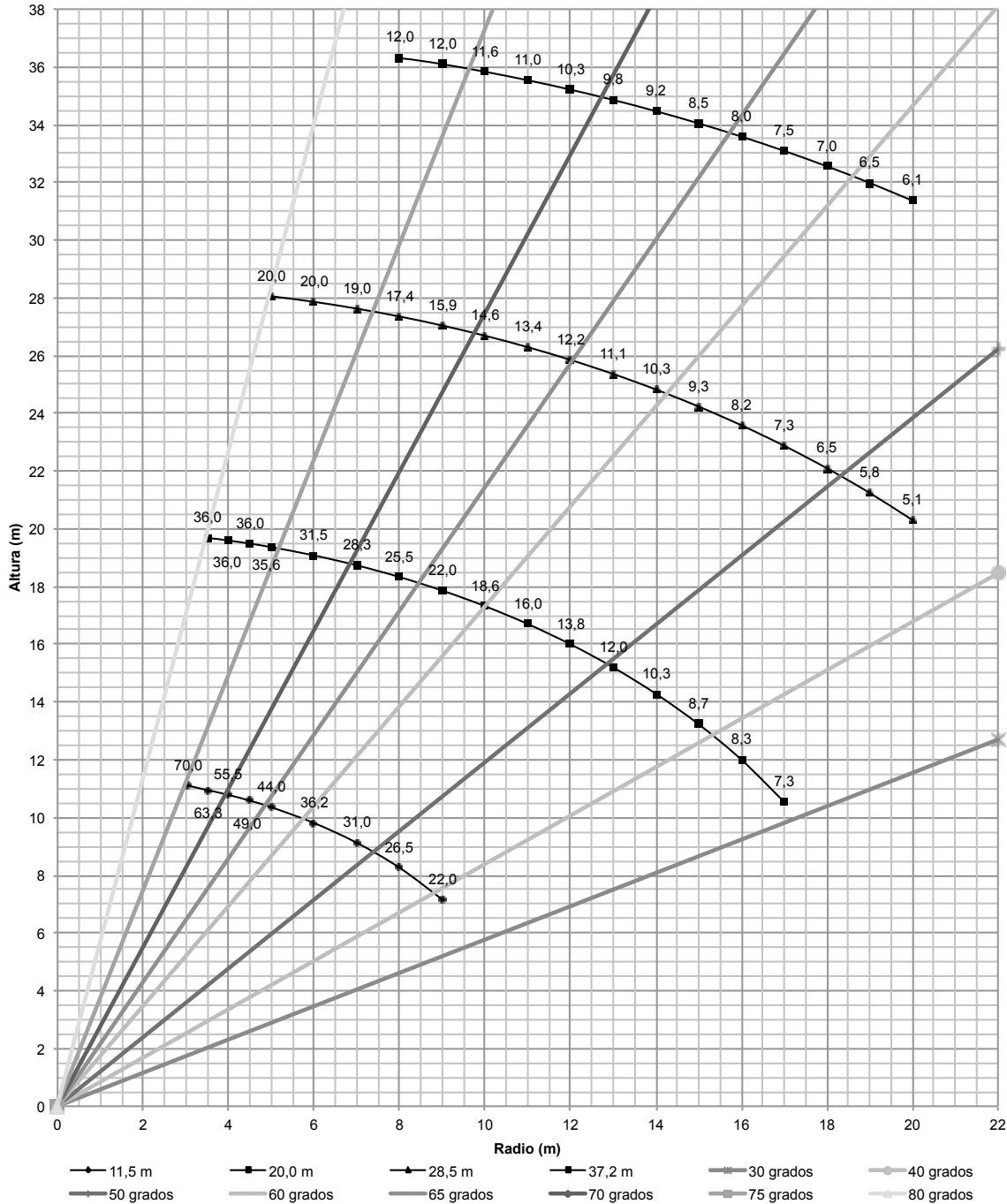


Figura 22. Diagrama de alcance y carga de la grúa de 80 toneladas de capacidad
Fuente: elaboración propia con base en cuadro de carga proporcionado por el operador de la grúa



Figura 23. Fotografía del viaje 1
Fuente: elaboración propia



Figura 26. Proceso de carga de la sección 1 del cilindro
Fuente: elaboración propia



Figura 24. Proceso de carga del viaje 2
Fuente: elaboración propia



Figura 27. Proceso de carga de la sección 1 del cilindro
Fuente: elaboración propia



Figura 25. Fotografía del viaje 2
Fuente: elaboración propia



Figura 28. Fotografía del viaje 4
Fuente: elaboración propia



Figura 29. Apilamientos de tubería en el sitio de ensamblaje
Fuente: elaboración propia

Ensamblaje

Programación

El programa de ensamblaje en sitio realizado se muestra en la *Figura 31*, donde se indican las actividades necesarias para llevar a cabo el ensamblaje del tanque de almacenamiento, especificando la duración (fecha de comienzo y fecha de fin) y las relaciones entre las mismas. Es importante mencionar que a cada actividad se le asignaron los recursos para poder analizar resolver los conflictos generados. Además, el horario de trabajo considerado es de lunes a domingo de 6:00 a.m. a 6:00 p.m., incluyendo los feriados como días hábiles de trabajo, de acuerdo con las conversaciones que se tuvieron con el subcontratista de la mano de obra.

Para analizar el uso de la grúa desde un punto de vista de costo se utilizaron tablas como la que se muestra en el *Cuadro 9*, para comparar el costo de los diferentes esquemas de grúas propuestos por la empresa de alquiler. De la misma manera, se realiza una comparación de las ofertas para el andamiaje, que se muestra en el *Cuadro 10*, con base en la cantidad

determinada mediante el esquema que se ilustra en la *Figura 32*

Es importante acotar que debido a que para izar el cilindro es necesario el uso de dos grúas simultáneamente, se realizó un esquema a fin de determinar el porcentaje de la carga que izaría cada una. Dicho esquema se muestra en la *Figura 30*.

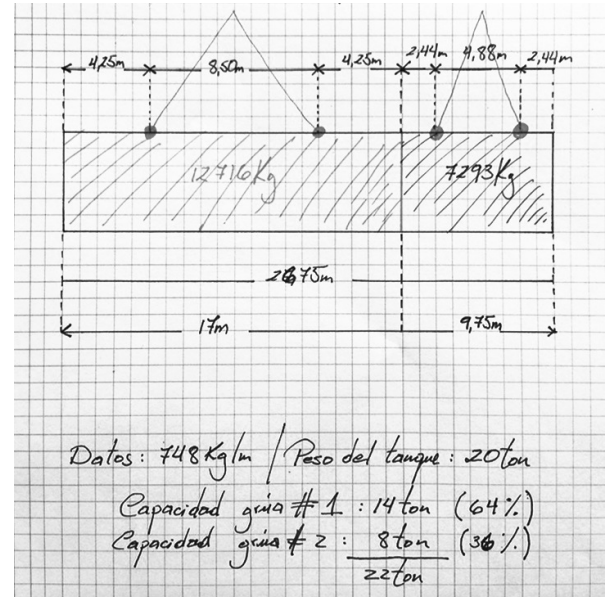


Figura 30. Esquema de izaje de cilindro
Fuente: elaborado por Allan Padilla.

Manual de Ensamblaje

En el Manual de Ensamblaje (que se muestra por completo en el *Apéndice 1*) se realiza una descripción de los elementos de acuerdo con lo mostrado en las *Figuras 16* y *17*. También en el *Cuadro 11* se efectúa una descripción del proceso de ensamblaje de acuerdo con las actividades indicadas en el programa realizado que se muestra en la *Figura 31*. Por último se describen los equipos necesarios para el ensamblaje y se enuncian las recomendaciones de seguridad de acuerdo con lo establecido en el Reglamento de seguridad en construcciones.

CUADRO 9. COMPARACIÓN DEL COSTO DE LOS EQUIPOS PARA EL MOVIMIENTO DE CARGAS

| Equipo | Actividad | Duración (días) | Costo | | Costo total |
|------------------|--|-----------------|-------------|-------------|----------------|
| | | | Transporte | Diario | |
| Esquema 1 | | | | | |
| Grúa de 80 ton | Descarga, ensamblaje y volteo de marcos y ensamblaje de arriostres | 26 | €900.000,00 | €360.000,00 | €10.260.000,00 |
| Grúa de 80 ton | Izajes | 4 | – | €900.000,00 | €3.600.000,00 |
| Grúa de 45 ton | Izaje del cilindro | 1 | €450.000,00 | €450.000,00 | €900.000,00 |
| Total | | | | | €14.760.000,00 |
| Esquema 2 | | | | | |
| Retro excavadora | Descarga y ensamblaje de marcos | 20 | – | – | €300.000,00 |
| Grúa de 20 ton | Volteo de marcos | 1 | €250.000,00 | €250.000,00 | €500.000,00 |
| Grúa de 80 ton | Ensamblaje de arriostres | 12 | €900.000,00 | €360.000,00 | €5.220.000,00 |
| Grúa de 80 ton | Izajes | 4 | – | €900.000,00 | €3.600.000,00 |
| Grúa de 45 ton | Izaje de cilindro | 1 | €450.000,00 | €450.000,00 | €900.000,00 |
| Total | | | | | €10.520.000,00 |

Fuente: elaboración propia con base en información proporcionada por la empresa de alquiler

Nota: el costo de los equipos es un estimado proporcionado por la empresa de alquiler

CUADRO 10. COMPARACIÓN DE LAS OFERTAS DE ANDAMIAJE

| Descripción | Empresa REECO | | | | Empresa RENTECO | | | | |
|------------------------|---------------|-----|----------------|-------------|-----------------|-----|----------------|-------------|------------|
| | Cant. | Un. | Costo Unitario | Costo Total | Cant. | Un. | Costo Unitario | Costo Total | |
| Cuerpos | 152 | un | \$- | \$- | 152 | un | \$- | \$- | |
| Marcos | 304 | un | \$4,23 | \$1.285,92 | 304 | un | \$4,44 | \$1.350,22 | |
| Crucetas | 304 | un | \$1,13 | \$343,52 | 304 | un | \$1,19 | \$360,70 | |
| Acoples | 608 | un | \$0,54 | \$328,32 | 608 | un | \$0,57 | \$344,74 | |
| Plataformas | 228 | un | \$7,65 | \$1.744,20 | 228 | un | \$8,03 | \$1.831,41 | |
| Rodines | 56 | un | \$4,23 | \$236,88 | 56 | un | \$4,44 | \$248,72 | |
| Transporte | 2 | gb | \$665,00 | \$1.330,00 | 2 | gb | \$900,00 | \$1.800,00 | |
| Total | | | | \$5.268,84 | Total | | | | \$5.935,78 |
| Características | | | | | | | | | |
| Plataformas por cuerpo | 1,5 | | | | 1,5 | | | | |
| Costo por cuerpo | \$28,18 | | | | \$29,59 | | | | |
| Periodo de cobro | Mes | | | | Mes | | | | |
| Disponibilidad | Sí | | | | Sí | | | | |

Fuente: elaboración propia con base en información proporcionada por la empresas de alquiler

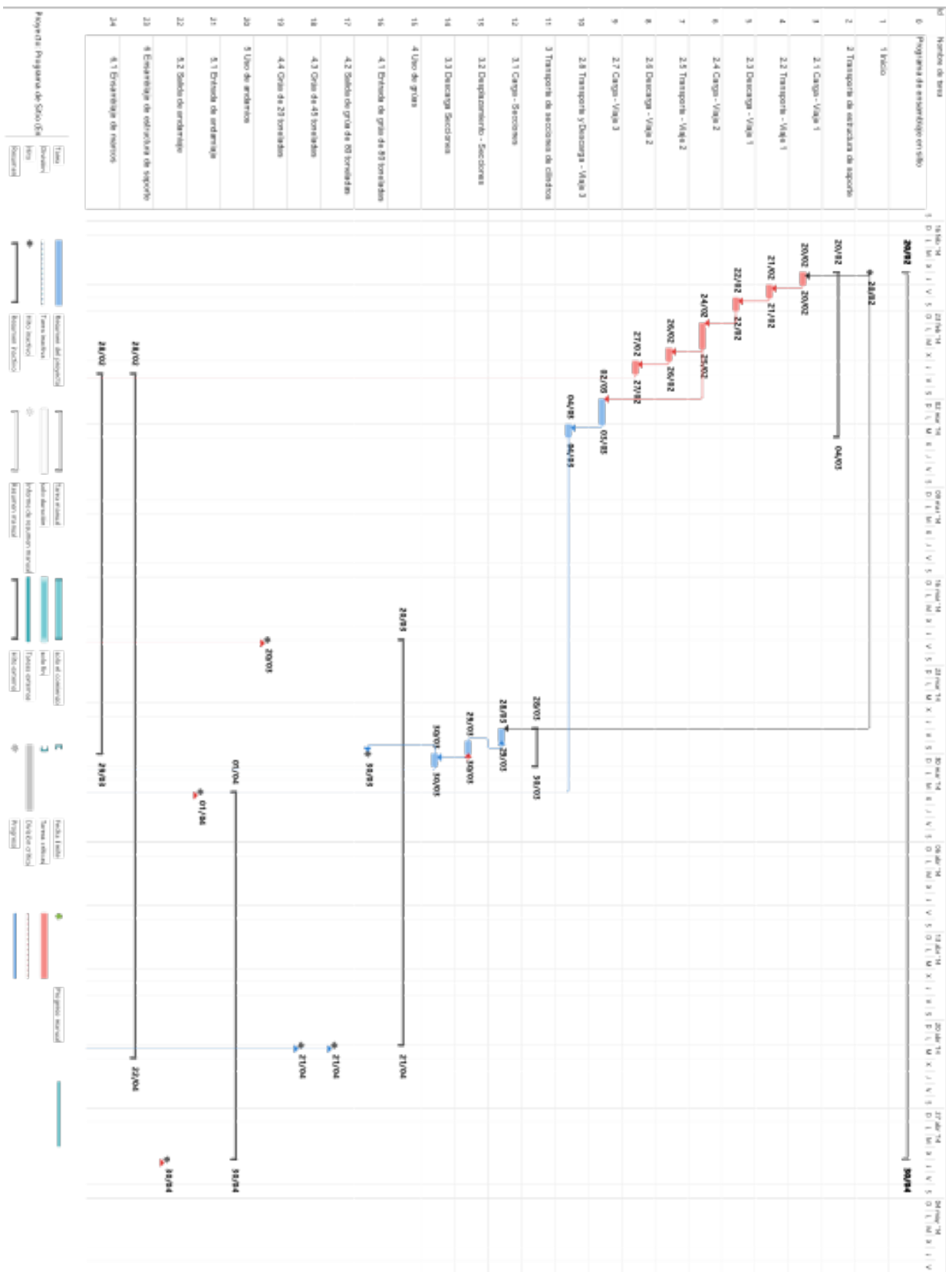


Figura 31. Programa de ensamble
Fuente: Microsoft Project 2013

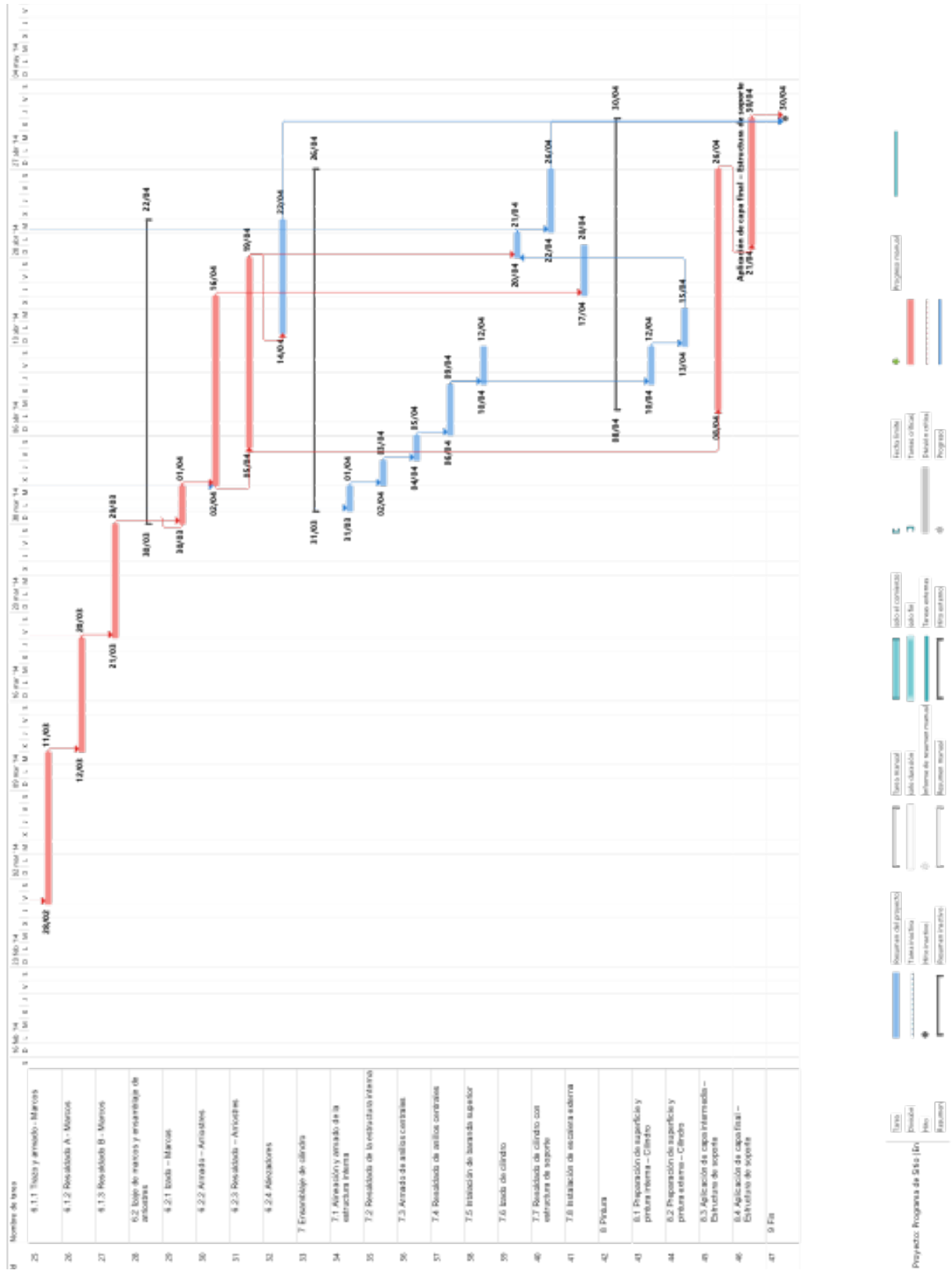


Figura 31. Continuación
Fuente: Microsoft Project 2013

| CANTIDAD | DESCRIPCIÓN |
|----------|-------------------------------|
| 304 | MARCOS |
| 608 | PINES O CONECTORES |
| 72 | BASES AJUSTABLES PARA ANDAMIO |
| 152 | TABLAS DE ALUMINIO |
| 304 | CRUCETAS |

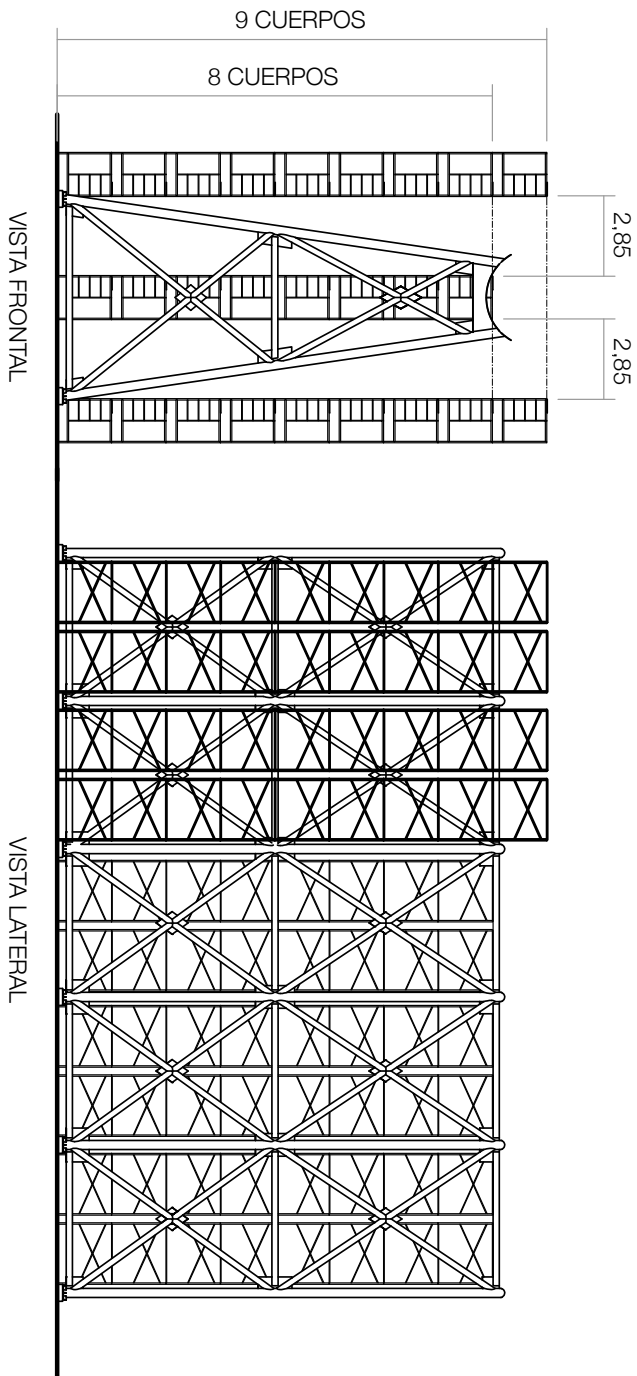
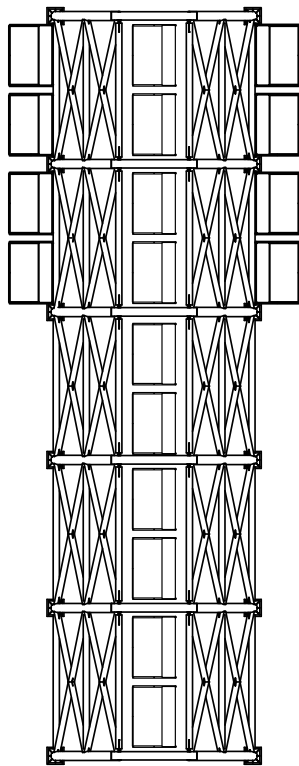


Figura 32. Esquema de andamiaje
Fuente: elaboración propia con base en planos constructivos

CUADRO 11. DESCRIPCIÓN DE TAREAS, MANO DE OBRA Y EQUIPO NECESARIO PARA EL PROCESO DE ENSAMBLAJE

| Entregable | Actividad | Tarea | Descripción de tarea | Mano de obra | Equipo |
|-----------------------|--------------------------|--|--|---------------------|---|
| Estructura de soporte | Ensamblaje de marcos | Trazo y armado ¹ | Se realiza el trazo de los elementos de acuerdo con el esquema de ensamblaje de marcos (ver <i>Figura 5</i>) y se apuntalan en su lugar | Armador | Grúa, máquina de soldar (pequeña) |
| | | Resoldado A | Se aplican los cordones finales de soldadura en las uniones de los elementos de la cara superior de los marcos | Soldador | Máquina de soldar (grande) |
| | | Resoldado B | Se voltean los marcos y se procede con la aplicación de los cordones finales de soldadura en las uniones de los elementos de la cara inferior | Soldador | Grúa, máquina de soldar (grande) |
| | | Preparación de superficies para pintura | Se realiza la remoción de la escoria en los cordones de soldadura y el lijado, limpieza y retoque de la pintura base en los marcos | Ayudante (pintura) | Equipo menor de pintura |
| | | Aplicación de las capas de pintura | Se realiza la aplicación de las capas intermedia y final en los marcos | Pintor | Sistema Airless |
| | Ensamblaje de arriostres | Nivelación de pedestales | Se realiza la nivelación de los pedestales con mortero expansivo de alta fluidez y se colocan las placas de base | Ayudante | – |
| | | lizado de marcos ² | Se realiza el levantamiento de los marcos y se le colocan los arriostres temporales (pie de amigo) para que se mantengan en su posición durante el proceso de armado de los arriostres | Armador | Grúa |
| | | Armado de atiezadores | Se colocan los atiezadores en las bases de las columnas de los marcos y se apuntalan en su lugar | Armador | Máquina de soldar (pequeña) |
| | | Armado de arriostres ³ | Se colocan los elementos de acuerdo con el esquema de ensamblaje de arriostres y se apuntalan en su lugar. | Armador | Grúa, máquina de soldar (pequeña), andamios |
| | | Resoldado de arriostres | Se aplican los cordones finales de soldadura en los arriostres | Soldador | Máquina de soldar (grande), andamios |
| | | Resoldado de atiezadores | Se aplican los cordones finales de soldadura | Soldador | Máquina de soldar (grande) |
| | | Colocado de tuercas en pernos de anclaje | Se colocan las tuercas en los pernos de las placas de unión | Ayudante (Metálico) | Equipo menor de armado |

| CUADRO 11. CONTINUACIÓN | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|--|---|---------------------|---|
| Entregable | Actividad | Tarea | Descripción de tarea | Mano de obra | Equipo |
| Estructura de soporte | Ensamblaje de arriostres | Preparación de superficies para pintura | Se realiza la remoción de la escoria en los cordones de soldadura y el lijado, limpieza y retoque de la pintura base en los marcos | Ayudante (Pintura) | Equipo menor de pintura, andamios |
| | | Aplicación de capa intermedia de pintura | Se realiza la aplicación de la capa intermedia de pintura de los arriostres | Pintor | Sistema Airless |
| Cilindro | Ensamblaje de cilindro | Alineación de la estructura interna | Se realiza la alineación de la estructura interna de las secciones del cilindro y se apuntala en su lugar | Armador | Máquina de soldar (pequeña), grúa, equipo de oxicorte, andamios |
| | | Resoldado de la estructura interna | Se aplican los cordones finales de soldadura en los en las uniones de la estructura interna | Soldador | Máquina de soldar (grande) |
| | | Armado de anillos centrales | Se realiza el armado de las 8 láminas que conforman los anillos centrales del cilindro y se apuntalan en su posición. Se utiliza el mecanismo de viraje del cilindro. | Armador | Máquina de soldar (pequeña), grúa, equipo de oxicorte, andamios |
| | | Resoldado de anillos centrales | Se aplican los cordones finales de soldadura internos y externos en los anillos centrales del cilindro | Soldador | Máquina de soldar (grande) |
| | | Instalación de baranda superior | Se realiza la instalación de las secciones de la baranda superior del cilindro | Soldador | Máquina de soldar (pequeña), máquina de soldar (grande) |
| | | Preparación de superficies para pintura | Se realiza la remoción de escoria en los cordones de soldadura, el lijado y limpieza del cilindro | Ayudante (Pintura) | Equipo menor de pintura, andamios |
| | | Rectificación de la pintura del cilindro | Se realiza la rectificación interna y externa de la capa final de pintura en todo el cilindro | Pintor | Sistema Airless |

| CUADRO 11. CONTINUACIÓN | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|---|--|---------------------|----------------------------|
| Entregable | Actividad | Tarea | Descripción de tarea | Mano de obra | Equipo |
| Cilindro | Acoplamiento de cilindro | Izaje del cilindro | Se realiza el levantamiento y apuntalamiento del cilindro. Antes de realizar el movimiento, se debe colocar el cilindro lo más cerca posible de la estructura de soporte de manera que no se exceda la capacidad de carga de la grúa | Armador | Grúa |
| | | Resoldado de cilindro con estructura de soporte | Se aplican los cordones finales de soldadura entre la Viga I y las almohadillas instaladas en el cilindro | Soldador | Máquina de soldar (grande) |
| | | Instalación de escalera externa | Se realiza la instalación de la escalera externa en la estructura de soporte y en el cilindro | Soldador | Máquina de soldar (grande) |

Fuente: elaboración propia con base en el programa de ensamblaje

1 Se repite para el armado de los 6 marcos. Esta tarea se realiza sobre la losa de cimentación, por lo que, para evitar problemas con las placas de los marcos tipo 2 y los pedestales de la losa, se requiere una configuración de piezas de madera que permitan elevar los marcos 45 cm aproximadamente

2 Los marcos se izan de manera que el primero sea el que se encuentra mas alejado de la grúa. Los marcos tipo 1 se colocan al principio y final de la estructura de soporte

3 El armado de los arriostres se realiza en el mismo orden de izaje de los marcos

Manual de Supervisión

En el Manual de Supervisión de Soldadura y Recubrimientos en Tanques Metálicos (que se muestra por completo en el *Apéndice 2*) en la Parte B se realiza una descripción general del proceso de soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW), los tipos de soldadura más comunes en tanques metálicos y se dan algunas recomendaciones para la supervisión de este proceso. Además, se elaboran fichas ilustradas que describen las características y causas de los principales tipos de discontinuidades en la soldadura como: grietas, falta de fusión, falta de penetración, inclusión de escoria, socavación, entre otras. Por último, se brindan los criterios de inspección que se muestran en el Cuadro 12 que junto con vistas de la estructura en construcción (Figura 32), permite registrar la ubicación de las discontinuidades para poder realizar el seguimiento.

En la Parte C se realiza una descripción general de los recubrimientos anticorrosivos para tanques metálicos, la preparación de la superficie, la aplicación del recubrimiento y se

dan algunas recomendaciones para la supervisión de este proceso. También, se elaboran fichas ilustradas que describen las características y causas de los principales tipos de discontinuidades en la soldadura como: grietas, falta de adhesión, ampollamiento, entre otras. Por último, se brindan los criterios de inspección que se muestran en el Cuadro 13 que junto con vistas de la estructura en construcción (Figura 33), permite registrar la ubicación de las discontinuidades para poder realizar el seguimiento.

CUADRO 12. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA LAS DISCONTINUIDADES EN SOLDADURA

| Discontinuidad | Aceptación | | Simbología |
|-------------------------------------|--|----------------------------|------------|
| Grietas | Inaceptable | | GR |
| Fusión incompleta | Inaceptable | | FI |
| Cráter en sección transversal | Inaceptable, excepto para entremos de soldaduras de filete | | CR |
| Soldaduras de filete de poco tamaño | Tamaño especificado (mm) | Disminución permitida (mm) | FP |
| | ≤ 5 | ≤ 2 | |
| | 6 | ≤ 2,5 | |
| | ≥ 8 | ≤ 3 | |
| Socavado | Espesor del metal (mm) | Socavado (mm) | SO |
| | < 25 | 1 | |
| | ≥ 25 | 2 | |
| Porosidad | No deberá tener porosidad visible | | PO |

Fuente: American Welding Society, 2010

CUADRO 13. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA LAS DISCONTINUIDADES EN PINTURA

| Discontinuidad | Aceptación | Simbología |
|-------------------|-------------|------------|
| Falta de adhesión | Inaceptable | FA |
| Ampollamiento | Inaceptable | AM |
| Grietas | Inaceptable | GR |
| Corrugado | Inaceptable | CO |
| Caléo | Inaceptable | CA |

Fuente: elaboración propia con base en Nervión Pinturas

CONTROL DE SOLDAURA

FECHA: 15/04/14

SIMBOLOGÍA

GR - GRIETAS

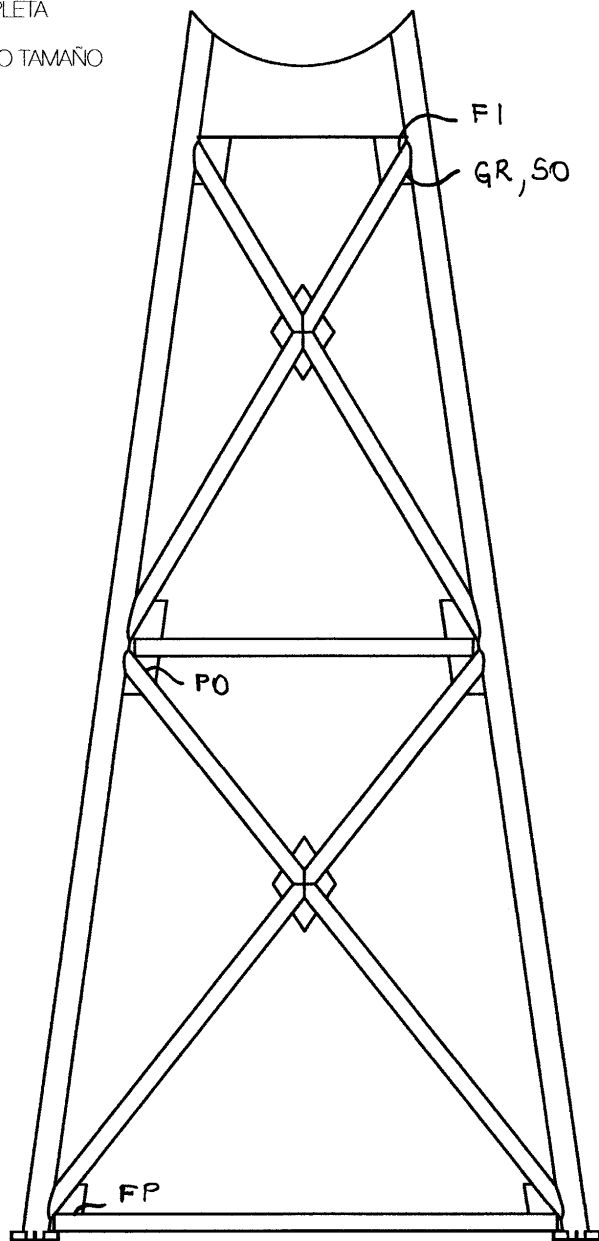
FI - FUSIÓN INCOMPLETA

CR - CRÁTER

FP - FILETE DE POCO TAMAÑO

SO - SOCAVADO

PO - POROSIDAD



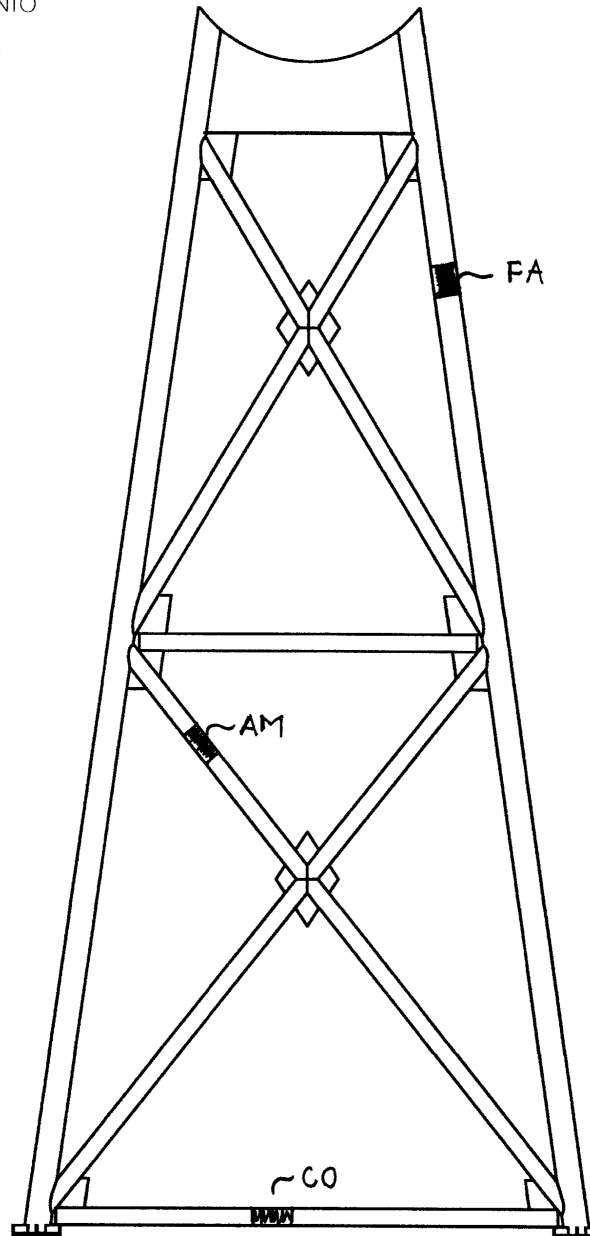
VISTA NORTE (MARCO 1)

Figura 34. Ejemplo de la aplicación de la herramienta de supervisión para soldadura
Fuente: elaboración propia

CONTROL DE PINTURA

FECHA: 25/04/14

SIMBOLOGÍA
FA - FALTA DE ADHESIÓN
AM - AMPOLLAMIENTO
GR - GRIETAS
CO - CORRUGADO
CA - CALÉO



VISTA NORTE (MARCO 1)

Figura 35. Ejemplo de la aplicación de la herramienta de supervisión en la aplicación de revestimientos
Fuente: elaboración propia



Figura 36. Ensamblaje de marcos
Fuente: elaboración propia



Figura 38. Izaje del cilindro
Fuente: elaboración propia



Figura 37. Ensamblaje de arriostres
Fuente: elaboración propia

Análisis estructural

Datos de entrada de los modelos

Los cuadros que se muestran a continuación son los datos de entrada de los modelos para determinar los elementos críticos más característicos de la estructura. El coeficiente teórico para el módulo de balasto horizontal (k_h), se determina con base en el valor de n_h obtenido de la literatura para arena seca o húmeda suelta de $6.000.000,00 \text{ kg/m}^3$ y la Ecuación 2, obteniendo un valor de la rigidez del resorte de $3.000.000,00 \text{ kg/m}$.

CUADRO 14. DETERMINACIÓN DE LA RIGIDEZ DE LOS RESORTES VERTICALES DE INTERACCIÓN TERRENO-ESTRUCTURA

| ID | Coefficiente de balasto teórico*(k_{30}) (kg/m^3) | Ancho tributario (B) (m) | Largo tributario (L) (m) | Conversión a coeficiente de referencia (K_{BL}) (kg/m^3) | Área tributaria (m^2) | Rigidez del resorte (kg/m) |
|----|--|--------------------------|--------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 21.414.040,47 | 0,15 | 0,50 | 49.252.293,09 | 0,08 | 3.693.921,98 |
| 2 | 21.414.040,47 | 0,50 | 0,68 | 17.607.099,94 | 0,34 | 5.942.396,23 |
| 3 | 21.414.040,47 | 0,50 | 1,05 | 15.907.572,92 | 0,53 | 8.351.475,78 |
| 4 | 21.414.040,47 | 0,15 | 1,00 | 46.040.187,02 | 0,15 | 6.906.028,05 |
| 5 | 21.414.040,47 | 0,68 | 1,00 | 12.729.457,39 | 0,68 | 8.592.383,74 |
| 6 | 21.414.040,47 | 1,00 | 1,05 | 9.483.360,78 | 1,05 | 9.957.528,82 |

Fuente: elaboración propia con base en la Ecuación 1
* El valor se obtiene para la grava arenosa compactada

| CUADRO 15. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR EQUIVALENTE DE LA LÁMINA DEL CILINDRO PARA LAS COMBINACIONES ESTUDIADAS | | | |
|---|----------|---------|----------------|
| Descripción | Cantidad | | Unidad |
| | III COMB | IV COMB | |
| Volumen del cilindro | 1,99 | 1,99 | m ³ |
| Volumen de agua | 238,10 | 263,16 | m ³ |
| Peso del cilindro | 15,62 | 15,62 | ton |
| Peso del agua | 238,10 | 263,16 | ton |
| Peso total | 253,72 | 278,78 | ton |
| Volumen equivalente | 32,32 | 35,51 | m ³ |
| Espesor equivalente | 0,10 | 0,11 | m |

Fuente: elaboración propia con base en cálculos realizados

En el *Cuadro 16* se muestran los resultados obtenidos para las direcciones de análisis propuestas. Es importante mencionar que para representar de una mejor manera los efectos producidos en la dirección Y, se divide el largo del cilindro en 2 tramos de 5,50 m y 3 tramos de 5,25 m.

| CUADRO 16. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE HOUSNER PARA CADA SENTIDO DE ANÁLISIS | | | |
|---|------------|-----------------|-----------------|
| Parámetro | Sentido X | Sentido Y | |
| | | Tramo de 5,50 m | Tramo de 5,25 m |
| H (m) | 3,30 | 3,30 | 3,30 |
| a (m) | 13,38 | 1,42 | 1,42 |
| W (kg _f) | 250.000,00 | 51.401,87 | 49.065,42 |
| g (m/s ²) | 9,81 | 9,81 | 9,81 |
| m (kg _f -s ² /m) | 25.492,91 | 5.241,53 | 5.003,28 |
| m ₀ (kg _f -s ² /m) | 4.170,57 | 4.205,11 | 4.013,97 |
| m ₁ (kg _f -s ² /m) | 21.322,33 | 1.036,42 | 989,31 |
| z ₀ (m) | 1,26 | 1,26 | 1,26 |
| z ₁ (m) | 1,81 | 2,80 | 2,80 |
| k ₁ (kg _f /m) | 988,13 | 1.002,00 | 956,45 |

Fuente: elaboración propia con base en las *Ecuaciones 3 – 7*.

| CUADRO 17. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE ESCALA PARA SISMO | | |
|---|-----------|----------------------|
| Descripción | Resultado | Sección del CSCR2010 |
| Zona sísmica | II | 2.1. |
| Sitio de cimentación | S3 | 2.2. |
| a _{ef} | 0,28 | Tabla 2.3. |
| Clasificación de la estructura | A | Tabla 4.1. |
| I | 1,50 | Tabla 4.1. |
| g (m/s ²) | 9,81 | – |
| SR | 2,00 | 5. |
| F | 2,06 | – |

Fuente: Código Sísmico de Costa Rica, 2010

Comprobación de los modelos

La determinación del cortante en la base mediante el método estático se muestra en el *Cuadro 18* y la comparación con el periodo y el cortante en la base determinado mediante el SAP2000 se encuentra en el *Cuadro 19*.

| CUADRO 18. DETERMINACIÓN DEL CORTANTE EN LA BASE MEDIANTE EL MÉTODO ESTÁTICO | | |
|---|--------------------|----------------------|
| Descripción | Resultado | Sección del CSCR2010 |
| Aceleración pico efectiva (a _{ef}) | 0,28 | Tabla 2.3. |
| Factor de importancia (I) | 1,50 | Tabla 4.1. |
| Sistema estructural | Muro | 4.2.3. |
| Regularidad | Irregular moderado | – |
| Ductilidad local | Óptima | – |
| Ductilidad global asignada (μ) | 1,50 | Tabla 4.3. |
| Periodo | 0,30 s* | – |
| FED | 1,77 | Figura 5.3 |
| Factor de sobre-resistencia (SR) | 2,00 | 5. |
| Coficiente sísmico | 0,37 | Ecuación 5-1 |
| Peso de la estructura | 329,10 ton | – |
| Cortante en la base | 122,18 ton | – |

Fuente: Código Sísmico de Costa Rica, 2010

* Se estima de manera que el FED quede en la parte plana

CUADRO 19. COMPARACIÓN DEL PERIODO Y CORTANTE EN LA BASE

| Descripción | Periodo (s) | Cortante en la base (ton) |
|-----------------|-------------|---------------------------|
| Método estático | 0,30 | 122,18 |
| SAP2000 | 0,33 | 118,13 |
| Diferencia (%) | 11% | 3% |

Fuente: elaboración propia con base en la información obtenida del Cuadro 15 y SAP2000

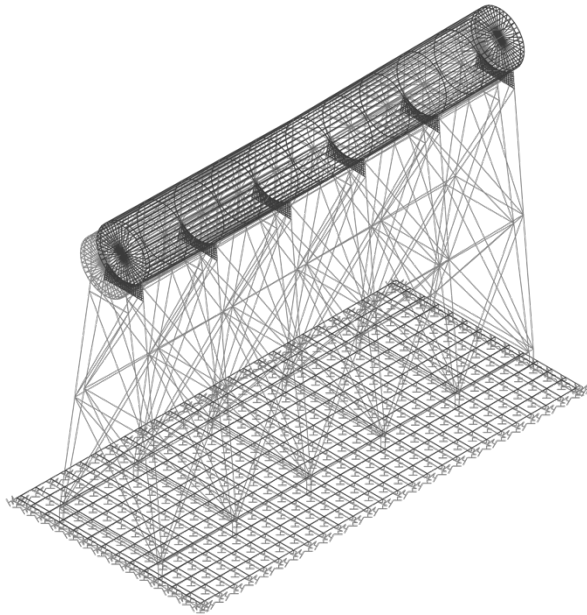


Figura 39. Deformada del primer modo de vibración
Fuente: SAP2000

CUADRO 20. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA NOMINAL AL LA TENSIÓN, COMPRESIÓN Y FLEXIÓN PARA UN TUBO CIRCULAR DE 12"

| Descripción | Cantidad | Unidad |
|----------------------------|-----------|--------------------|
| Diámetro nominal (D_n) | 30,48 | cm |
| Diámetro externo (D_e) | 32,39 | cm |
| Espesor de pared (t) | 0,95 | cm |
| A_g | 96,91 | cm ² |
| A_{ne} | 95,99 | cm ² |
| Z | 26,71 | cm ³ |
| Tensión | | |
| ϕ_{ty} | 0,90 | |
| ϕP_{ny} | 280819,56 | kg |
| ϕ_{tu} | 0,75 | |
| ϕP_{nu} | 294183,38 | kg |
| Rige | Fluencia | |
| Compresión* | | |
| K | 1,00 | |
| L | 350,00 | cm |
| KL/r | 200,00 | Cumple |
| F_e | 19719,38 | kg/cm ² |
| F_{cr} | 3002,70 | kg/cm ² |
| ϕ_c | 0,90 | |
| ϕP_n | 262297,23 | kg |
| Flexión | | |
| ϕ_b | 0,90 | |
| ϕM_n | 772,40 | kg - m |

Fuente: elaboración propia con base las ecuaciones en el apartado "Determinación de los elementos críticos"

*La longitud se varía en cada revisión

Determinación de los elementos críticos

Para determinar los elementos críticos, se obtienen las tablas de SAP2000 que muestran la carga última y el momento último en ambas dimensiones en cinco puntos para cada elemento de la estructura de soporte y la estructura interna del cilindro. En el Cuadro 20 se muestra un ejemplo de la determinación de las resistencias nominales que se hizo para cada tubo. En el Cuadro 21 y Cuadro 22 se muestra un resumen de los elementos críticos encontrados, donde se indican los valores de interacción obtenidos con las Ecuaciones 13 y 14.

CUADRO 21. RESUMEN DEL ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE

| Elemento | Combinación | Carga axial última (P _u) (kg) | Momento último en X (M _{ux}) (kg-m) | Momento último en Y (M _{uy}) (kg-m) | Interacción | |
|----------------------------|-------------|--|--|--|-------------|------|
| Columnas | 78 | III Combinación X | -62.006,53 | -1.331,25 | -459,90 | 0,30 |
| | 224 | III Combinación Y | -77.082,16 | -880,11 | -785,61 | 0,35 |
| | 78 | IV Combinación X | -64.837,99 | -1.429,96 | -450,05 | 0,31 |
| | 224 | IV Combinación Y | -80.783,33 | -936,46 | -791,04 | 0,37 |
| Vigas y Arriostres (marco) | 205 | III Combinación X | -9.732,51 | -76,11 | -159,43 | 0,07 |
| | 260 | III Combinación Y | -16.953,10 | -18,59 | -79,61 | 0,09 |
| | 205 | IV Combinación X | -10.111,03 | -77,21 | -157,36 | 0,07 |
| | 304 | IV Combinación Y | -17.460,10 | -35,60 | -79,49 | 0,09 |
| Arriostres | 380 | III Combinación X | -21.208,56 | -52,34 | -180,42 | 0,11 |
| | 380 | III Combinación Y | -19.581,86 | -109,72 | -207,32 | 0,12 |
| | 344 | IV Combinación X | -22.393,53 | -50,77 | -180,75 | 0,12 |
| | 344 | IV Combinación Y | -20.661,06 | -108,69 | -210,33 | 0,12 |

Fuente: elaboración propia con base en la información obtenida de SAP2000

CUADRO 22. RESUMEN DEL ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA INTERNA DEL CILINDRO

| Elemento | Combinación | Carga axial última (P _u) (kg) | Momento último en X (M _{ux}) (kg-m) | Momento último en Y (M _{uy}) (kg-m) | Interacción |
|-----------|-------------------|--|--|--|-------------|
| 537 – 548 | III Combinación X | -618,55 | -205,23 | -259,66 | 0,61 |
| 537 – 548 | IV Combinación X | -614,20 | -202,58 | -254,92 | 0,60 |
| 63 – 72 | III Combinación Y | -1.842,43 | -4,77 | -46,40 | 0,26 |
| 63 – 72 | IV Combinación Y | -1.847,19 | -4,68 | -45,36 | 0,26 |

Fuente: elaboración propia con base en la información obtenida de SAP2000

En el *Cuadro 23* se presenta la revisión de los esfuerzos de las paredes del cilindro en ambas direcciones de análisis. En la *Figura 40* y *Figura 41* se muestran los esfuerzos obtenidos. De acuerdo con el modelo, en la dirección X se tienen desplazamientos máximos de hasta 18,00 cm aproximadamente.

CUADRO 23. REVISIÓN DE LAS PAREDES DEL CILINDRO EN LAS DIRECCIONES DE ANÁLISIS

| Descripción | Cantidad | Unidad |
|---------------------|-----------|--------------------|
| Esfuerzo permisible | 1642,55 | kg/cm ² |
| Dirección X | | |
| III COMB X | 2878,53 | kg/cm ² |
| IV COMB X | 2867,21 | kg/cm ² |
| Verificación | No cumple | |
| Dirección Y | | |
| III COMB Y | 250,32 | kg/cm ² |
| IV COMB Y | 245,92 | kg/cm ² |
| Verificación | Cumple | |

Fuente: elaboración propia con base en la información obtenida de SAP2000 y la norma API STANDARD 650

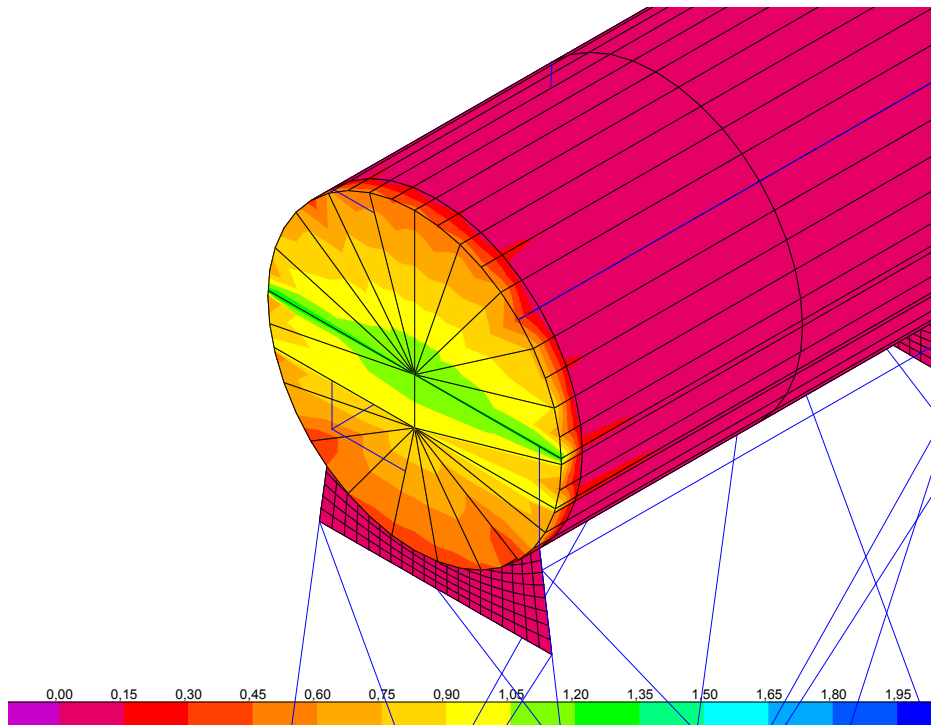


Figura 40. Esfuerzos obtenidos en la paredes del cilindro en dirección X (III COMB X – ton, cm)
Fuente: SAP2000

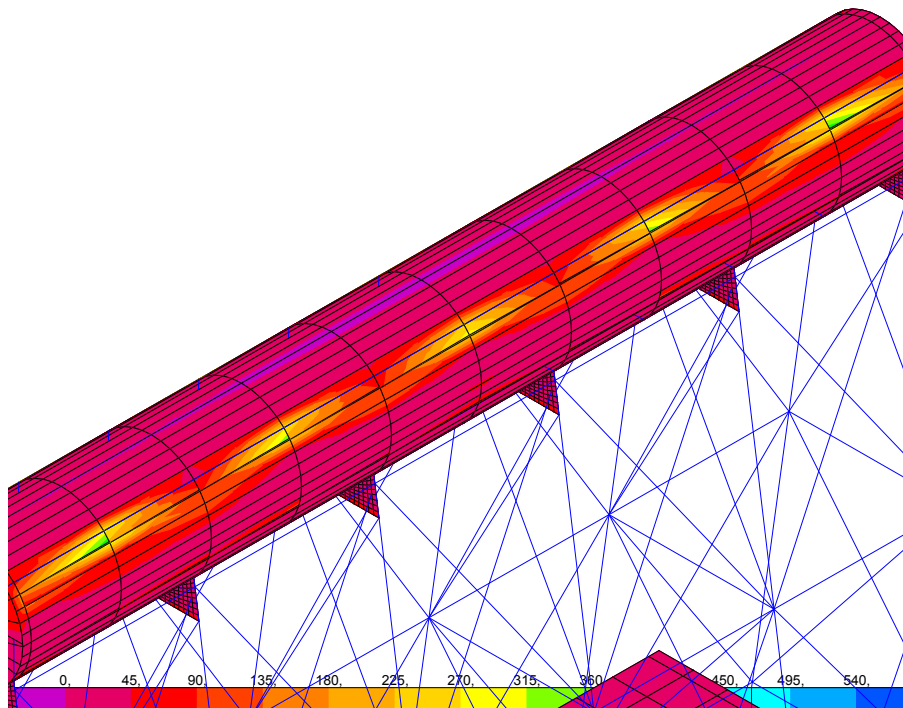


Figura 41. Esfuerzos obtenidos en la paredes del cilindro en dirección Y (III COMB Y – kg, cm)
Fuente: SAP2000

En los cuadros y la figura que se presentan a continuación, se muestra la revisión de las placas de base, la losa de cimentación y los pedestales de concreto.

| CUADRO 24. REVISIÓN DE APLASTAMIENTO EN CONCRETO DE LA PLACA DE BASE | | |
|---|------------|--------------------|
| Descripción | Cantidad | Unidad |
| Ancho (B) | 60,00 | cm |
| Largo (L) | 60,00 | cm |
| Área de placa (A) | 3.600,00 | cm ² |
| Resistencia del concreto (F' _c) | 210,00 | kg/cm ² |
| Esfuerzo de aplastamiento | 178,50 | kg/cm ² |
| Carga última (P _u) | 27.677,27 | kg |
| Factor de reducción de la resistencia (φ) | 0,60 | |
| Resistencia nominal (φR _n) | 386.164,00 | kg |
| Verificación | Cumple | |

Fuente: elaboración propia con base las ecuaciones en el apartado "Determinación de los elementos críticos"

| CUADRO 25. REVISIÓN DEL ESPESOR DE PLACA DE BASE | | |
|---|------------|--------------------|
| Descripción | Cantidad | Unidad |
| Tamaño del ala (m) | 13,85 | cm |
| Espesor de placa | 2,54 | cm |
| Ancho (B) | 60,00 | cm |
| Largo (L) | 60,00 | cm |
| Área de placa (A) | 3.600,00 | cm |
| Esfuerzo de fluencia (F _y) | 2.813,78 | kg/cm ² |
| Factor de reducción de la resistencia (φ) | 0,90 | |
| Carga última (P _u) | 27.677,27 | kg |
| Carga máxima (P _{max}) | 172.854,74 | kg |
| Verificación | Cumple | |

Fuente: elaboración propia con base las ecuaciones en el apartado "Determinación de los elementos críticos"

| CUADRO 26. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA NOMINAL A LA FLEXIÓN DE LA LOSA DE CONCRETO | | |
|---|--------------|--------------------|
| Descripción | Cantidad | Unidad |
| Número de varilla | 8 | |
| Espaciamiento de varilla | 20,00 | cm |
| Área de acero (A _s) | 25,34 | cm ² |
| Distancia a la fibra en compresión (d) | 94,00 | cm |
| Esfuerzo de fluencia (F _y) | 2.800,00 | kg/cm ² |
| Esfuerzo de compresión (F' _c) | 210,00 | kg/cm ² |
| Ancho de franja (b) | 100,00 | cm |
| β | 0,85 | |
| a | 3,97 | cm |
| c | 4,68 | cm |
| c/d | 0,05 < 0,375 | |
| φ | 0,90 | |
| Momento nominal (φM _n) | 58.745,77 | kg-m/m |

Fuente: elaboración propia con base las ecuaciones en el apartado "Determinación de los elementos críticos"

| CUADRO 27. VERIFICACIÓN DE LA LOSA DE CONCRETO | | |
|---|---|--------------|
| Combinación | Momento último (M _u) (kg-m/m) | Verificación |
| Dirección X | | |
| III COMB X | 11.670,81 | Cumple |
| III COMB Y | 13.063,80 | Cumple |
| IV COMB X | 11.921,95 | Cumple |
| IV COMB Y | 14.653,29 | Cumple |
| Dirección Y | | |
| III COMB X | 10.982,57 | Cumple |
| III COMB Y | 17.770,84 | Cumple |
| IV COMB X | 11.708,03 | Cumple |
| IV COMB Y | 18.793,39 | Cumple |

Fuente: elaboración propia con base las ecuaciones en el apartado "Determinación de los elementos críticos"

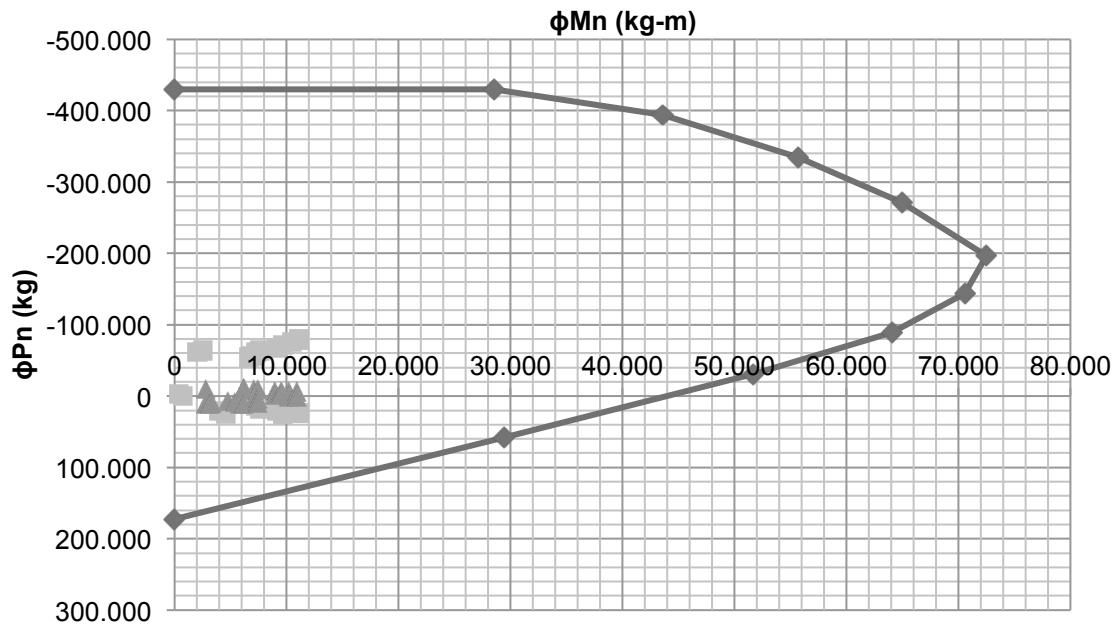


Figura 42. Revisión de los pedestales de concreto
Fuente: elaboración propia con base en los datos obtenidos de SAP2000 y el Cuadro 5

En la *Figura 43* se muestran los elementos críticos característicos de la estructura resultado del análisis realizado y en la *Figura 44* se agregan los elementos, resultado del análisis de redundancia.

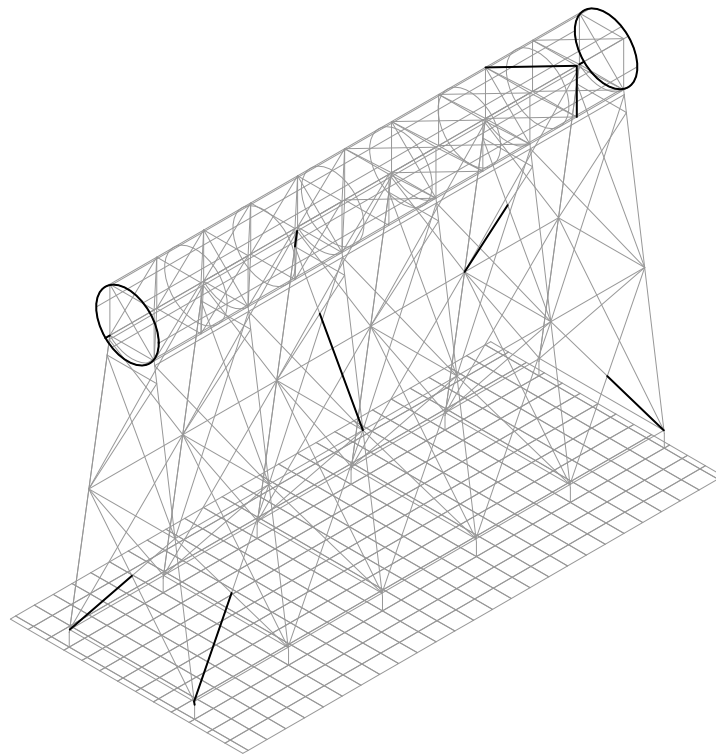


Figura 43. Elementos críticos característicos resultado del análisis realizado
Fuente: elaboración propia con base en modelo SAP2000

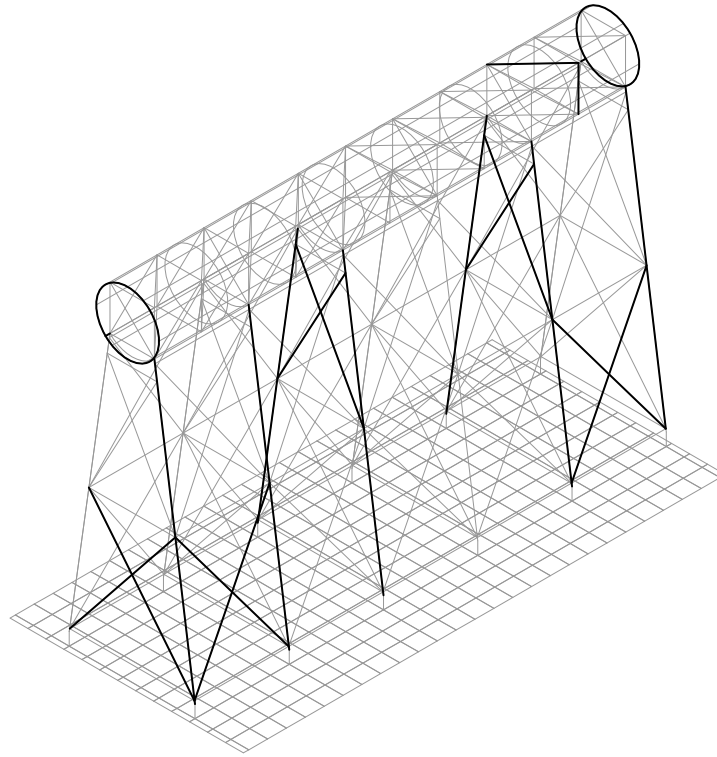


Figura 44. Elementos críticos característicos de la estructura
Fuente: elaboración propia con base en modelo SAP2000

Protocolo de inspección

En el Protocolo de Inspección (que se muestra por completo en el *Apéndice 3*) se realiza una descripción general de la estructura, especificando los principales materiales de la misma, el tipo de soldadura y sistema pintura utilizado en esta. De la misma manera se establecen tres tipos de inspección:

- Inspección inicial: evaluación realizada a toda la estructura para determinar la condición estructural, sanitaria, de seguridad y del recubrimiento del tanque al inicio de su vida útil.
- Inspección de actualización: se realiza para monitorear cambios en la condición del recubrimiento y la tasa de corrosión y verificar que las condiciones del tanque no hayan cambiado significativamente desde la evaluación previa o la rehabilitación. Se debe realizar cada 3 o 5 años después de la inspección inicial.

- Inspección periódica: es una evaluación superficial del tanque que se realiza para identificar todas aquellas situaciones que pueden ser fácilmente remediadas y para indicar aquellas que necesitan de una evaluación profesional. Debe realizarse mínimo una vez al año.

En cuanto a la inspección periódica, se establecen los aspectos mínimos que deben someterse a inspección, indicando las posibles acciones correctivas que podrían realizarse. Los aspectos a inspeccionar son las condiciones del acceso al sitio, mantenimiento del sitio, cimentación, pedestales, placas base, acceso al cilindro, tuberías, escaleras y recubrimiento interno y externo del tanque. También, se hace referencia a la inspección que debe realizarse inmediatamente después de un evento sísmico, haciendo énfasis en los elementos que se muestran en la *Figura 44*.

Por último se realiza un machote de referencia para documentar la inspección periódica por parte del operador, donde se enumeran los principales problemas que se pueden presentar.

Análisis de los resultados

Prefabricación y transporte

Nivel de preensamblaje

Para la determinación del nivel de preensamblaje con el que se transportarían los marcos de la estructura de soporte, se examinaron 4 escenarios posibles de acuerdo con lo mostrado en la *Figura 8*:

- a) fabricar el marco completo,
- b) realizar un corte a la mitad del marco (sección A-A),
- c) realizar un corte a una altura de 6,05 m de la base del marco que corresponde a la primera unión soldada de las columnas (sección B-B) o
- d) fabricarlo en elementos independientes con las placas soldadas.

Con base en los resultados obtenidos del análisis de las limitaciones (mostradas en el *Cuadro 6*) y las dimensiones máximas permitidas para el transporte de carga, se establece que el escenario más conveniente es el "d" (*Figura 16*), debido a que no se tendrían limitaciones espaciales para la producción en serie de los elementos; las dimensiones de los mismos son manejables con el equipo disponible en la planta (montacargas) y se ajustan a las limitaciones espaciales de almacenamiento en el sitio, además de minimizar la necesidad de viajes con permiso especial que incrementan el costo de la operación. Igualmente, se determina que los arriostres de la estructura se fabricarían de la misma manera (*Figura 17*). La razón por la que se establece que los elementos deben fabricarse con las placas soldadas es que facilita el trazo y alineamiento de la estructura en el sitio de ensamblaje.

En cuanto al cilindro, se analizaron 2 escenarios posibles:

- a) transportarlo en una sola pieza o
- b) transportarlo en 2 mitades.

Aunque en ambos escenarios se puede considerar la carga como indivisible, de acuerdo con las observaciones realizadas por el transportista, la dificultad técnica que implica la carga y traslado del cilindro en una sola pieza es muy alta, debido a las limitaciones espaciales y de equipo analizadas y la ruta por la que se tiene que transitar, por lo que se determina que el escenario más conveniente es el "b". Sin embargo, se establece que el cilindro sería construido en una sola pieza y posteriormente dividido (como se muestra en la *Figura 32*) para facilitar el proceso de fabricación y minimizar posibles variaciones dimensionales que se pueden dar al momento de ensamblar ambas secciones en el sitio.



Figura 45. División del cilindro
Fuente: elaboración propia

Cuadros y esquemas

Conociendo la forma en que los elementos iban a ser fabricados y transportados, en el Cuadro 8 se determina la cantidad de viajes requeridos, especificando la carga provista, el peso total y los equipos de carga y transportes necesarios en cada caso. Es importante acotar que la carga establecida para los viajes 1 y 3 estuvo sujeta a la producción de estos elementos en planta, por lo que se cargaron los elementos que estuvieron conforme estuvieran listos, sin importar si pertenecían o no a la carga prevista. En el *Apéndice 4* se muestran los cuadros de carga finales para dichos viajes. También, en el momento de la carga tanto en los viajes antes mencionados como en el viaje 6, solo se consideran únicamente los elementos que conforman parte de la estructura, ya que se cargaron otros ítems que no habían sido previstos. Sin embargo, en ninguno de los casos se excedió con el peso máximo permitido establecido por la regulación.

Los esquemas de carga que se ilustran en las *Figuras 18 y Figura 19*, representaron una herramienta fundamental para la carga de los viajes 2, 4 y 5, debido a que al ser una representación gráfica de la forma como los elementos deben ser cargados, favorecen el análisis, visualización y comprensión del

procedimiento a seguir por parte de los encargados (operarios y transportistas) y permite determinar los preparativos necesarios para no entorpecer el proceso.

En cuanto al diseño de sitio propuesto en la *Figura 20*, se considera pedir autorización al director de la escuela para utilizar parte de la plaza de deportes como acceso provisional para la grúa, razón por la cual se colocan los apilamientos como se muestra, de manera que se ubiquen lo más cercano posible y se minimice la distancia de desplazamiento de los elementos, desde la zona de almacenamiento hasta la zona de ensamblaje. Sin embargo, como la escuela permitió el uso parte de la plaza como zona de ensamblaje y almacenamiento, se decide retirar el cerramiento provisional aproximadamente 10,00 m (como se muestra en la *Figura 29*), por lo que no fue necesario obstruir el camino. La configuración final de sitio utilizada se muestra en la *Figura 46*.

Los diagramas de alcance y carga de las grúas, como el que se muestra en la *Figura 22*, representan una herramienta muy útil tanto para estimar la ubicación óptima de la grúa como para analizar y visualizar el procedimiento a seguir para el movimiento de las cargas, ya que permiten determinar, con base en el peso de los elementos, la distancia máxima a la que se pueden ser desplazados.



Figura 46. Panorámica de la configuración final del sitio de ensamblaje
Fuente: elaboración propia

Ensamblaje

Programación

Al comparar el diagrama de Gantt realizado, que se muestra en la *Figura 31*, con la información obtenida durante el ensamblaje de la estructura de soporte, se encuentra que tanto las actividades definidas como la secuencia propuesta son los adecuados para la ejecución del proceso constructivo del proyecto. Sin embargo, en cuanto a las duraciones estimadas, se encuentra que no concuerdan con las duraciones reales de la mayoría de las actividades, debido a diversos factores que entorpecieron o retrasaron la ejecución de las mismas. A continuación, se hace mención de algunos de estos factores:

- La carencia de la conexión eléctrica al inicio del proceso de ensamblaje. Cuando se logra establecer la conexión, se encuentra con una restricción para conectar la cantidad de equipos prevista.
- La cantidad de operarios asignados en algunas actividades era insuficiente para lograr realizar una actividad en el tiempo propuesto.
- Incumplimiento del horario de trabajo por parte del contratista de la mano de obra.
- Falla mecánica de la grúa de 80 toneladas.
- Las condiciones climáticas adversas para la aplicación de los recubrimientos.
- Diversos daños en el equipo para la aplicación de los recubrimientos (Airless).

Por estas razones se considera pertinente realizar una visita al sitio antes de iniciar con las actividades de manera que se verifique si se cuenta con las condiciones iniciales esperadas, efectuar revisiones periódicas de los equipos y contar con un ingeniero residente que sea capaz de llevar el control del avance de la obra, asegurando que se cumplan las condiciones de seguridad, calidad, ejecución y rendimiento de la mano de obra.

En cuanto a la comparación de costos de los equipos para el movimiento de cargas que se muestra en el *Cuadro 9*, se establece que el más conveniente es el Esquema 2 ya que, aunque se requiere de una mayor cantidad de equipos, tiene un menor costo. El motivo por el que se reduce el

costo con dicho esquema, es que la utilización la retroexcavadora para las actividades de descarga de los elementos y ensamblaje de los marcos reduce el tiempo muerto que tiene la grúa de 80 toneladas en el Esquema 1 durante el resoldado de los marcos. Es importante aclarar que aunque las retroexcavadoras no son consideradas como equipos para el movimiento de cargas, en este caso se utiliza debido a que se encuentra cerca del sitio de construcción y no se cobra un uso mínimo. Sin embargo, se consultó la capacidad de carga de dicha grúa y se comprueba que es suficiente para realizar las actividades.

Los factores críticos analizados para la elección de la empresa proveedora del andamiaje son la disponibilidad y el costo. Al observar el *Cuadro 10*, se encuentra que en el momento cuando se realizó la cotización ambas empresas tenían disponibilidad, por lo que la elección se realizó con base en el costo, siendo las más conveniente REECO.

El esquema de andamiaje propuesto que se ilustra en la *Figura 32* se realiza de acuerdo con las configuraciones utilizadas en la construcción de otros tanques en la empresa. Los andamios que se encuentran a lo externo de los andamios se mueven de acuerdo con el avance en el ensamblaje de los arriostres de la estructura con ayuda de la grúa. Es importante mencionar que la conexión entre los andamios internos con los andamios externos se realiza por medio de tablonces de madera y para garantizar la seguridad de los operarios se utilizan arneses de seguridad y línea de vida.

Manuales

El Manual de Ensamblaje representó una herramienta útil para el análisis y comprensión de los procesos, recurso humano, equipo y aspectos de seguridad involucrados en las distintas actividades definidas en el programa de ensamblaje. Al realizar una descripción de las tareas, se es más consciente del alcance de las mismas, permitiendo que se puedan tomar en cuenta los aspectos que se deben cubrir para la ejecución de las mismas. Es importante acotar que la descripción mencionada representa la manera que se considera más conveniente para ejecutar las tareas propuestas, sin embargo estas deben adaptarse a las condiciones que se tengan el sitio. Por esta razón, se considera importante, como se menciona en párrafos anteriores, contar

con la presencia de un ingeniero residente que sea capaz de llevar el control del avance de la obra y sea capaz de adaptarla de acuerdo con las necesidades de esta.

En cuanto al Manual de Supervisión para Soldaduras y Recubrimientos en Tanques Metálicos, aunque no fue utilizado durante la ejecución del ensamblaje, se considera que es útil para que la persona encargada de la supervisión de la obra aprenda a reconocer las principales discontinuidades que se pueden encontrar tanto en la soldadura como en los recubrimientos de una estructura metálica, ya que estos no solo aplican para tanques de almacenamiento. Además, las herramientas de supervisión realizadas representan una forma simple y sencilla de documentar el control de calidad de la ejecución de la estructura de manera que se pueda verificar que los errores encontrados hallan sido reparados

Análisis estructural

Datos de entrada de los modelos

Para contabilizar los efectos de la interacción terreno – estructura, en este caso una sustitución por lastre compactado con la losa de concreto, se obtuvieron los valores de la rigidez de los resortes verticales para las diferentes secciones de la losa que se observan en el *Cuadro 11* y se determinó que la rigidez de los resortes horizontales sería de 3.000.000,00 kg/m. Es importante recalcar que debido a que no se obtuvo acceso al estudio de suelos realizado para el proyecto, los valores de tanto del coeficiente de balasto como del valor n_h son teóricos, obtenidos de la literatura para condiciones similares. Sin embargo, al comparar el momento último obtenido para la losa con el que se menciona en la memoria de cálculo realizada por el Ing. Orlando Gei, se encuentra que son similares y que por lo tanto, los valores teóricos mencionados son adecuados para representar las condiciones que se tienen en el sitio.

En el *Cuadro 12* se muestran los espesores equivalentes de la lámina del cilindro utilizados para considerar el peso del agua en el modelo donde se estudia el comportamiento de la estructura de soporte, obteniendo 0,10 m para la III COMB y 0,11 m para la IV COMB. Es

importante anotar que se realiza el cálculo del espesor considerando las combinaciones de carga utilizadas, debido a que el peso de agua debe considerarse como una carga temporal con alta probabilidad de ocupación plena a la hora de un sismo. Por tanto, se evitó que este fuese multiplicado por los coeficientes de amplificación de las cargas permanentes.

En el *Cuadro 13* se encuentran los datos calculados para analizar la interacción líquido – estructura mediante el modelo de Housner. Al observar que la masa dinámica correspondiente al líquido en movimiento (m_1) representa un 83,8% de la masa total en el sentido X y un 19,8% en el sentido Y, se estima que los efectos provocados por el oleaje (sloshing) del agua debido a la excitación sísmica, serán más significativos en la tapas circulares del cilindro.

En el *Cuadro 14* se muestra la determinación del factor de escala para sismo, obteniendo un valor de 2,06; este se introduce en ambos modelos junto con el espectro de diseño respectivo (*Figura 12*).

Comprobación de los modelos

En el *Cuadro 18* se determina mediante el método estático que el cortante en la base es de 122,18 ton. El periodo utilizado se estima de manera que a la hora de calcular el Factor Espectral Dinámico (FED) este se encontrara en la parte plana del gráfico utilizado. Es importante anotar que para la determinación del espectro de diseño (como se muestra en el *Cuadro 4*), se estima que la estructura tiene una irregularidad moderada debido a que la masa se encuentra concentrada en la parte superior de la misma y que su ductilidad local es óptima, ya que es una construcción nueva.

Al comparar el cortante en la base obtenido mediante el método estático con el calculado por el programa, se encuentra que a diferencia es de un 3% (*Cuadro 19*), por lo que se concluye que los datos obtenidos del modelo son confiables. La diferencia entre ambos valores está relacionada con la forma como se determina el peso de la estructura.

En cuanto al periodo, se encuentra que la diferencia es de un 11%. Sin embargo, al revisar el valor del FED que se obtendría con el periodo determinado con el programa, se encuentra que de la misma manera se ubica en la parte plana de la gráfica, por lo que el periodo estimado

representa las condiciones reales de la estructura.

En cuanto al Modelo 2, debido a la forma como fueron introducidas las masas obtenidas con el modelo de Housner (mediante elementos tipo "Link" y diafragmas), se observa que el programa no toma en consideración el peso del agua, por lo que el cortante en la base obtenido solo incluye el peso propio de la estructura. Sin embargo, como el objetivo del modelo es estudiar los efectos de la presión hidrodinámica sobre las paredes del cilindro, se considera que los valores obtenidos con el mismo son confiables.

Es importante mencionar que las cargas últimas que se obtuvieron para la revisión de los elementos de la estructura de soporte, estructura interna, pedestales y losa de cimentación se compararon con los valores mostrados en la memoria de cálculo proporcionada por el AyA, obteniendo resultados similares. En cuanto a las paredes del cilindro, en la memoria de cálculo no se encuentra ninguna verificación.

Determinación de los elementos críticos

En los *Cuadros 21 y 22*, se muestran los resúmenes del análisis realizado a la estructura de soporte y a la estructura interna del cilindro. En ellos se indican los elementos que presentan el mayor esfuerzo de acuerdo con la ecuación de interacción para las combinaciones de carga estudiadas. Al observar que los resultados obtenidos oscilan entre 0,07 y 0,37 para la estructura de soporte y entre 0,26 y 0,62, se considera que el diseño de la estructura metálica del tanque de almacenamiento, tal y como se presenta en los planos es muy conservador. Al revisar la memoria de cálculo se encuentra que el diseño se realizó con la metodología de diseño por esfuerzos de trabajo (ASD), además que se utiliza un esfuerzo de fluencia del acero menor (2600 kg/cm^2) al del acero especificado en los planos (3700 kg/cm^2). Sin embargo, como el objetivo del análisis es determinar los elementos que presentan los mayores esfuerzos, se establece que dichos elementos forman parte de los puntos críticos de la estructura.

En cuanto a la verificación del esfuerzo en las paredes del cilindro (que se muestra en el *Cuadro 23*), se demuestra analíticamente que los efectos producidos por el oleaje del agua son

más significativos en las tapas del cilindro, ya que los esfuerzos provocados en la dirección X son mayores a los encontrados en la dirección Y (como se observa en la *Figura 40 y Figura 41*) y exceden el esfuerzo permisible especificado. Esta diferencia en el esfuerzo se debe a que la longitud del cilindro provoca un aumento en la masa convectiva, cuyo movimiento es impedido únicamente por dichas tapas que, al ser planas, tienen a deformarse para encontrar el equilibrio. Por estas razones, estos elementos forman parte de los puntos críticos de la estructura. No obstante, es importante acotar que bajo las condiciones de operación regulares de la estructura, los esfuerzos aplicados no exceden el esfuerzo permisible, por lo que la condición antes mencionada se produciría en un evento sísmico de gran magnitud. Sin embargo, se considera pertinente colocar tapas intermedias a lo interno del cilindro, enlazadas como vasos comunicantes, de manera que se minimicen los efectos producidos por el movimiento oscilatorio del agua.

Al observar la revisión de las placas de base y los pedestales de concreto, se encuentra que cumplen con las condiciones especificadas. Sin embargo, en cuanto a losa de cimentación, es importante indicar que, aunque el momento nominal excede aproximadamente 4 veces el momento último, la razón que justifica las dimensiones de losa es garantizar la seguridad al vuelco de la estructura, al aumentar los momentos estabilizadores de la misma debido al aumento en el peso.

En la *Figura 43* se muestra la ubicación de los elementos críticos más característicos de la estructura que se mencionan en párrafos anteriores y en la *Figura 44* se agregan los elementos considerados en el análisis de la redundancia. Es importante acotar que al ser una estructura hiperestática (o estáticamente indeterminada), la suspensión de un elemento no necesariamente conduce al colapso por lo que para determinar los elementos críticos con el criterio de la redundancia, se señalan los elementos que están cercanos a los identificados en el criterio de esfuerzo, con el objetivo de que estos sean revisados en las inspecciones.

Protocolo de inspección

El protocolo de inspección que se muestra en el representa una herramienta que permite identificar los aspectos de la estructura que requiere mantenimiento, como primer paso para la realización del mantenimiento preventivo. La importancia de la inspección periódica radica en el hecho de que permite identificar los problemas y desarrollar soluciones, antes de que ocurra una crisis. Además, el mantenimiento preventivo siempre es más barato que el mantenimiento correctivo.

Conclusiones

- Se determinó que el cilindro del tanque de almacenamiento sería prefabricado en una sola pieza y posteriormente, dividido en dos partes para efectos de transporte. En cuanto a la estructura de soporte se estableció que se prefabricaría y transportaría en elementos independientes con las placas soldadas, de acuerdo con las figuras presentadas.
- Se determinó que serían necesarios 5 viajes para transportar la totalidad de los elementos de la estructura metálica hasta el sitio de ensamblaje, de los cuales 3 requieren de un permiso especial por sobredimensión. Los equipos necesarios para la carga en la planta son el montacargas de la empresa y grúas de 15 y 35 toneladas de capacidad.
- El diseño de sitio realizado permitió prever la necesidad de espacio del sitio de ensamblaje. La secuencia propuesta de las actividades definidas en el programa de ensamblaje es la adecuada para la ejecución del proceso constructivo de la estructura. Sin embargo, se encuentra que las duraciones estimadas no concuerdan con la duraciones reales debido a problemas con el manejo del personal, condiciones climáticas adversas y fallos en los equipos.
- El Manual de Ensamblaje constituyó una herramienta indispensable para el análisis y la comprensión de los procesos, recurso humano y equipo para la ejecución del proceso constructivo de la estructura.
- Al desarrollar el Manual de Supervisión, se enfatiza la importancia que tiene en un proceso constructivo contar con una persona que tenga el conocimiento técnico necesario para garantizar que los trabajos realizados cumplan con los requisitos de calidad establecidos.
- Con el análisis sísmico dinámico realizado se encontró que el diseño de la estructura de soporte y estructura interna del cilindro, tal y como se presenta en los planos es muy conservador, debido a que los esfuerzos encontrados mediante las ecuaciones de interacción son bajos. Sin embargo, para efectos de inspección, se consideró importante seleccionar como puntos críticos más característicos aquellos que presenten los valores más elevados. En cuanto a las paredes del cilindro, se evidenció que las tapas del cilindro forman parte de los puntos críticos, ya que los esfuerzos encontrados son elevados y exceden el esfuerzo permisible debido a los efectos producidos por el oleaje del agua.
- Con el protocolo de ensamblaje se enfatiza la importancia de identificar los elementos de la estructura que requieren algún tipo de intervención por medio de la inspección periódica de esta.

Recomendaciones

- Debido a que el diseño del tanque de almacenamiento utilizado en este proyecto fue realizado hace muchos años, se recomienda ejecutar una revisión de estos de manera que sean actualizados con la intención de disminuir los costos, ya que con el análisis realizado con la metodología de diseño y las normas actuales se demuestra que tal y como se muestra en los planos es muy conservador.
- Se recomienda considerar el diseño y construcción de este tipo de dispositivo con forma cilíndrica para el almacenamiento de grandes volúmenes de agua, ya que como se demuestra con el análisis realizado estos no tienen un buen comportamiento ante un evento sísmico en ocupación plena.
- Se recomienda colocar divisiones internas (como recipientes comunicados en su parte inferior mediante vasos comunicantes) a lo largo del cilindro, de manera que al estar sometido a la excitación sísmica en su sentido longitudinal pueda transmitir las cargas hasta la estructura de soporte, evitando la concentración de esfuerzos en las tapas de este.
- A pesar de que el manual de supervisión se establece como una introducción general para la supervisión en campo de los procesos que en él se desarrollan, se recomienda que la persona o personas determinadas como supervisores tengan algún nivel de conocimiento acerca de estos, de manera que tengan criterio para determinar que la forma en que están siendo ejecutados es la correcta.

Apéndices

Apéndice 1

Manual de Ensamblaje

Apéndice 2

Manual de Supervisión de Soldadura y Recubrimientos en Tanques Metálicos

Apéndice 3

Plan de inspección y mantenimiento

Apéndice 4

Cuadros de carga para los viajes 1 y 3

MANUAL DE **ENSAMBLAJE**

TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE 250 M³

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--------------------------|----|
| DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS | 1 |
| PROCESO DE ENSAMBLAJE | 7 |
| EQUIPO | 16 |
| ASPECTOS DE SEGURIDAD | 19 |
| BIBLIOGRAFÍA | 24 |

DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS

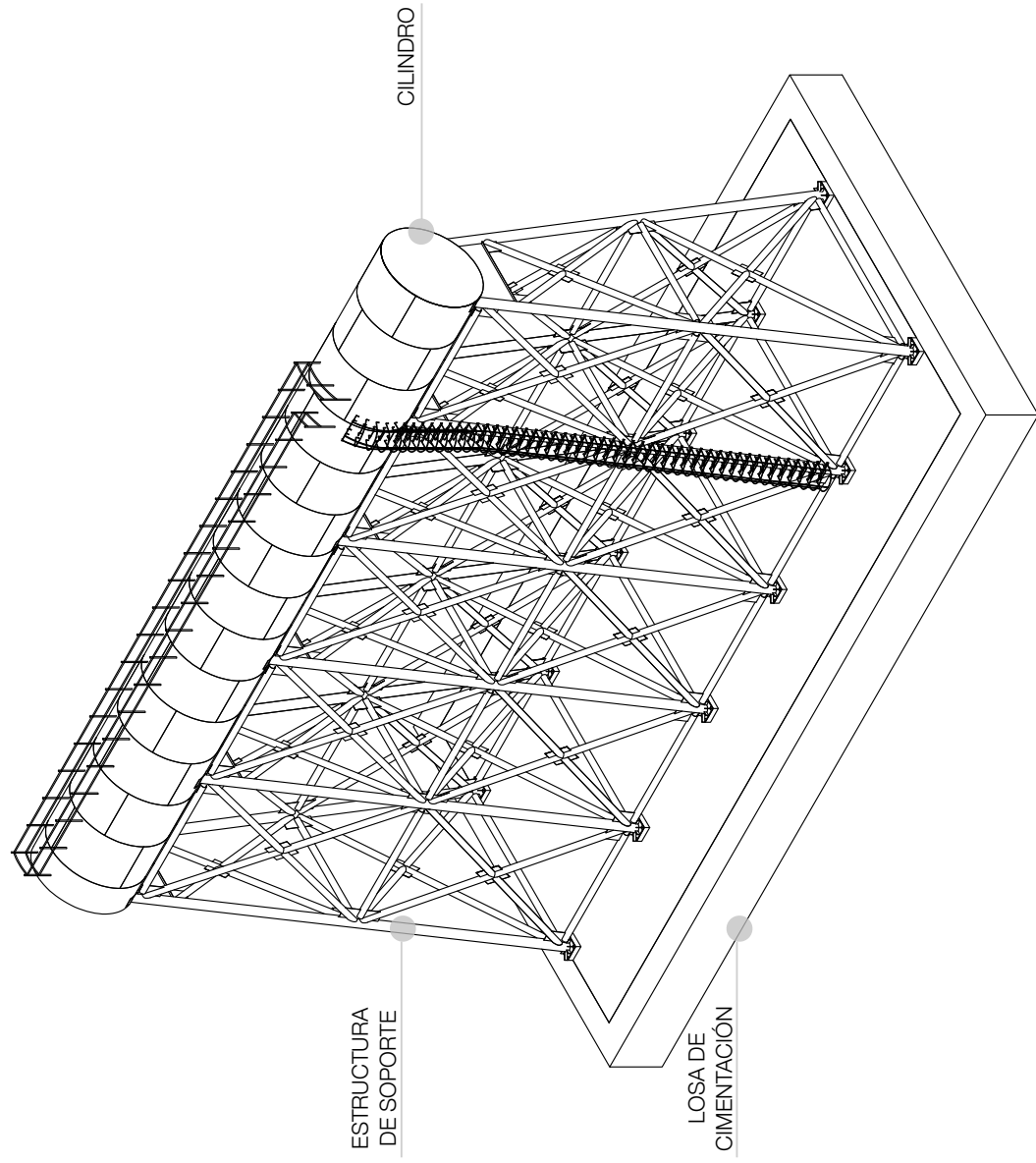
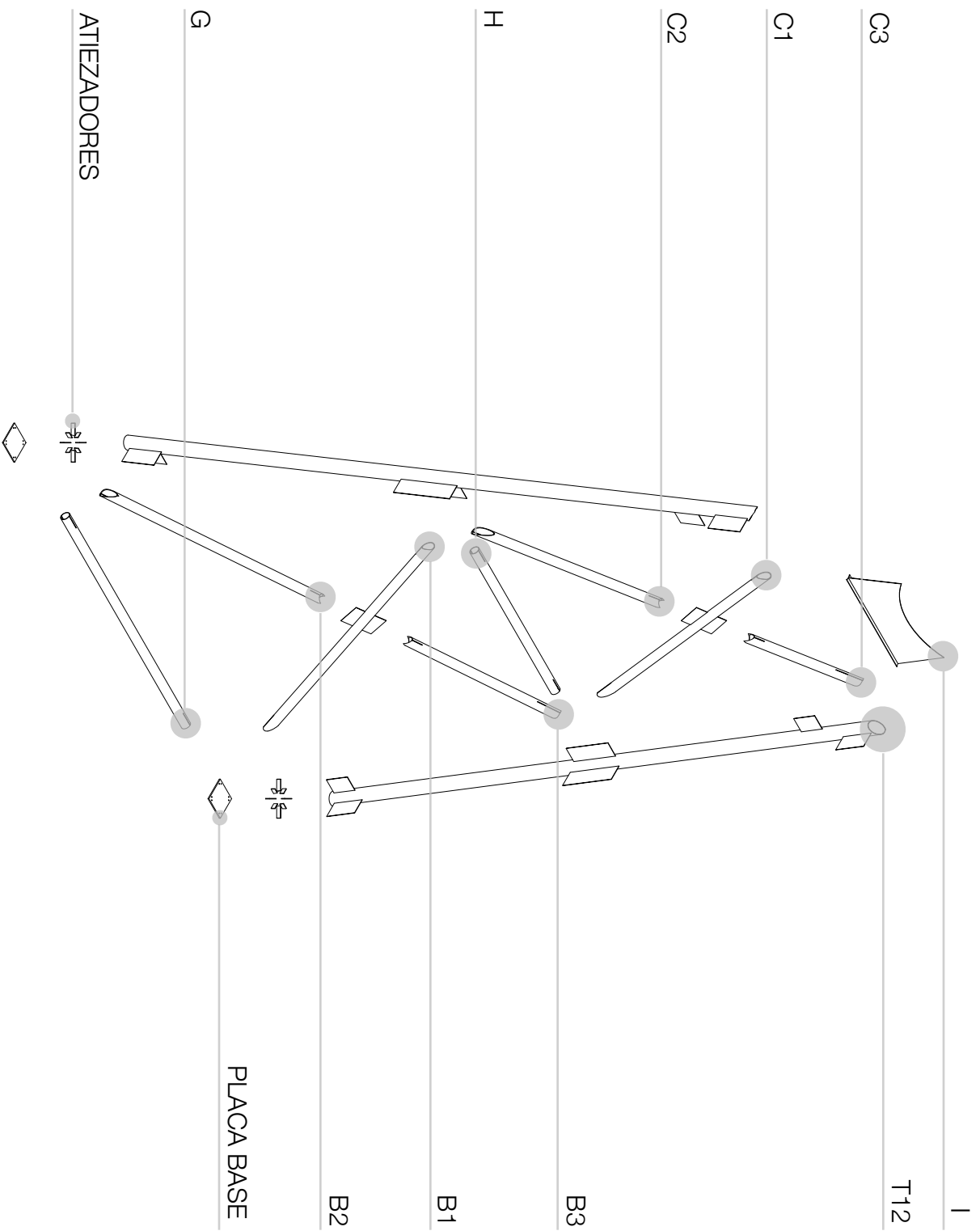


Figura 1. Vista general del tanque de almacenamiento (Fuente: elaboración propia)



(a) Marcos

Figura 2. Elementos de la estructura de soporte. (Fuente: elaboración propia)

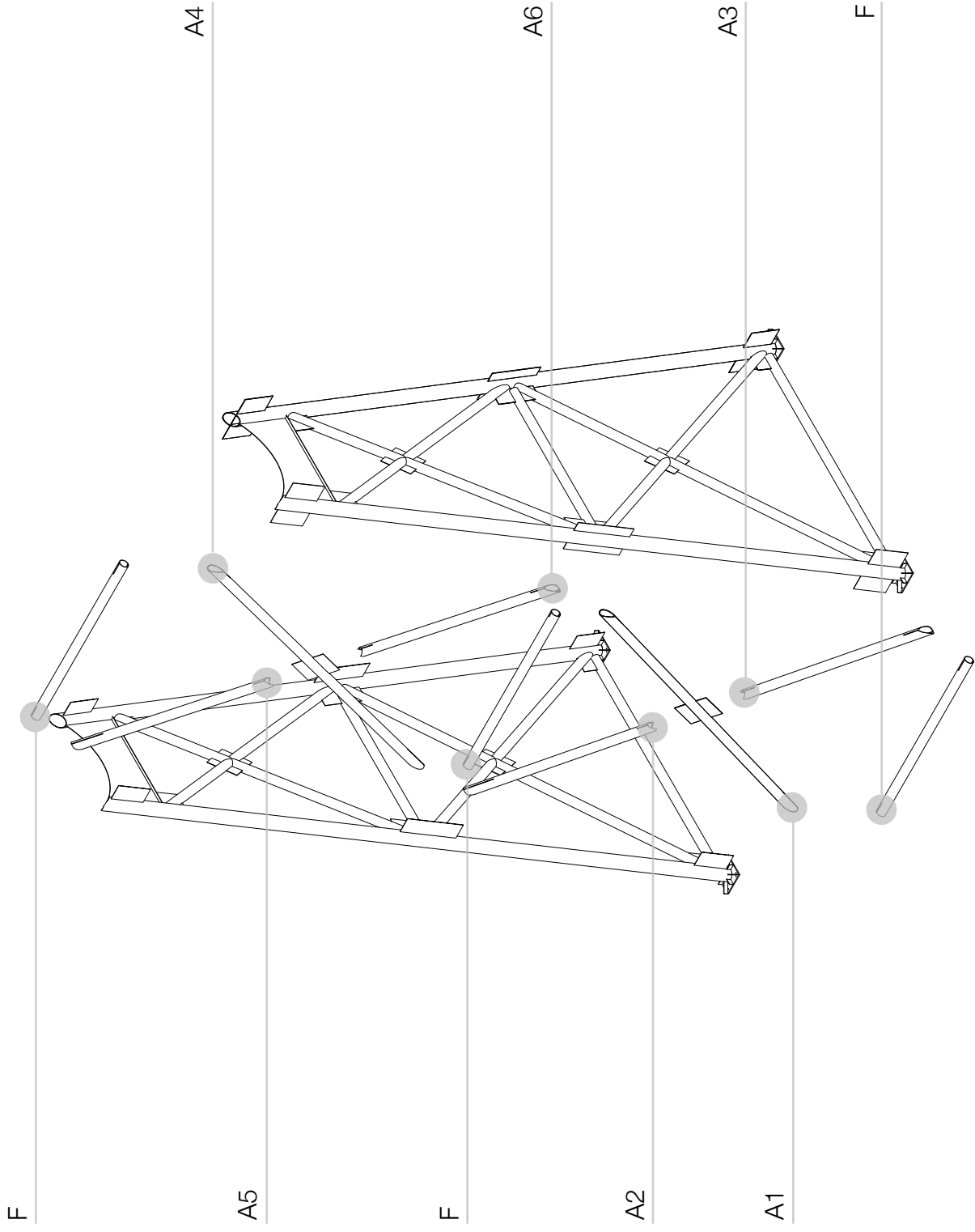
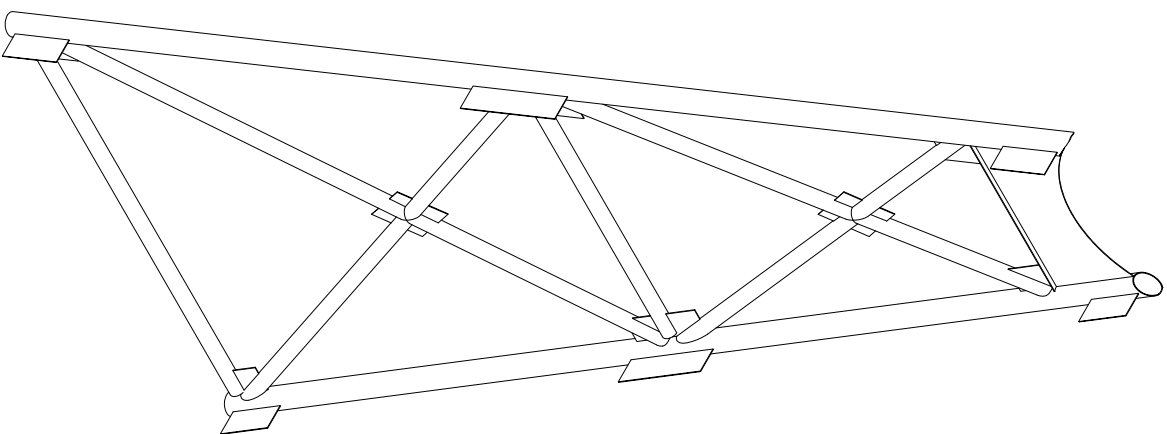
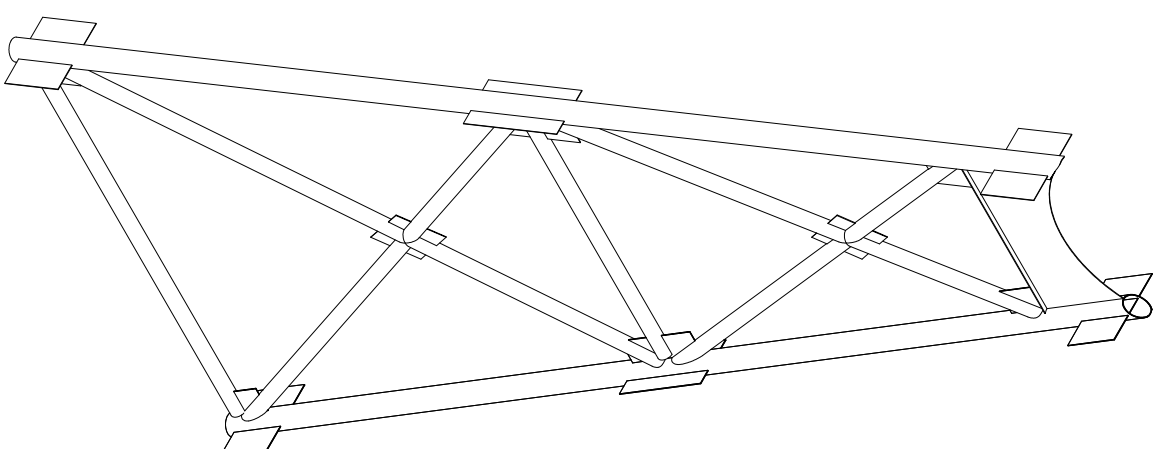


Figura 2. Continuación



(a) Tipo 1



(b) Tipo 2

Figura 3. Tipos de marco (Fuente: elaboración propia)

En el Cuadro 1 se muestra una descripción de los elementos prefabricados, además de las dimensiones, cantidades y el peso por unidad.

Cuadro 1. Descripción de elementos prefabricados

| Item | Descripción | Dimensión (m) | Cantidad | Peso/unidad (ton) |
|-------|---|---------------|----------|-------------------|
| B1 | Tubo de 8" + Placa C (marco) | 9,11 | 6 | 0,42 |
| B2 | Tubo de 8" (marco) | 5,37 | 6 | 0,22 |
| B3 | Tubo de 8" (marco) | 3,70 | 6 | 0,15 |
| C1 | Tubo de acero de 8" + Placa C (marco) | 7,25 | 6 | 0,34 |
| C2 | Tubo de 8" (marco) | 4,52 | 6 | 0,19 |
| C3 | Tubo de 8" (marco) | 2,71 | 6 | 0,11 |
| G | Tubo de 8" (marco) | 6,40 | 6 | 0,27 |
| H | Tubo de 8" (marco) | 4,30 | 6 | 0,18 |
| T12.1 | Tubo de 12" + Placa A + Placa B + Placa A.1 + Placa B.1 (marco) | 15,75 | 4 | 1,30 |
| T12.2 | Tubo de 12" + Placa A.1 + Placa B.1 + Placa D y E + Placa F (marco) | 15,75 | 8 | 1,55 |
| A1 | Tubo de 8" + Placa C (arriostre) | 8,78 | 10 | 0,40 |
| A2 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,38 | 10 | 0,18 |
| A3 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,39 | 10 | 0,18 |
| A4 | Tubo de 8" + Placa C (arriostre) | 9,17 | 10 | 0,42 |
| A5 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,57 | 10 | 0,19 |
| A6 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,59 | 10 | 0,19 |
| F | Tubo de 8" (arriostre) | 4,70 | 30 | 0,20 |
| I | Viga I | - | 6 | 0,23 |
| Total | | - | 156 | - |

Fuente: elaboración propia.

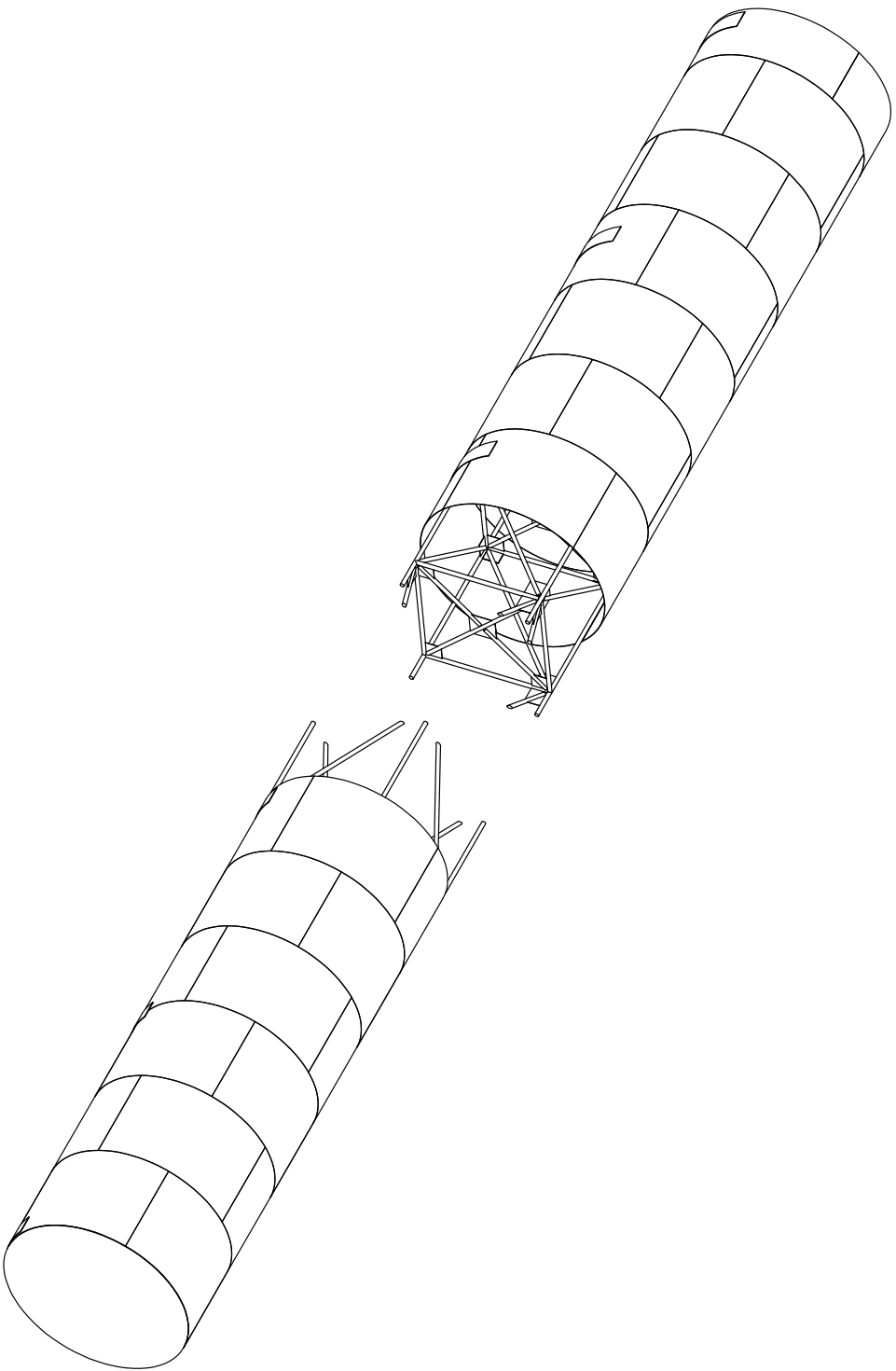


Figura 4. Secciones del cilindro. (Fuente: elaboración propia)

PROCESO DE ENSAMBLAJE

En el Cuadro 2 se muestra una descripción de las tareas que se deben llevar a cabo en el proceso de ensamblaje, además de la mano de obra y equipo requerido en el mismo. En cuanto al equipo, se brindan más especificaciones en el apartado *Equipo*.

Cuadro 2. Descripción de tareas, mano de obra y equipo necesario para el proceso de ensamblaje

| Entregable | Actividad | Tarea | Descripción de tarea | Mano de obra | Equipo |
|------------------------------|-----------------------------|---|---|--------------------|-----------------------------------|
| | | Trazo y armado ¹ | Se realiza el trazo de los elementos de acuerdo con el esquema de ensamblaje de marcos (ver <i>Figura 5</i>) y se apuntalan en su lugar | Armador | Grúa, máquina de soldar (pequeña) |
| Estructura de soporte | Ensamblaje de marcos | Resoldado A | Se aplican los cordones finales de soldadura en las uniones de los elementos de la cara superior de los marcos | Soldador | Máquina de soldar (grande) |
| | | Resoldado B | Se voltean los marcos y se procede con la aplicación de los cordones finales de soldadura en las uniones de los elementos de la cara inferior | Soldador | Grúa, máquina de soldar (grande) |
| | | Preparación de superficies para pintura | Se realiza la remoción de la escoria en los cordones de soldadura y el lijado, limpieza y retoque de la pintura base en los marcos | Ayudante (pintura) | Equipo menor de pintura |
| | | Aplicación de las capas de pintura | Se realiza la aplicación de las capas intermedia y final en los marcos | Pintor | Sistema Airless |

Cuadro 2. Continuación

| Entregable | Actividad | Tarea | Descripción de tarea | Mano de obra | Equipo |
|------------------------------|---------------------------------|--|--|---------------------|---|
| | | Nivelación de pedestales | Se realiza la nivelación de los pedestales con mortero expansivo de alta fluidez y se colocan las placas de base | Ayudante | |
| | | Lizado de marcos ² | Se realiza el levantamiento de los marcos y se le colocan los arriostres temporales (pie de amigo) para que se mantengan en su posición durante el proceso de armado de los arriostres | Armador | Grúa |
| | | Armado de atezadores | Se colocan los atezadores en las bases de las columnas de los marcos y se apuntalan en su lugar | Armador | Máquina de soldar (pequeña) |
| | | Armado de arriostres ³ | Se colocan los elementos de acuerdo con el esquema de ensamble de arriostres (ver <i>Figura 6</i>) y se apuntalan en su lugar. | Armador | Grúa, máquina de soldar (pequeña), andamios |
| Estructura de soporte | Ensamblaje de arriostres | Resoldado de arriostres | Se aplican los cordones finales de soldadura en los arriostres | Soldador | Máquina de soldar (grande), andamios |
| | | Resoldado de atezadores | Se aplican los cordones finales de soldadura | Soldador | Máquina de soldar (grande) |
| | | Colocado de tuercas en pernos de anclaje | Se colocan las tuercas en los pernos de las placas de unión | Ayudante (Metálico) | Equipo menor de armado |
| | | Preparación de superficies para pintura | Se realiza la remoción de la escoria en los cordones de soldadura y el lijado, limpieza y retoque de la pintura base en los marcos | Ayudante (Pintura) | Equipo menor de pintura, andamios |
| | | Aplicación de capa intermedia de pintura | Se realiza la aplicación de la capa intermedia de pintura de los arriostres | Pintor | Sistema Airless |

Cuadro 2. Continuación

| Entregable | Actividad | Tarea | Descripción de tarea | Mano de obra | Equipo |
|-----------------|-------------------------------|--|---|--------------------|---|
| | | Alineación de la estructura interna | Se realiza la alineación de la estructura interna de las secciones del cilindro y se apuntala en su lugar | Armador | Máquina de soldar (pequeña), grúa, equipo de oxicorte, andamios |
| | | Resoldado de la estructura interna | Se aplican los cordones finales de soldadura en los en las uniones de la estructura interna | Soldador | Máquina de soldar (grande) |
| | | Armado de anillos centrales | Se realiza el armado de las 8 láminas que conforman los anillos centrales del cilindro y se apuntalan en su posición. Se utiliza el mecanismo de viraje del cilindro (ver Figura 7) | Armador | Máquina de soldar (pequeña), grúa, equipo de oxicorte, andamios |
| Cilindro | Ensamblaje de cilindro | Resoldado de anillos centrales | Se aplican los cordones finales de soldadura internos y externos en los anillos centrales del cilindro | Soldador | Máquina de soldar (grande) |
| | | Instalación de baranda superior | Se realiza la instalación de las secciones de la baranda superior del cilindro | Soldador | Máquina de soldar (pequeña), máquina de soldar (grande) |
| | | Preparación de superficies para pintura | Se realiza la remoción de escoria en los cordones de soldadura, el lijado y limpieza del cilindro | Ayudante (Pintura) | Equipo menor de pintura, andamios |
| | | Rectificación de la pintura del cilindro | Se realiza la rectificación interna y externa de la capa final de pintura en todo el cilindro | Pintor | Sistema Airless |

Cuadro 2. Continuación

| Entregable | Actividad | Tarea | Descripción de tarea | Mano de obra | Equipo necesario |
|-------------------|---------------------------------|---|--|---------------------|----------------------------|
| Cilindro | Acoplamiento de cilindro | luzaje del cilindro | Se realiza el levantamiento y apuntalamiento del cilindro hasta su posición final. Antes de realizar el movimiento, se debe colocar el cilindro lo más cerca posible de la estructura de soporte de manera que no se exceda la capacidad de carga de la grúa | Armador | Grúa |
| | | Resoldado de cilindro con estructura de soporte | Se aplican los cordones finales de soldadura entre la Viga I y las almohadillas instaladas en el cilindro | Soldador | Máquina de soldar (grande) |
| | | Instalación de escalera externa | Se realiza la instalación de la escalera externa en la estructura de soporte y en el cilindro | Soldador | Máquina de soldar (grande) |

Fuente: elaboración propia con base en cronograma realizado

¹ Se repite para el armado de los 6 marcos. Esta tarea se realiza sobre la losa de cimentación, por lo que, para evitar problemas con las placas de los marcos tipo 2 y los pedestales de la losa, se requiere una configuración de piezas de madera que permitan elevar los marcos 45 cm aproximadamente

² Los marcos se izan de manera que el primero sea el que se encuentra mas alejado de la grúa. Los marcos tipo 1 se colocan al principio y final de la estructura de soporte

³ El armado de los arriostres se realiza en el mismo orden de luzaje de los marcos

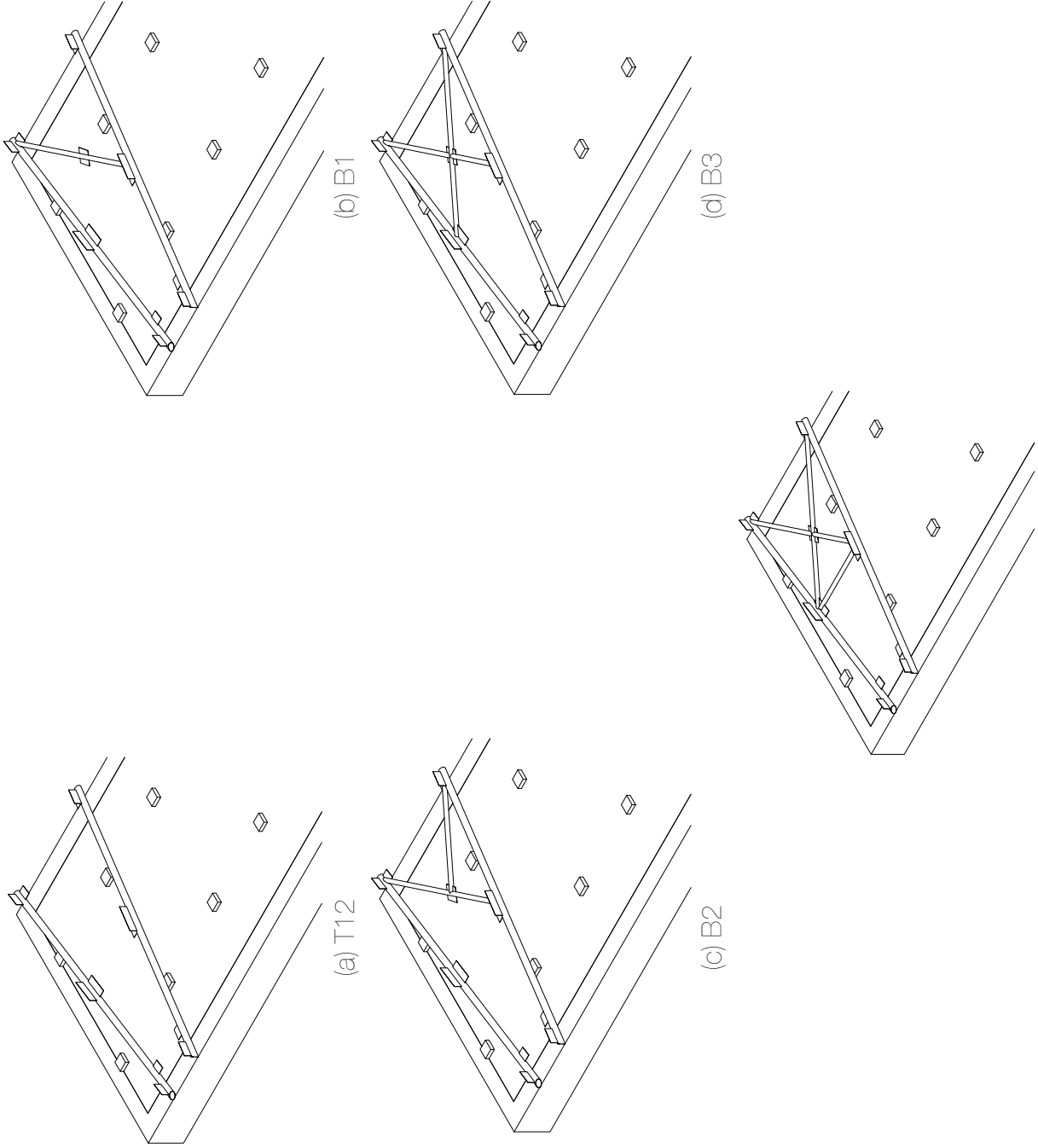


Figura 5. Esquema de ensamble de marcos (Fuente: elaboración propia)

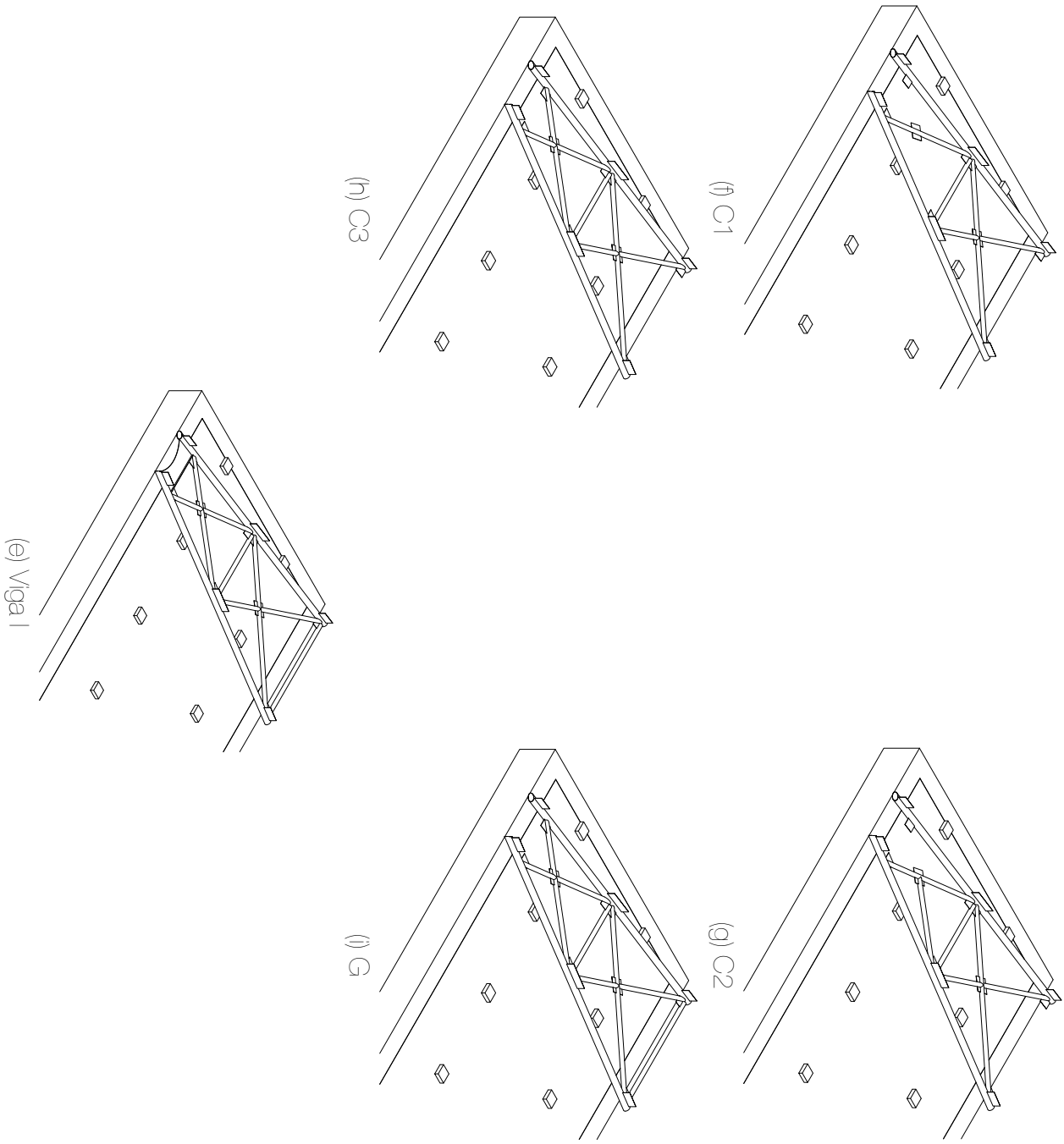
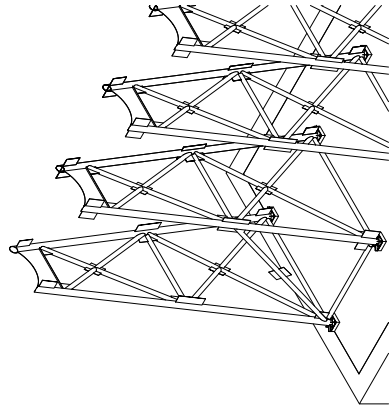


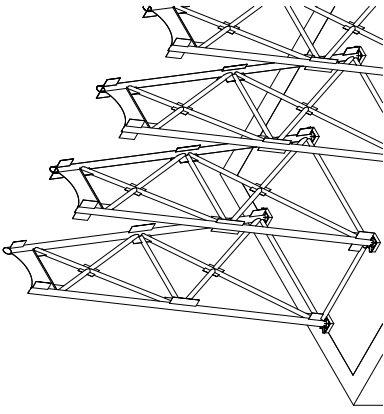
Figura 5. Continuación



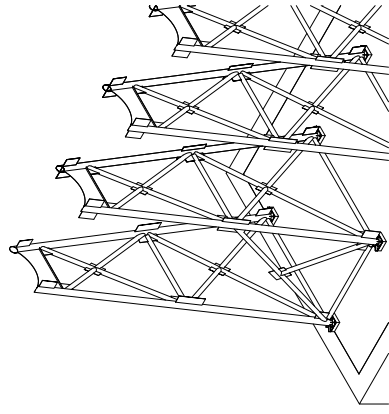
(a) lado de marcos



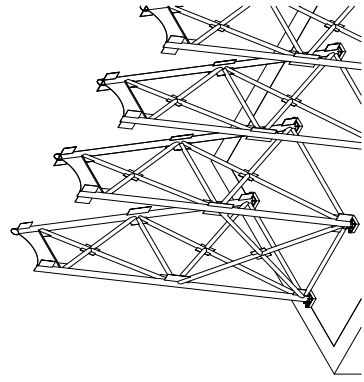
(c) A1



(b) F



(d) A3



(e) A2

Figura 6. Esquema de ensamble de arriostres (Fuente: elaboración propia)

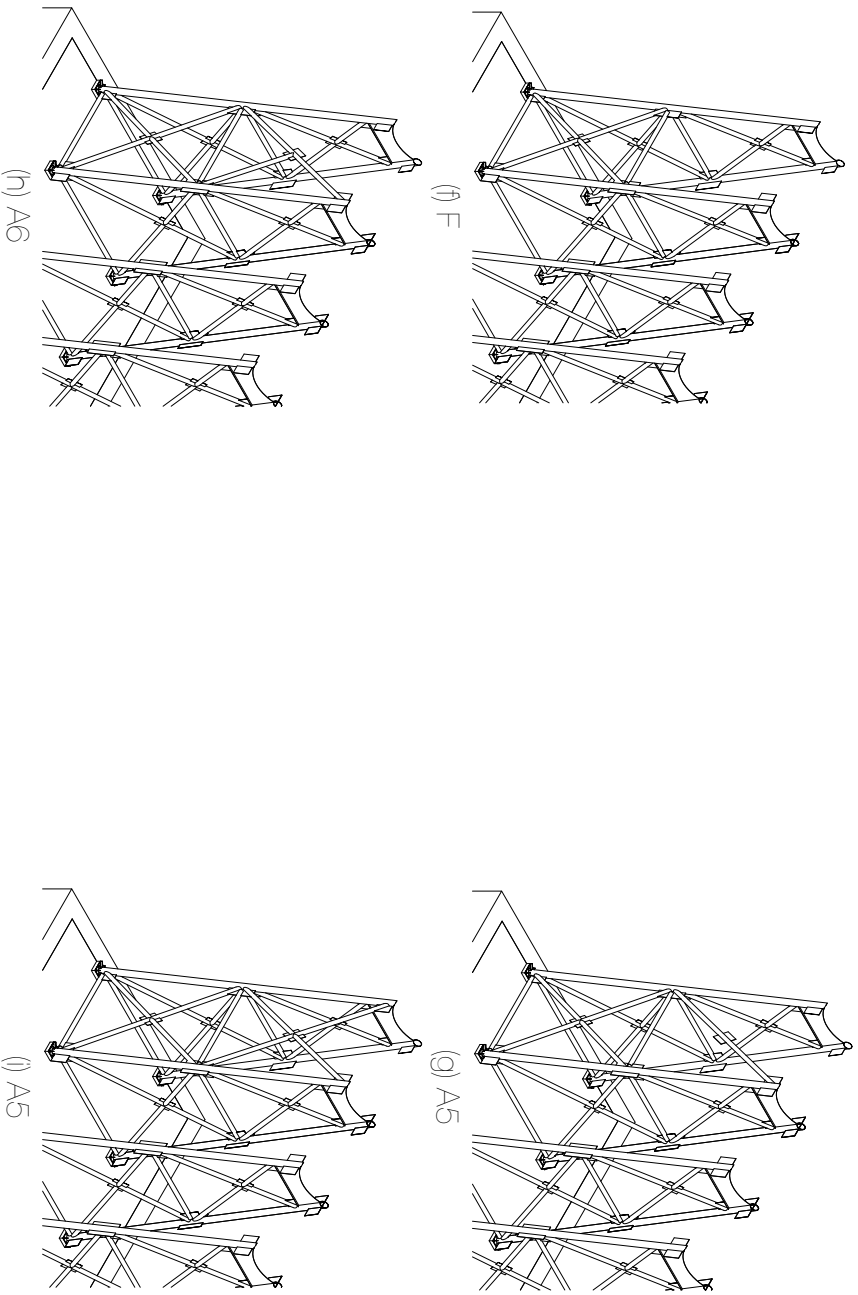


Figura 6. Continuación

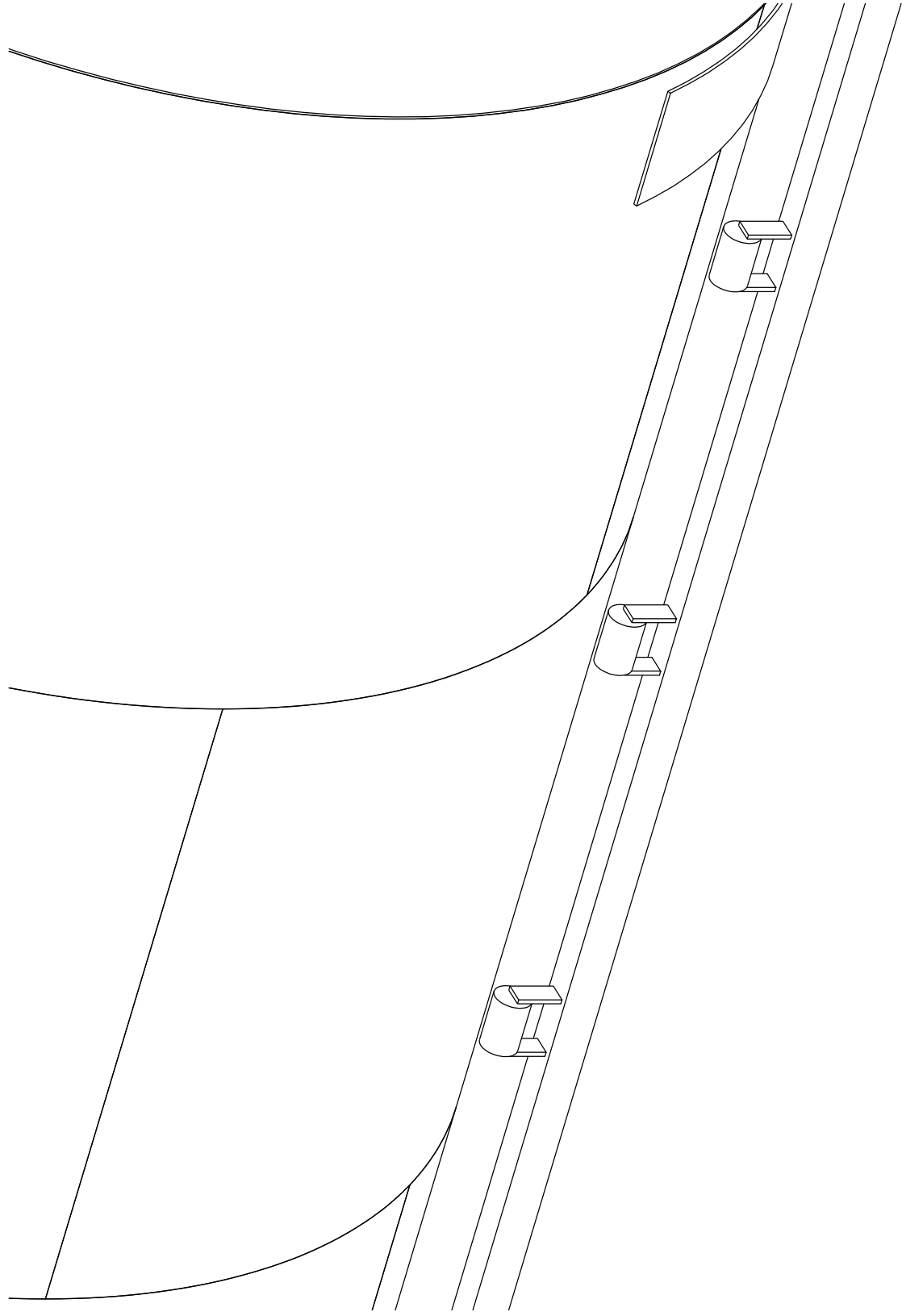


Figura 7. Mecanismo de viraje del cilindro (Fuente: elaboración propia)

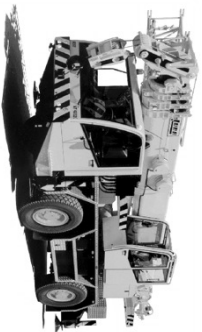
EQUIPO

Cuadro 3. Descripción de los equipos necesarios para el proceso de ensamble

Equipo

Descripción

Grúa



El tipo de grúa adecuada para las labores especificadas y las condiciones del sitio son las móviles sobre ruedas. Es necesaria una grúa de baja capacidad (20 – 40 toneladas) en las todas las tareas en donde se indica, exceptuando la de izaje del cilindro en la que se requiere una grúa de gran capacidad (80 – 100 toneladas).

Máquina de soldar



Para las tareas de armado se requiere una máquina de soldar pequeña, y para las tareas de resoldado se requiere una máquina de soldar grande. Se recomienda que dichas máquinas sean trifásicas para optimizar el uso de la energía.



Alicates de punta plana



Alicates de presión



Centro puntos

Equipo menor de armado



Cepillos de alambre



Cinceles



Cintas métricas

Cuadro 3. Continuación

| Equipo | | Descripción | |
|--|---|---|---|
|  |  |  |  |
| Ecuadras metálicas (falsa y universal) | | Esmeriladoras de mano | |
|  |  | Niveles metálicos | |
| Mangueras de nivel | | Mazos | |
|  |  | Sargentos metálicos | |
| Piquetas | | Plomadas | |

Equipo menor de armado

Cuadro 3. Continuación

Equipo

Descripción

**Sistema
Airless**



Este sistema tiene mayores ventajas que el sistema convencional ya que se da una mayor economía en la pintura, facilita y reduce el tiempo de aplicación y en general tiene un mejor acabado



Brochas

Cepillos

Cinzel y mazo

Equipo menor de pintura



Lija



Piquetas



Trapos

Fuente: elaboración propia. Las imágenes fueron tomadas de la web

ASPECTOS DE SEGURIDAD¹

DEL TRABAJO CON ANDAMIOS METÁLICOS

Para el trabajo con andamios se debe seguir con lo que se estipula a continuación:

- Se deben colocar barandas de 0,90 m como mínimo en toda la periferia, con una barra intermedia y un rodapié de 0,10 cm, en todas las plataformas que excedan los 2,00 m de altura.
- Las estructuras de andamios deben apoyarse sobre bases fijas o ajustables capaces resistir los esfuerzos de las cargas aplicadas (peso propio y cargas temporales). En el diseño de los andamios, se debe utilizar un factor de seguridad igual a 2,00 (FS = 2,00).
- Al utilizar el esquema de andamios móviles o sobre ruedas, los mismos deben ser arriostrados y fijados a la estructura cuando se encuentran en la posición de trabajo, de manera que se eviten los movimientos oscilatorios.
- Antes de colocar un cuerpo de andamios, de debe verificar que los elementos se encuentren en buen estado (sin deformaciones peligrosas, corrosión o algún daño peligroso) y que cumplan con las características de resistencia requerida (con un diámetro externo de los elementos verticales de 3,81 cm como mínimo). Al colocarlos, se debe comprobar que todos los elementos se encuentren bien unidos entre sí, procurando que se encuentren bien arriostrados en dirección diagonal y transversal.

DEL MOVIMIENTO DE CARGAS

Para el manejo manual de cargas, los límites de carga individual por persona se muestran a continuación:

- 60 kg para el transporte de carga.
- 55 kg para el levantamiento de carga, con una frecuencia menor o igual 3 levantamientos por hora.
- 50 kg para el levantamiento de carga, con una frecuencia superior a los 3 levantamiento por hora.

El transporte o levantamiento de cargas mayores a las estipuladas anteriormente, deben ser manejados por varios trabajadores siempre que no se excedan los límites señalados por trabajador.

En el caso del trabajo con grúas se debe seguir con lo que se estipula a continuación:

- La elevación y descenso de las cargas se debe realizar lentamente, de manera que se eviten movimientos bruscos siempre que sea posible.

¹ Tomado del Reglamento de seguridad en construcciones

- No se debe permitir que los trabajadores se encuentren en la vertical de las izadas de las cargas, bajar sobre cargas, ganchos o eslingas vacías y dejar la grúa con la carga suspendida.
- Tanto la persona encargada de la operación de la grúa como de la dirección y señalamiento de las maniobras, deben conocer el código de ademanes para la comunicación visual que se muestra en la *Figura 1*. En el caso de que el operador tenga falta de visibilidad, se deberán utilizar la cantidad de trabajadores necesarios para realizar el señalamiento.
- En la operación de las grúas se contarán con las siguientes medidas de seguridad:
 - En todo movimiento se respetará el diagrama de carga y alcance establecido por el fabricante. El mismo debe estar ubicado de manera que sea visible.
 - La grúa deberá estar dotada de sistemas de estabilización suficientes y en buen estado, además de estar equipado con medios de iluminación y dispositivos sonoros de aviso.
 - Se verificará en todo momento que los cables estén libres de nudos y torceduras permanentemente y cualquier otro defecto en la estructura. Además, se inspeccionará periódicamente que la cantidad de hilos desgarrados no excedan el 10% del total, contados a lo largo de dos tramos de cableado separados a una distancia de 8 veces su diámetro como máximo. Igualmente, se protegerán los cables para que no entren en contacto con aristas vivas mediante la colocación de elementos auxiliares adecuados.
 - Al utilizar eslingas de dos o más ramales, se debe procurar que el ángulo que formen bajo el gancho de fijación no exceda los 90°, siendo 60° el ángulo recomendado.

En el *Cuadro 4* se muestran los factores de seguridad recomendados para la operación de grúas.

Cuadro 4. Factores de seguridad recomendados para la operación de grúas

| Descripción | Factor de seguridad |
|--|---------------------|
| Elementos que componen la grúa | 3,00 |
| Cables de la grúa | 6,00 |
| Cadenas para el transporte de cargas | 5,00 |
| Cuerdas para el izado y transporte de cargas | 10,00 |

Fuente: Decreto N 25235-1/MTSS; Reglamento de seguridad en construcciones, 1996

DEL EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

Los equipos de protección personal deberán contar una marca que certifique que cumplen con alguna norma reconocida internacionalmente. Además, el mismo deberá mantenerse en todo momento listo para su uso inmediato, siendo los trabajadores los encargados de usarlos y cuidarlos convenientemente.

En el Cuadro 5, se ilustra el equipo de protección personal que debe utilizarse de acuerdo con la fase del proceso de ensamblaje que se esté desarrollando.

Cuadro 5. Equipo de protección personal mínimo de acuerdo con las fases del proceso de ensamblaje

| Actividad | Equipo de protección personal | | | | |
|---|--|---|--|--|------------------------------|
| Fabricación y ensamblaje de estructuras |  |  |  |  | Cinturón lumbar ¹ |
| Soldadura |  |  |  |  | Delantal de cuero |
| | Casco de seguridad | Lentes de seguridad | Calzado de seguridad | | Guantes de cuero |
| | Mascarilla para soldar | Vidrios claros y oscuros | | | |

Cuadro 5. Continuación

Actividad

Equipo de protección personal

Pintura



Casco de seguridad



Lentes para disolventes orgánicos



Mascarillas para disolventes orgánicos



Guantes

Maquinaria en general



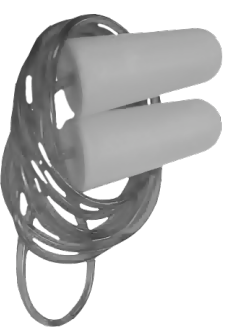
Casco de seguridad



Lentes de seguridad



Mascarillas



Protección auditiva

Fuente: elaboración propia con base en los estipulado en el Reglamento de seguridad en construcciones

¹ Se debe utilizar siempre que se trabaje levantando o manipulando cargas Individuales.

² Si hubiera riesgo de accidente a causa de la electricidad, los trabajadores deberán usar cascos de material aislante, zapatos dieléctricos y herramientas dieléctricas.

En cuanto a los trabajos en altura se deben seguir las siguientes recomendaciones:

- Los trabajadores que no estén protegidos por otros medios contra caídas mayores a 2,00 m de altura deberán llevar un cinturón de seguridad, fijado a puntos sólidos de la estructura o a elementos auxiliares que garanticen la protección.
 - Cualquiera de los dispositivos de seguridad contra caídas deben soportar como mínimo una caída de 100 kg desde una altura de 2 m.
- Cuando se utilice ventilación forzada en espacios confinados se deben seguir las siguientes recomendaciones:
- El equipo deberá colocarse de manera que se impida la contaminación del aire.
 - Deberá suministrarse el aire a una temperatura apropiada.
 - El compresor deberá estar provisto de un dispositivo que impida todo calentamiento excesivo, evitando así la formación de gases tóxicos.
 - La alimentación de aire de los aparatos respiratorios no deberá hacerse a una presión excesiva.

BIBLIOGRAFÍA

Decreto N 25235-MTSS: *Reglamento de seguridad en construcciones*. (26 de junio de 1996). Recuperado el 23 de marzo de 2014, de Comisión Nacional de Emergencias: http://www.cne.go.cr/cedo_dvds/archivos/flash_content/pdf/spa/doc377/doc377-contenido.pdf

MANUAL DE **SUPERVISIÓN**

SOLDADURA Y RECUBRIMIENTOS
EN TANQUES METÁLICOS

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| PARTE A – GENERALIDADES | 1 |
| APLICACIÓN | 1 |
| ALCANCE | 1 |
| SUPERVISOR | 1 |
| PARTE B – SUPERVISIÓN DE SOLDADURA POR ARCO MANUAL CON ELECTRODO REVESTIDO | 2 |
| SOLDADURA POR ARCO MANUAL CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW) | 2 |
| TIPOS DE SOLDADURA (BISEL Y FILETE) | 4 |
| RECOMENDACIONES DE SUPERVISIÓN ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DE LA SOLDADURA | 6 |
| DISCONTINUIDADES EN LA SOLDADURA | 6 |
| CRITERIOS DE SUPERVISIÓN | 20 |
| PARTE C – SUPERVISIÓN DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS SOBRE SUPERFICIES METÁLICAS | 22 |
| RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS PARA TANQUES METÁLICOS | 22 |
| PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE | 22 |
| APLICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO | 23 |
| RECOMENDACIONES DE SUPERVISIÓN ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO | 24 |
| DISCONTINUIDADES EN RECUBRIMIENTOS | 24 |
| CRITERIOS DE SUPERVISIÓN | 32 |
| BIBLIOGRAFÍA | 34 |

PARTE A – GENERALIDADES

APLICACIÓN

La información contenida en este manual aplica para las labores y responsabilidades de la persona designada para la supervisión de los trabajos de soldadura y pintura realizados en campo para la construcción de tanques metálicos. Este documento le proporcionará las directrices generales para la supervisión del proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) y la supervisión de la aplicación de pinturas y revestimientos sobre superficies metálicas, además de suministrarle los criterios de aceptación en cada caso.

ALCANCE

Este manual proporciona esencialmente una introducción general a la supervisión en campo del proceso de soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) y la aplicación de pinturas y revestimientos sobre superficies metálicas, proporcionando una breve descripción de las actividades mencionadas, recomendaciones acerca de lo que debe ser verificado antes, durante y después de dichas actividades y los criterios de aceptación (mediante herramientas de verificación que le permitan registrar y facilitar el proceso de supervisión).

No se debe perder de vista que las labores de inspección en un proceso

constructivo debe ser realizado por las diferentes personas y organizaciones involucradas. Sin embargo, este manual busca otorgar al supervisor, un instrumento que le permita realizar una mejor gestión de la calidad en estas actividades, de manera que cualquier defecto pueda ser corregido a la mayor brevedad.

SUPERVISOR

Dentro de los lineamientos de este manual, un supervisor es una persona determinada por la empresa constructora, encargada de inspeccionar la calidad de las actividades de soldadura y pintura en el sitio de construcción. Si bien, no es la persona responsable de dar la aceptación final de los trabajos realizados (inspector), esta velará por la identificación y corrección de los defectos objeto a rechazo durante la ejecución de dichas actividades.

La importancia de esta figura dentro del proceso constructivo, es que puede dar seguimiento día a día a las operaciones antes mencionadas, ya que el seguimiento proporcionado por parte de los inspectores es intermitente (especialmente cuando el proyecto se encuentra en zonas alejadas), causando que la detección de los defectos sea tardía y que su reparación afecte el plazo de entrega de la obra.

PARTE B – SUPERVISIÓN DE SOLDADURA POR ARCO MANUAL CON ELECTRODO REVESTIDO

SOLDADURA POR ARCO MANUAL CON ELECTRODO REVESTIDO (SMAW)

La soldadura por arco con electrodo revestido, en inglés *Shield Metal Arc Welding* (SMAW), es el proceso en el que la fundición del metal de aporte (soldadura) se produce debido al calor generado por un arco eléctrico establecido entre el extremo de un electrodo y el metal base (unión). El recubrimiento (revestimiento) que protege el interior del electrodo es el encargado de generar el ambiente adecuado durante el proceso, de manera que protege la

transferencia del metal fundido desde el núcleo del electrodo hasta el metal base. Las gotas del metal de aporte se depositan en el metal base recubiertas con escoria líquida, que al solidificarse proporcionan una protección adicional al metal de soldadura durante su proceso de solidificación.

En el *Cuadro 1* se muestran los principales parámetros de soldeo que deben considerarse al utilizar la soldadura por arco con electrodo revestido.

Cuadro 1. Parámetros de soldeo para la soldadura con electrodo revestido

| Parámetro | Consideraciones |
|-----------------------------|---|
| Diámetro del electrodo | <ul style="list-style-type: none">• Los electrodos de poco diámetro pueden emplearse en punteado, uniones de piezas de poco espesor, soldaduras en posición horizontal, vertical y bajo techo y cuando se requiera un bajo aporte térmico.• Los electrodos de mayor diámetro pueden emplearse para uniones de piezas de espesores medios y gruesos y soldaduras en posición plana. |
| Intensidad del soldeo | <ul style="list-style-type: none">• El rango de intensidades que debe utilizarse depende del tipo y diámetro del electrodo, la posición del soldeo y el tipo de unión.• La intensidad debe ajustarse de manera que la cavidad de baño de fusión sea visible. |
| Longitud del arco | <ul style="list-style-type: none">• La longitud del arco depende del tipo y diámetro del electrodo y la posición e intensidad de soldeo.• Como regla general, la longitud debe ser como máximo el diámetro del electrodo. |
| Velocidad de desplazamiento | <ul style="list-style-type: none">• La velocidad debe ajustarse de tal forma que el arco adelante ligeramente el metal fundido. |
| Orientación del electrodo | <ul style="list-style-type: none">• La orientación depende del tipo de unión y de la posición de soldeo. |

Fuente: Lincoln Electric

En cuanto a la intensidad de soldeo, es importante acotar que este proceso puede ser realizado tanto con corriente continua (CC) como con corriente alterna (CA). En corriente continua el arco se inicia con mayor facilidad y tiene una mayor estabilidad, las salpicaduras durante el proceso son poco frecuentes y se puede utilizar cualquier con tipo de electrodo. Sin embargo, para garantizar su efectividad, se prefiere para electrodos de pequeño diámetro, longitudes de arco pequeñas y piezas de espesor delgado. La corriente alterna posibilita el uso de electrodos de mayor diámetro y el soldeo a gran distancia de la fuente de corriente, por lo que es preferible para piezas de espesor grueso. No obstante, se debe tomar en consideración que el revestimiento del electrodo debe contener sustancias que permitan

restablecer el arco y que las salpicaduras durante el proceso sean más frecuentes.

Con respecto a los electrodos, es importante considerar que el revestimiento es frágil y susceptible a absorber y retener humedad, por lo que el electrodo no debe ser empleado si presenta algún defecto (como grietas o secciones desprendidas) o si ha sido expuesto a ambientes excesivamente húmedos o depositados sobre superficies que contienen grasa, polvo, pintura o suciedad. Por estas razones, se recomienda no transportar una cantidad de electrodos mayor a la necesaria, manipularlos con guantes limpios y secos y mantenerlos almacenados en lugares limpios con temperatura y humedad adecuadas.

En el *Cuadro 2* se muestran algunas de las ventajas y limitaciones del proceso de soldadura por arco con electrodo revestido.

Cuadro 2. Ventajas y limitaciones de las soldadura por arco con electrodo revestido

| Ventajas | Limitaciones |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • El equipo del soldeo es sencillo (se requiere de una fuente de energía, una pinza portaelectrodo y una conexión a tierra). • No se necesita protección adicional mediante gases auxiliares o fundentes granulares, debido a que la protección proviene del propio electrodo. • Se puede emplear en cualquier posición. • Es aplicable para una gran cantidad de espesores (en general mayores a 2 mm). • Es aplicable a la mayoría del los metales y aleaciones de uso normal. | <ul style="list-style-type: none"> • Es un proceso relativamente lento, debido a las velocidades de soldeo y la necesidad de remover la escoria cuando el metal de aporte se solidifica. • Requiere gran habilidad por parte del soldador. • No es aplicable para espesores menores a los 2 mm y mayores a los 38 mm. |

Fuente: Lincoln Electric

TIPOS DE SOLDADURA (BISEL Y FILETE)

Los tipos de soldadura más utilizados en la construcción de tanques metálicos son las soldaduras con bisel y de filete. La soldadura con bisel, como su nombre lo indica, es aquella realizada en un bisel entre las piezas, por lo que requiere preparación de los bordes. Puede ser aplicado a juntas que son

soldadas por un lado (junta soldada simple) o ambos lados (junta soldada doble). En la *Figura 1*, se ilustra las configuraciones típicas para la juntas soldadas con bisel simple o doble, cuya selección está influenciada por la accesibilidad, economía y la adaptación al diseño estructural.

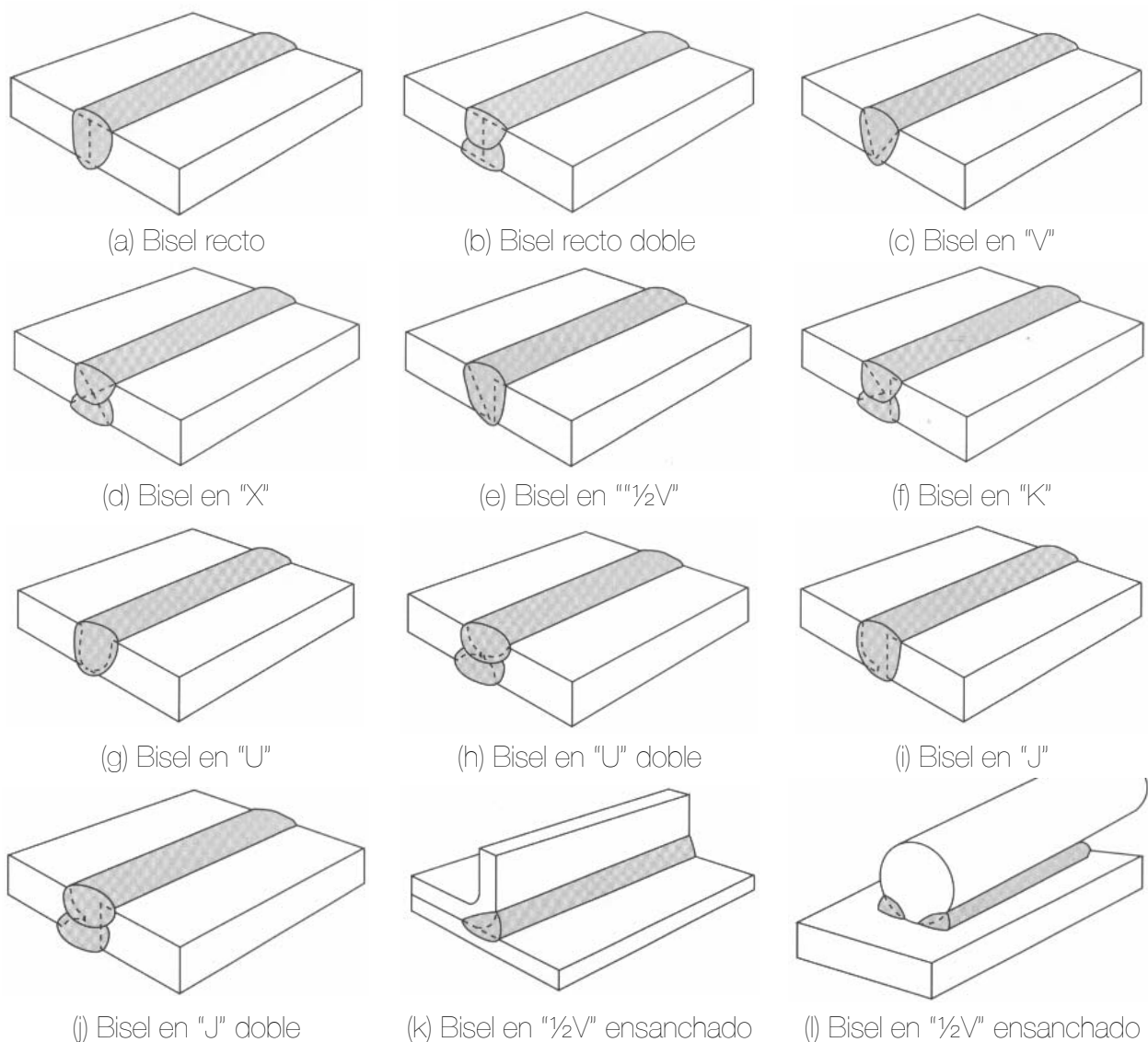
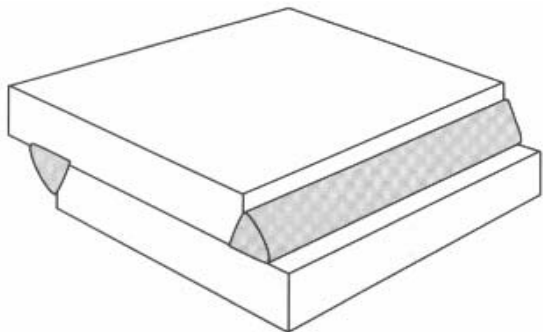


Figura 1. Diferentes configuraciones de la soldadura con bisel

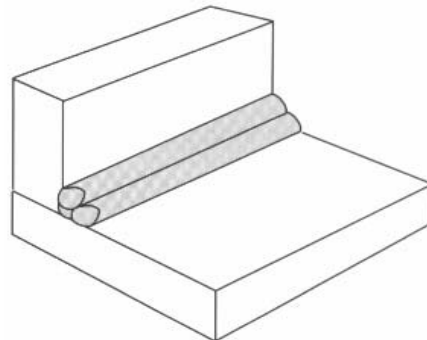
Fuente: Agüero, 2009

La soldadura de filete es aquella de sección transversal aproximadamente triangular uniendo dos superficies aproximadamente en ángulos rectos en una junta solapada (en "T" o "L"), que generalmente no requiere preparaciones en el borde. Al igual que las soldaduras de bisel, la soldadura de filete puede ser realizada

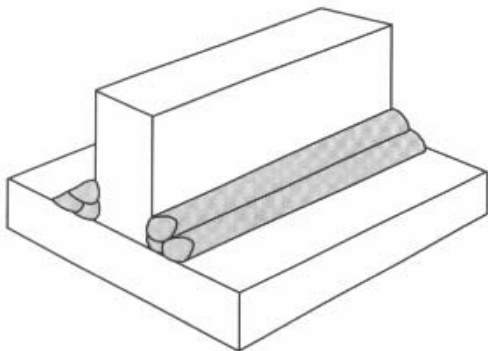
simple o doble y aplicadas usando uno o varios pases. Además, de realizarse con pasadas continuas, a menudo son realizadas con pasadas discontinuas simétricas o asimétricas. En la *Figura 2* se ilustran las configuraciones típicas de filete simple o doble.



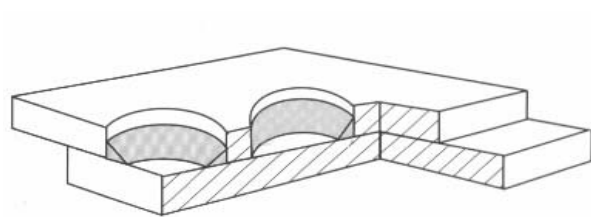
(a) Filete de un pase a ambos lados en una junta solapada



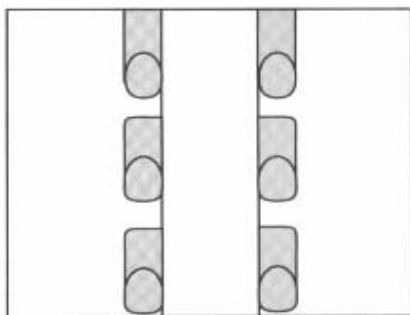
(b) Filete de múltiples pases en un solo lado de una junta en "L"



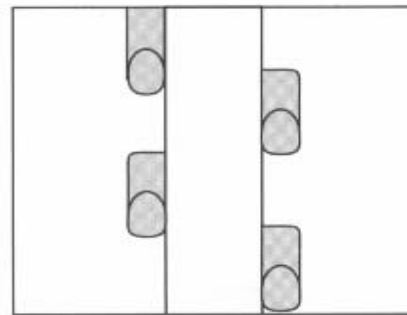
(c) Filete de múltiples pases en ambos lados en una junta en "T"



(d) Filete a lo largo del perímetro de un agujero



(e) Filete discontinuo simétrico



(f) Filete discontinuo asimétrico

Figura 2. Diferentes configuraciones de la soldadura de filete

Fuente: Agüero, 2009

RECOMENDACIONES DE SUPERVISIÓN ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DE LA SOLDADURA

En el *Cuadro 3* se enumeran algunas recomendaciones básicas que el supervisor debe realizar antes, durante y después de aplicado el proceso de soldadura.

DISCONTINUIDADES EN LA SOLDADURA

Una discontinuidad es una irregularidad que se puede interpretar como una falta de homogeneidad en sus propiedades

mecánicas, metalúrgicas o físicas. Estas pueden ocurrir en cualquier punto, sin embargo, no necesariamente son clasificadas como defectos objeto a rechazo, ya que esto depende de los requerimientos establecidos en las especificaciones técnicas del proyecto o en los códigos que apliquen. Es importante que el supervisor sea capaz de describir el tipo, ubicación y dimensiones de ellas, de manera que se pueda determinar si la discontinuidad requiere o no de reparación. En las fichas que se muestran a continuación, se enumeran los principales tipos de discontinuidades que se encuentran en la soldadura, especificando sus características y las causas.

Cuadro 3. Recomendaciones antes, durante y después de la soldadura

| | |
|----------------|--|
| Antes | <ul style="list-style-type: none">• Revisar los planos y las especificaciones técnicas.• Establecer puntos de supervisión durante el proceso de soldeo.• Realizar una revisión del equipo de soldeo y sus condiciones de uso.• Revisar que las juntas estén perfectamente limpias, libres de óxidos, grasas, aceites y agua en función del metal base.• Revisar la condición en la que se encuentran los electrodos y llevar un control de consumo. |
| Durante | <ul style="list-style-type: none">• Revisar las temperatura del metal base y de los pases previos de soldadura.• Revisar que el procedimiento de soldadura se está llevando acabo de acuerdo con la especificación del mismo.• Examinar la raíz de los pases de soldadura, de manera que se garantice que la penetración fue completa (cuando se especifica de este modo).• Examinar cada pase de soldadura, revisando que no exista ninguna discontinuidad. En el caso de juntas soldadas dobles, se debe asegurar que no existan discontinuidades en la raíz. |
| Después | <ul style="list-style-type: none">• Examinar si existen discontinuidades en las superficie de la soldadura.• Verificar que las dimensiones de las soldadura estén de acuerdo con las especificaciones.• Subsanan los defectos que se encuentren en la soldadura. |

Fuente: American Welding Society, 2000

Discontinuidad

Características

Causas

- Pueden darse tanto en el metal de la soldadura como en el base.

Grietas

- Se pueden encontrar en diferentes direcciones:
 - Longitudinal: paralelas (||) al eje.
 - Transversales: perpendiculares (⊥) al eje.
- Se pueden dar en diferentes ubicaciones:

- La carga aplicada a la unión excede la resistencia de la misma, ya sea durante o después del proceso de soldado.
- Se pueden dar en caliente (el metal se enfría y endurece a diferentes temperaturas) o en frío (en condiciones de servicio).



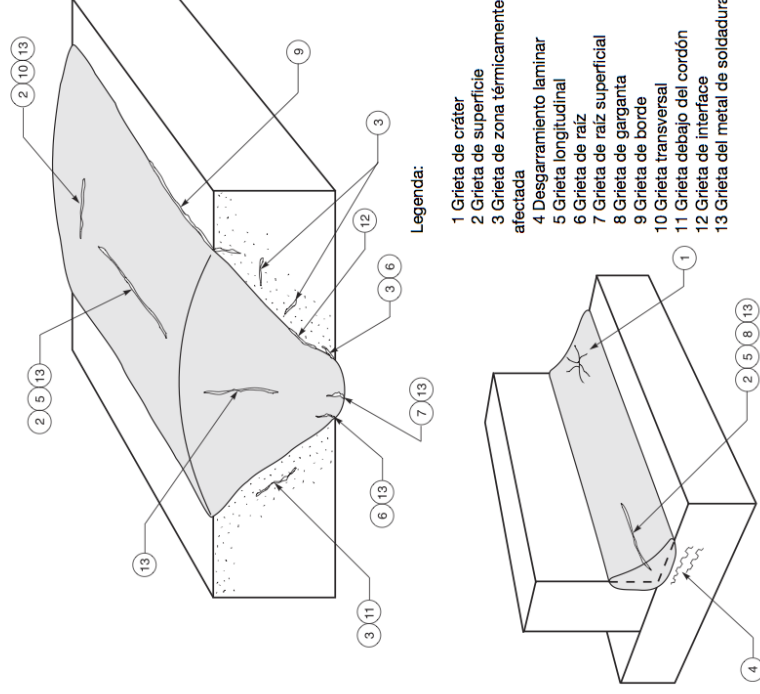
(a) Longitudinal



(b) Transversal

Figura 3. Grietas en soldadura

Fuente: American Welding Society, 2000



Legenda:

- 1 Grieta de cráter
- 2 Grieta de superficie
- 3 Grieta de zona térmicamente afectada
- 4 Desgarramiento laminar
- 5 Grieta longitudinal
- 6 Grieta de raíz
- 7 Grieta de raíz superficial
- 8 Grieta de garganta
- 9 Grieta de borde
- 10 Grieta transversal
- 11 Grieta debajo del cordón
- 12 Grieta de interface
- 13 Grieta del metal de soldadura

(c) Esquema de diferentes ubicaciones y tipos de grietas

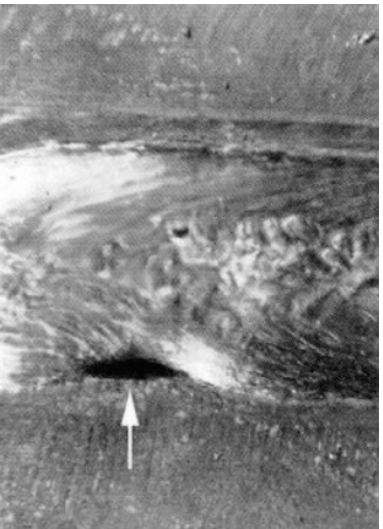
Discontinuidad

Características

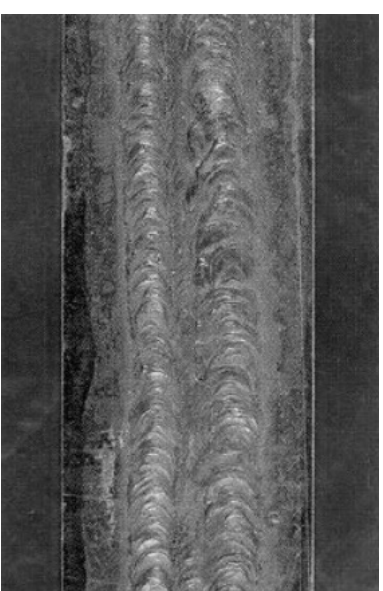
Falta de fusión

- Se da cuando el metal de la soldadura no se funde completamente con el metal base o entre pases de soldadura contiguos.
- Puede ocurrir tanto a lo interno como a lo externo de la soldadura.
- Técnica de soldeo Inapropiada (manipulación incorrecta del electrodo, temperatura de soldeo).
- Diseño o configuración inadecuado de la junta que limita el acceso de la soldadura.
- Contaminación excesiva en el material base o en pases de soldadura contiguos

Causas



(a) En la superficie



(b) Entre pases



(c) Entre el metal base y el metal de soldadura

Figura 4. Falta de fusión

Fuente: American Welding Society, 2000

Discontinuidad

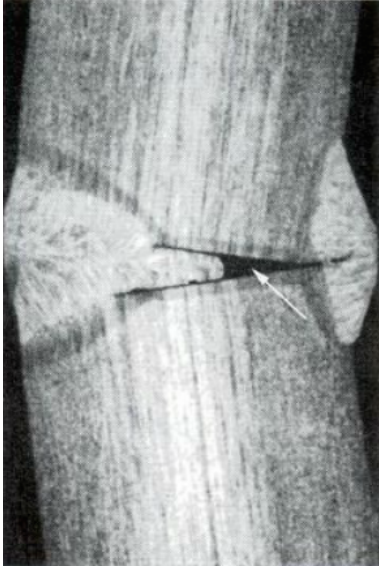
Características

Causas

Falta de penetración

- El metal de la soldadura no se extiende completamente a través de la junta, cuando una penetración total es requerida.
- Esta asociada a la soldadura de filete y tope.

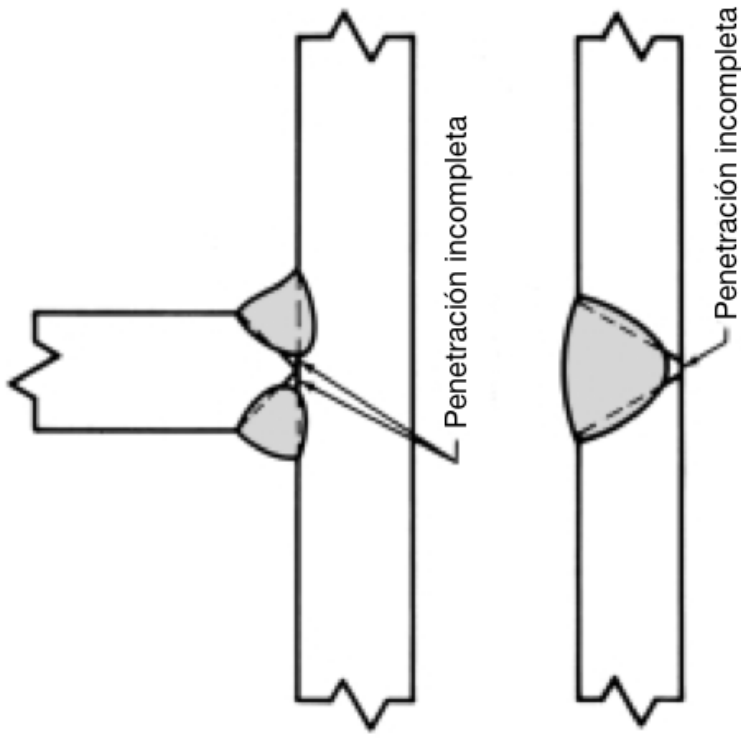
- Técnica de soldeo Inapropiada (manipulación incorrecta del electrodo, temperatura de soldeo).
- Diseño o configuración inadecuado de la junta que limita el acceso de la soldadura.
- Contaminación excesiva en el material base o en pasas de soldadura contiguos.



(a) Junta con falta de penetración



(b) Junta con falta de penetración



Penetración incompleta

Penetración incompleta

(c) Esquema típico de la penetración incompleta

Figura 5. Falta de penetración

Fuente: American Welding Society, 2000

Discontinuidad

Características

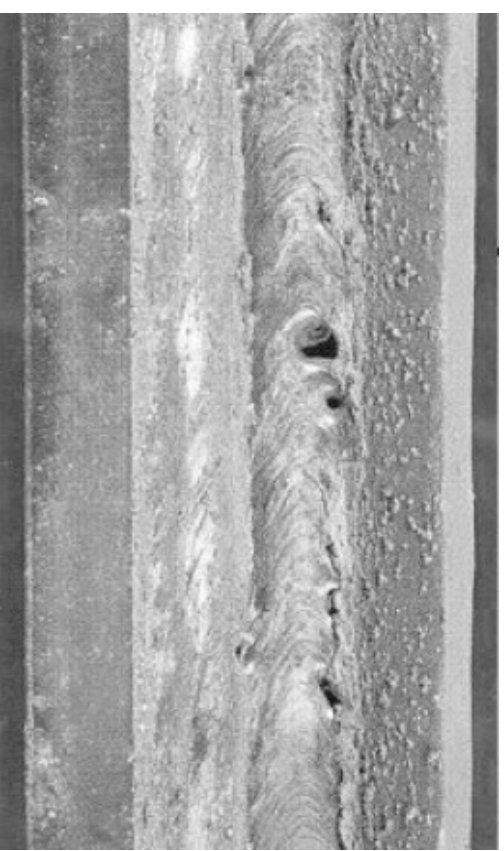
Causas

Inclusión de escoria

- Se da cuando el fundente solidificado (escoria) empleado para proteger el metal de soldadura fundido, en lugar de flotar queda atrapado dentro de la soldadura solidificada.
- Asociada a la falta de fusión.
- Pueden ocurrir entre el metal de la soldadura y el base o entre pases de soldadura contiguos.
- Técnica de soldeo Inapropiada (manipulación incorrecta del electrodo, temperatura de soldeo).
- Falta de limpieza de la escoria entre pasadas de soldadura.



(a) Inclusión de escoria en pase de soldadura



(b) Inclusión de escoria en pase de soldadura

Figura 6. Inclusión de soldadura

Fuente: American Welding Society, 2000

| Discontinuidad | Características | Causas |
|------------------|--|---|
| Porosidad | <ul style="list-style-type: none"> • Es una cavidad formada por el atrapamiento de un gas durante el proceso de soldado. Es como un vacío o una bolsa de gas dentro de la soldadura. • Puede ser de forma esférica o alargada y estar orientada alineada, intermitente o aleatoriamente. | <ul style="list-style-type: none"> • Presencia de contaminantes o humedad en la zona de soldadura, que puede provenir del electrodo, el material base o el ambiente. • Técnica de soldado inapropiada (manipulación incorrecta del electrodo, temperatura de soldado, altas velocidades de soldado). La porosidad es un indicador que señala deficiencias en el proceso de soldado. |



(a) Poros distribuidos uniformemente



(b) Poros superficiales aislados



(c) Poros superficiales alineados



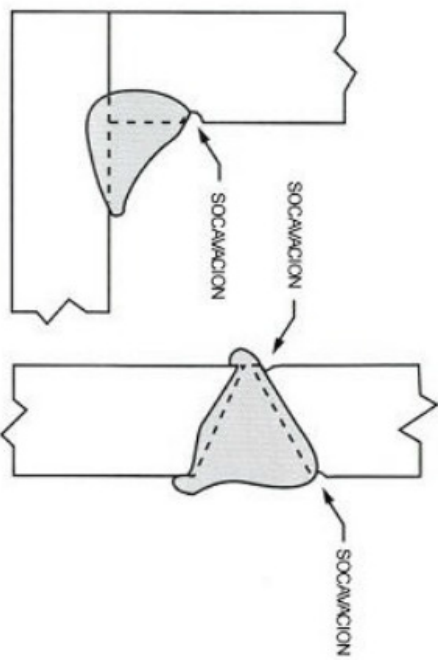
(d) Poros superficiales alargados

Figura 7. Porosidad

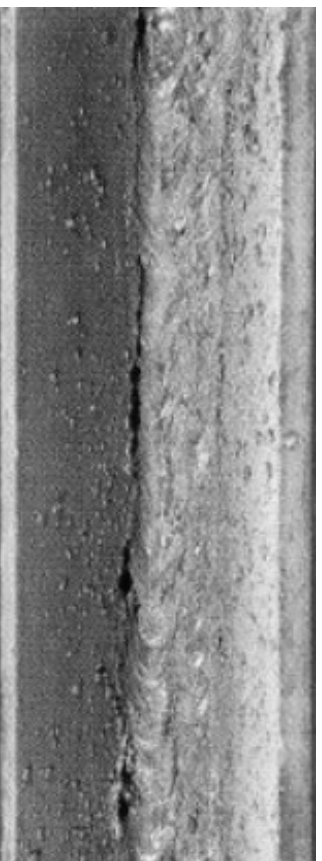
Fuente: American Welding Society, 2000

Discontinuidad**Características****Causas**

- Se da cuando el metal base ha sido fundido durante el proceso de soldado y no se le suministró suficiente material de soldadura para llenar la depresión resultante.
 - Técnica de soldado Inapropiada (manipulación incorrecta del electrodo, temperatura de soldado, altas velocidades de soldado).
 - En las soldaduras a tope, pueden ocurrir tanto en la superficie como en la raíz de la soldadura.
-



(a) Esquema típico de una socavación

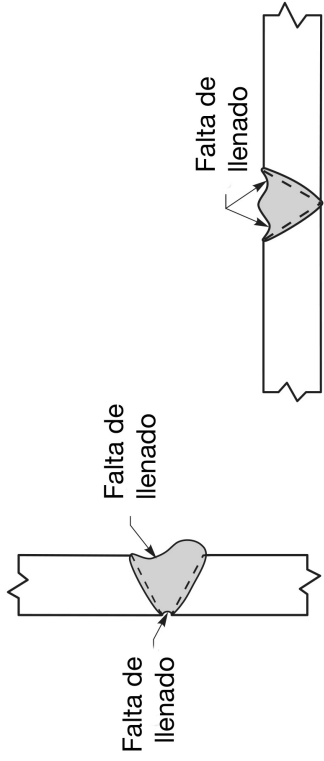


(b) Socavación adyacente en una soldadura de filete

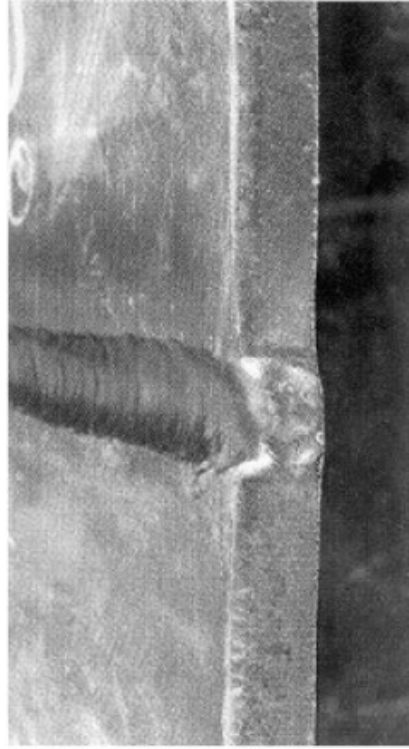
Figura 8. Socavación

Fuente: American Welding Society, 2000

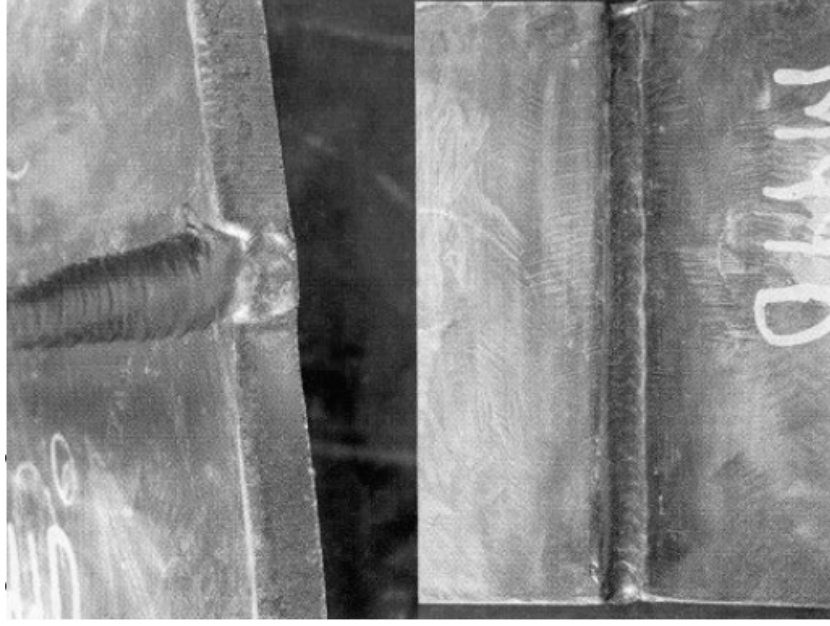
| Discontinuidad | Características | Causas |
|-------------------------|---|--|
| Falta de llenado | <ul style="list-style-type: none"> • Se relaciona con la socavación, y se da cuando la depresión de ubica en el pase de soldadura. • En las soldaduras a tope, pueden ocurrir tanto en la superficie como en la raíz de la soldadura. | <ul style="list-style-type: none"> • El soldador no terminó de hacer la soldadura o no ha entendido los requerimientos de la unión. |



(a) Esquema típico de la falta de llenado



(b) Falta de llenado



(c) Falta de llenado en soldaduras de bisel

Figura 9. Falta de llenado

Fuente: American Welding Society, 2000

Discontinuidad

Características

Traslape

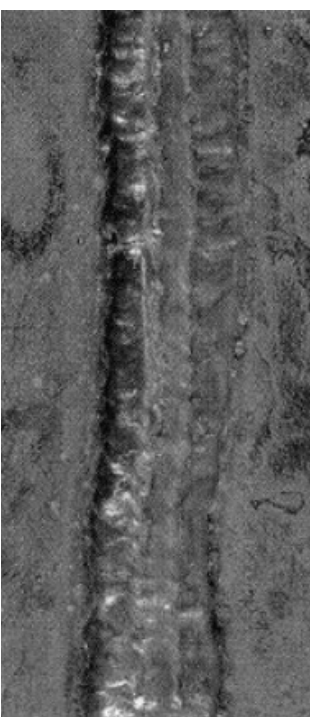
- Es una protuberancia de soldadura no fundida mas allá del borde o la raíz de la soldadura.

Causas

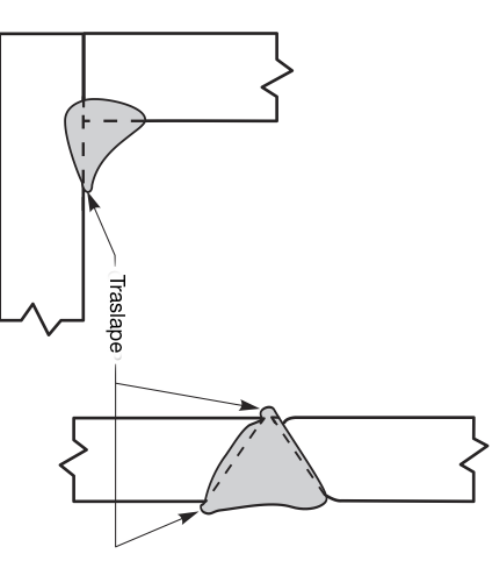
- Técnica de soldo inapropiada (manipulación incorrecta del electrodo, temperatura de soldo, bajas velocidades de soldo).
- Cantidades excesivas de material soldo.



(a) Traslape en soldadura de filete



(b) Traslape en soldadura de filete



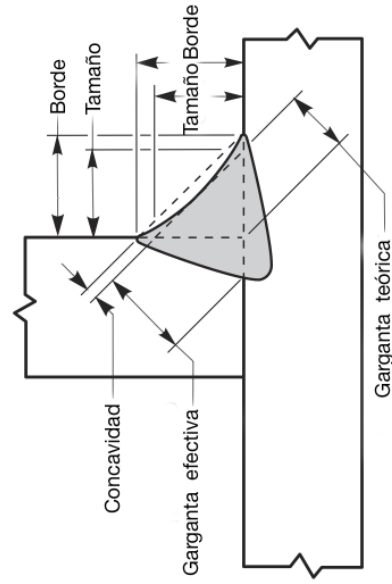
(c) Esquema típico de traslape en soldadura

Figura 10.

Traslape

Fuente: American Welding Society, 2000

| Discontinuidad | Características | Causas |
|--|-----------------|--------|
| <p>Concavidad y refuerzo excesivo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ambas discontinuidades se refiere cuando el espesor o garganta de la soldadura excede la cantidad requerida para llenar la junta. • La concavidad se refiere a la soldadura de filete y el refuerzo excesivo a una soldadura a tope. | | |



(a) Esquema típico de concavidad en soldadura



(b) Concavidad en soldadura

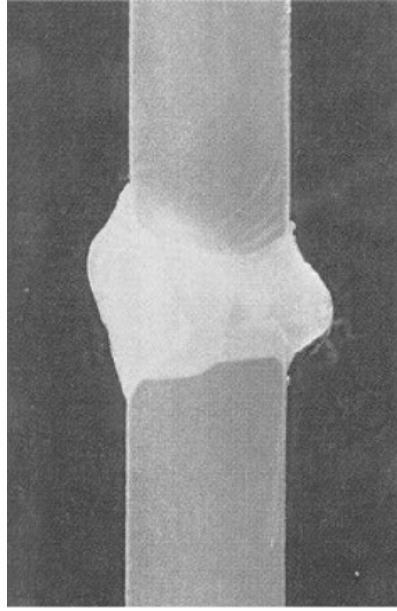


Figura 11. Concavidad y refuerzo excesivo

Fuente: American Welding Society, 2000

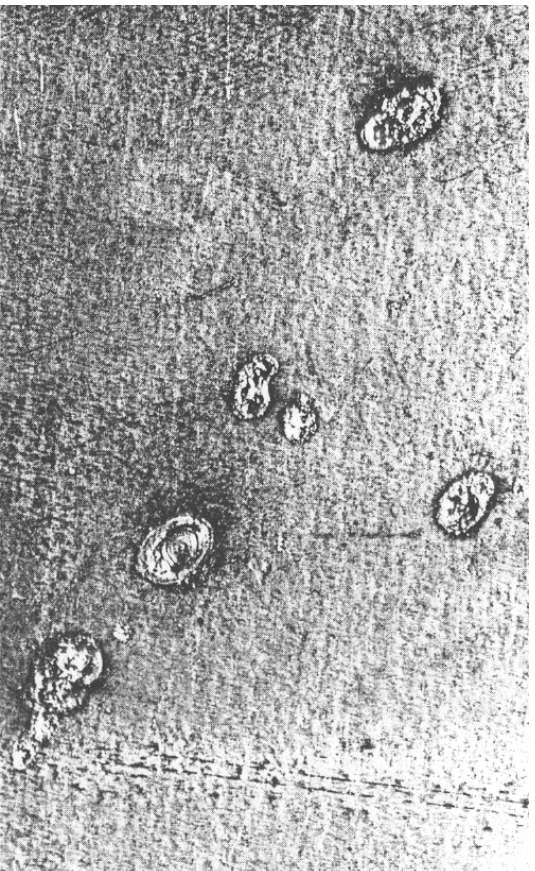
Discontinuidad

Características

Causas

Corte de arco

- Son generados cuando el arco es iniciado sobre la superficie del metal base fuera de la junta de la soldadura.
- Constituyen zonas de iniciación de grietas.
- Técnica de soldado Inapropiada.
- Conexiones inapropiadas de la puesta a tierra de la máquina de soldar.



(a) Cortes de arco



(b) Corte de arco

Figura 12.

Corte de arco

Fuente: American Welding Society, 2000

Discontinuidad

Características

Causas

- Son partículas de metal de soldadura que son expelidas durante el proceso y se adhieren a metal base.

Salpicaduras

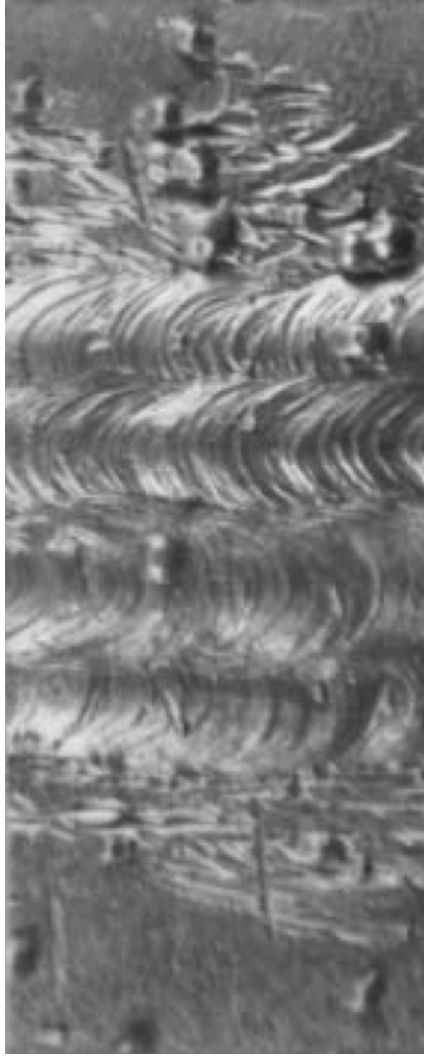
- Uso de altas corrientes de soldadura



(a) Grieta causada por una salpicadura



(b) Salpicadura excesiva



(c) Salpicadura

Figura 13. Salpicadura

Fuente: American Welding Society, 2000

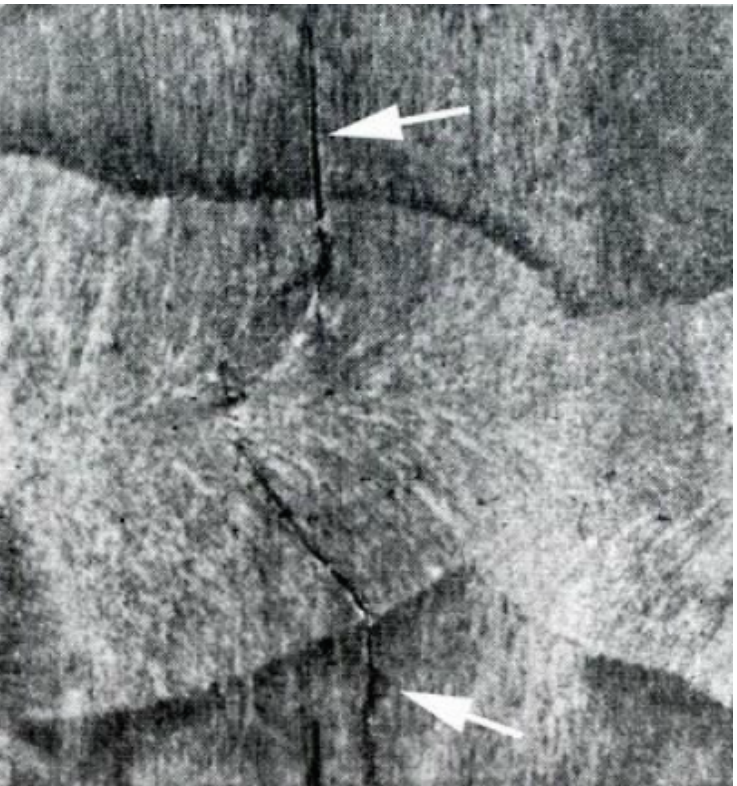
Discontinuidad

Características

Causas

- Es un defecto del metal base que resulta de la presencia de partículas no metálicas que aparecen en el acero cuando es producido.
- El problema que causa en la soldadura al ser detectado en el metal base, es que las mismas pueden propagarse desde las laminaciones y ocasionar grietas.
- Defectos de fabricación del metal base.

Laminación



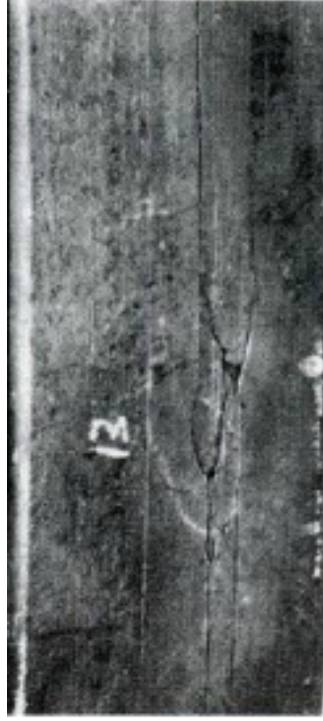
(a) Grieta en el metal base debido a la laminación

Figura 14. Laminación

(b) Laminaciones en la soldadura

Fuente: American Welding Society, 2000

| Discontinuidad | Características | Causas |
|----------------------------------|--|---|
| <p>Costuras y solapes</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Son defectos del metal base que difieren de la laminación, ya que aparecen en la superficie. • Aunque son defectos superficiales, los mismos solo se detectan luego de procesos como el doblado, laminado o el sand blasting. • Los problemas que pueden causar en la soldadura son grietas, porosidades o una combinación de ambas. | <ul style="list-style-type: none"> • Defectos de fabricación del metal base. |



(a) Grieta producto del costuras



(b) Solape en la superficie



(c) Grietas producto de costuras

Figura 15. Costuras y solapes

Fuente: American Welding Society, 2000

CRITERIOS DE SUPERVISIÓN

En el *Cuadro 4* se enumeran las discontinuidades a las que se debe prestar más atención de acuerdo con los criterios de aceptación contenidos en el Código de Soldadura Estructural de la AWS. Para que funcione como herramienta de supervisión, el cuadro antes mencionado debe estar acompañado con vistas de la estructura en

construcción, de manera que se pueda registrar la ubicación de las discontinuidades que se mencionan para poder realizar un seguimiento, razón por la cual en el *Cuadro 4* se le da una simbología a cada discontinuidad. En la *Figura 16*, se muestra un ejemplo de la utilización de la herramienta.

Cuadro 4. Criterios de aceptación para las discontinuidades en soldadura

| Discontinuidad | Aceptación | | Simbología |
|-------------------------------------|--|----------------------------|------------|
| Grietas | Inaceptable | | GR |
| Fusión incompleta | Inaceptable | | FI |
| Cráter en sección transversal | Inaceptable, excepto para entremos de soldaduras de filete | | CR |
| Soldaduras de filete de poco tamaño | Tamaño especificado (mm) | Disminución permitida (mm) | FP |
| | ≤ 5 | ≤ 2 | |
| | 6 | ≤ 2,5 | |
| | ≥ 8 | ≤ 3 | |
| Socavado | Espesor del metal (mm) | Socavado (mm) | SO |
| | < 25 | 1 | |
| | ≥ 25 | 2 | |
| Porosidad | No deberá tener porosidad visible | | PO |

Fuente: American Welding Society, 2010

CONTROL DE SOLDAURA

FECHA: 15/04/14

SIMBOLOGÍA

GR - GRIETAS

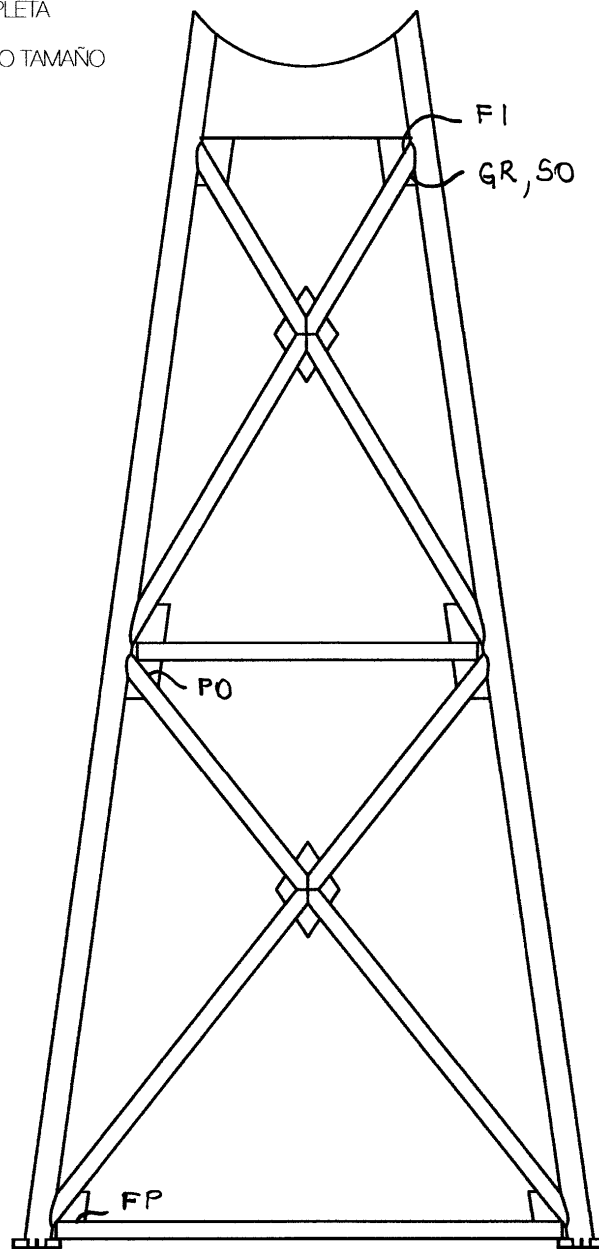
FI - FUSIÓN INCOMPLETA

CR - CRÁTER

FP - FILETE DE POCO TAMAÑO

SO - SOCAVADO

PO - POROSIDAD



VISTA NORTE (MARCO 1)

Figura 16. Ejemplo de la aplicación de la herramienta de supervisión para soldadura

Fuente: elaboración propia

PARTE C – SUPERVISIÓN DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS SOBRE SUPERFICIES METÁLICAS

RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS PARA TANQUES METÁLICOS

El término recubrimiento se refiere a todas las pinturas y productos que se usan para prevenir la corrosión en la superficie metálica, proporcionándole una protección por aislamiento del medio. A los recubrimientos anticorrosivos se les conoce como selladores, primarios, enlaces, acabados y productos especiales.

Generalmente, para cumplir con los requerimientos especificados, es necesario combinar diferentes tipos de recubrimientos con diferentes espesores de capa seca (expresados en mils), que aporten funciones específicas para la protección de la superficie. A este conjunto de recubrimientos aplicados en un orden establecido se le denomina "esquema de pintado". En el caso de tanques metálicos de agua potable, es usual utilizar un esquema interno compuesto por un primario (*EPOXI METAL PRIMER*) que tiene un gran poder de anclaje y penetración y un acabado (*EPOXI FINISH*) que le aporta una mayor protección para la corrosión. Al esquema externo se le adiciona otro acabado (esmalte de poliuretano) que le brinda las características de durabilidad,

resistencia al rayado y astillado y facilidad de lavado y limpiado.

| | |
|---------------------|----------------|
| Acabado (esmalte) | 3,0 – 3,5 mils |
| Acabado (epóxico) | 3,0 – 4,0 mils |
| Primario (epóxico) | 3,0 – 4,0 mils |
| Superficie metálica | |

Figura 17. Esquema de pintado externo típico para tanques metálicos

Fuente: elaboración propia.

PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE

Para garantizar la correcta aplicación del recubrimiento, es indispensable preparar de manera adecuada la superficie. Los métodos generalmente empleados para este efectos son: limpieza química, limpieza por abrasión y limpieza manual. Sin embargo, debido al alcance de este manual y a que es el proceso más utilizado en sitio, solo se hará referencia a la limpieza manual, cuyas etapas de muestran en el *Cuadro 5*. Es importante mencionar que algunas de las etapas que se mencionan pueden ser modificadas o eliminadas de acuerdo con las condiciones y especificaciones de cada obra y la superficie sobre la que se esté aplicando (ya sea metálica o una capa de pintura previa). Además, algunas de las etapas que se mencionan pueden ser realizadas con herramientas neumáticas o eléctricas.

Cuadro 5. Etapas del método de limpieza manual

| Etapas | Descripción |
|------------------------------|---|
| Descostrado | <ul style="list-style-type: none">Se realiza con la ayuda de mazos, martillos, cinceles y piquetas con las que se removerán todas las costras de sólidos y escamas en la superficie metálica y escorias en la superficie de las soldaduras. |
| Lavado | <ul style="list-style-type: none">Se realiza mediante el uso de solvente o detergentes que eliminarán toda clase de materias extrañas (como aceites, grasas, tierra). |
| Raspado | <ul style="list-style-type: none">Se realiza mediante el uso de una espátula, con la que se eliminarán toda clase de materias extrañas. |
| Cepillado | <ul style="list-style-type: none">Se realiza con un cepillo de alambre de acero que se frota contra la superficie hasta que desaparece toda clase de óxido, pintura u otras materias extrañas. |
| Lijado | <ul style="list-style-type: none">Se realiza con lija, para desprender todo el óxido, pintura u otras materias extrañas que no se han removido en las etapas anteriores.Es una etapa importante, ya que con ella se obtiene un perfil de anclaje adecuado. |
| Eliminación del polvo | <ul style="list-style-type: none">Para eliminar las partículas de polvo, la superficie se debe limpiar con brochas de cerdas o cepillos.Esta operación también se puede realizar con un compresor, que expulse un chorro de aire seco y limpio. |

Fuente: Nervion Pinturas

En cuanto al aspecto, se considera que la superficie esta limpia o preparada para recubrirse cuando solo presente restos de óxido o pintura bien adheridos y que no haya huellas de grasa, aceite u otras sustancias. Es importante anotar, que para aceptar una superficie es necesario compararla con un área previamente seleccionada como patrón y representativa de las condiciones generales deseadas.

APLICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO

Una vez terminada la limpieza de las superficie se debe proceder con la aplicación de los recubrimientos, que generalmente en estructuras metálicas se puede realizar mediante dos métodos: con brocha de pelo

y rodillo y con aspersión. El primero se utiliza cuando se requiera una gran humectación de la superficie o cuando las condiciones de trabajo así lo requieran (como acceso limitado). En cuanto a la aspersión, se utiliza cuando se requiere que el espesor de las películas o capas resultantes sea uniforme y se busca que el tiempo de aplicación sea más rápido.

Es importante acotar que el recubrimiento nunca debe ser aplicado sobre superficies húmedas, por lo que el procedimiento debe ser suspendido en condiciones de humedad relativa mayores al 90% y cuando la temperatura ambiente sea menor a 10°C. También se debe tomar en cuenta que la mezcla tiene un tiempo de vida

(que depende de la temperatura ambiente y la humedad relativa), por lo que se debe procurar preparar únicamente la cantidad de mezcla que sea necesaria y de acuerdo con lo que especifica el fabricante.

debe realizar antes, durante y después de la aplicación del recubrimiento.

RECOMENDACIONES DE SUPERVISIÓN ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO

DISCONTINUIDADES EN RECUBRIMIENTOS

En las fichas que se muestran a continuación, se enumeran los principales tipos de discontinuidades que se encuentran en los recubrimientos, especificando sus características y las causas.

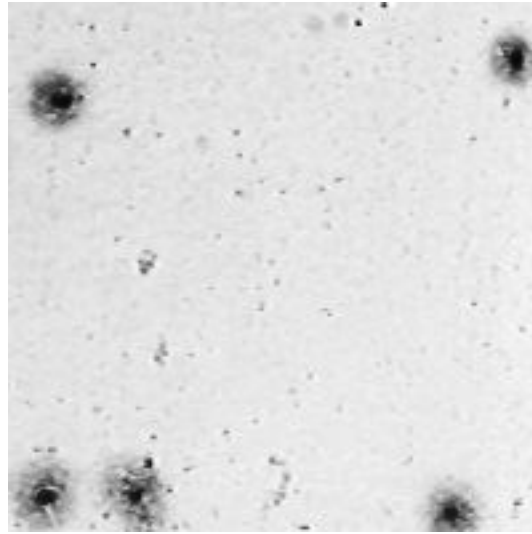
En el *Cuadro 6* se enumeran algunas recomendaciones básicas que el supervisor

Cuadro 6. Recomendaciones antes, durante y después de la aplicación del recubrimiento

| | |
|----------------|--|
| Antes | <ul style="list-style-type: none"> • Revisar los planos y las especificaciones técnicas del proyecto. • Establecer esquema de pintado. • Revisar las especificaciones en las hojas técnicas de los productos. • Establecer puntos de supervisión durante el proceso de pintado. • Realizar una revisión del equipo de aplicación y de las condiciones de su uso. • Verificar que la preparación de la superficie sea adecuada. • Verificar que se protejan todos aquellos elementos adyacentes a las superficies a ser pintadas. |
| Durante | <ul style="list-style-type: none"> • Revisar las temperatura del metal base. • Verificar que la superficie del metal base se encuentre libre de humedad. • Verificar que la temperatura ambiente y humedad relativa sean las adecuadas tanto para la aplicación de las capas como para su secado. • Procurar que el recubrimiento que se esté aplicando se encuentre dentro del tiempo de vida de la mezcla. • Revisar que el procedimiento de pintado se está llevando a cabo de acuerdo con el esquema de pintado. • Verificar que se cumplan los tiempos de secado para el repinte. |
| Después | <ul style="list-style-type: none"> • Examinar si existen discontinuidades en las superficie de la capa de recubrimiento. • Verificar que los espesores de las capas estén de acuerdo con las especificaciones y el esquema de pintado. • Subsanan los defectos que se encuentren en la superficie. • Verificar que los elementos adyacentes a las superficies pintadas se encuentren limpios. |

Fuente: elaboración propia

| Discontinuidad | Características | Causas |
|--|---|--|
| Discontinuidades de la película | <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="341 420 406 1155">• Se da cuando la corrosión se presenta en puntos de oxidación, debido a la presencia de poros en la capa del recubrimiento. | <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="406 1155 430 1929">• Mala calidad del producto. <li data-bbox="430 1155 454 1929">• Inadecuada formulación del producto. <li data-bbox="454 1155 479 1929">• Uso de solventes inadecuados. <li data-bbox="479 1155 503 1929">• Inapropiada aplicación con pistola de aire. |



(a) Corrosión en pintura causada por discontinuidades en la película



(b) Corrosión en pintura causada por discontinuidades en la película

Figura 17. Discontinuidades de la película

Fuente: Navión Pinturas

Discontinuidad

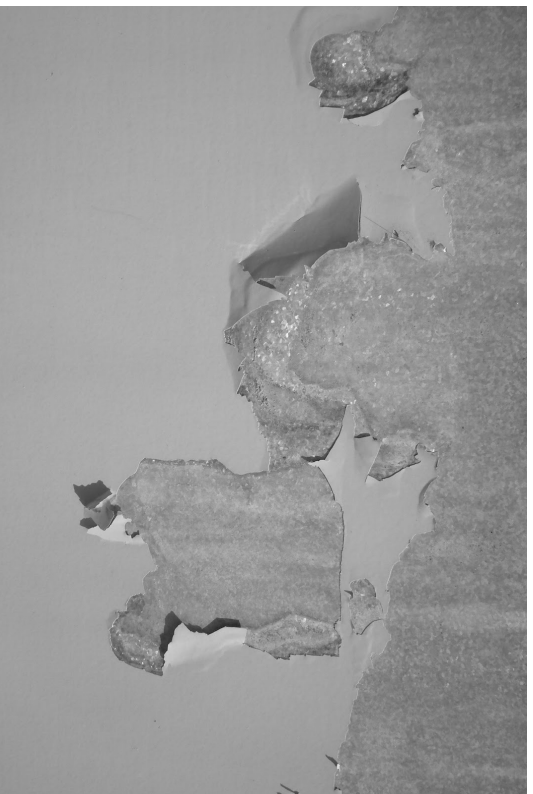
Características

- Se da al no ocurrir atracción molecular o unión mecánica entre la superficie metálica y la capa del recubrimiento, por lo que la película se desprende fácilmente.

Causas

- Recubrimientos primarios inadecuados para la superficie metálica (incompatibilidad de recubrimientos y solventes).
 - Inadecuada formulación del producto.
 - El tiempo de secado excede el especificado.
 - Presencia de humedad o contaminación entre capas.
-

Falta de adhesión



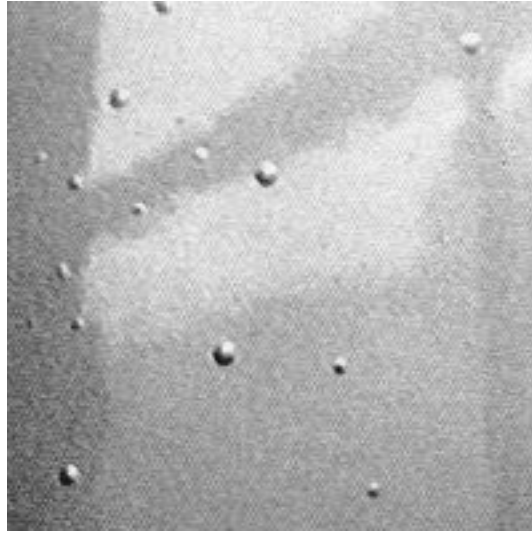
(b) Falta de adhesión



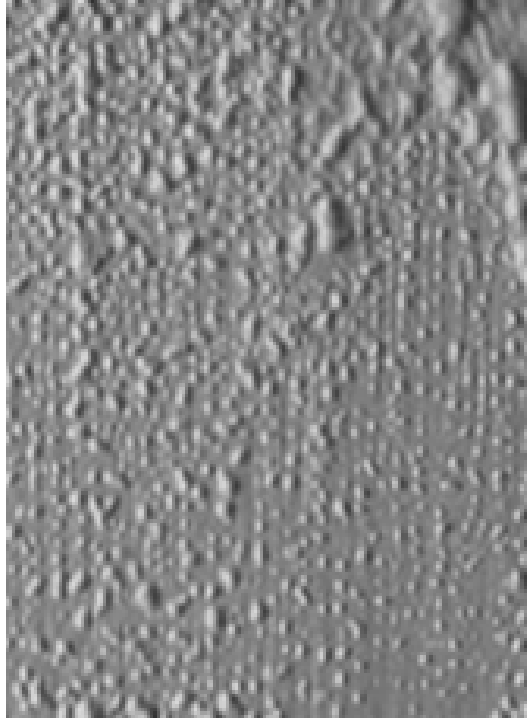
(b) Corrosión causada por falta de adhesión

Fuente: Navión Pinturas

| Discontinuidad | Características | Causas |
|----------------------|---|---|
| Ampollamiento | <ul style="list-style-type: none"> • Se da por el entrapamiento de solventes, gases o líquidos en la película o bajo la misma. | <ul style="list-style-type: none"> • Inadecuada preparación de la superficie. • Recubrimientos expuestos a ambientes húmedos. • El recubrimiento superficial seca con mayor rapidez que la especificada. |



(a) Ampollamiento en una película



(b) Ampollamiento en una película

Figura 19. Ampollamiento

Fuente: Nevión Pinturas

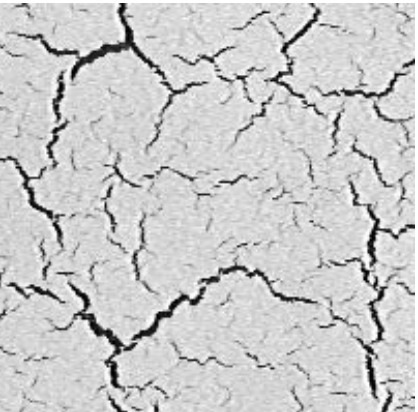
Discontinuidad

Características

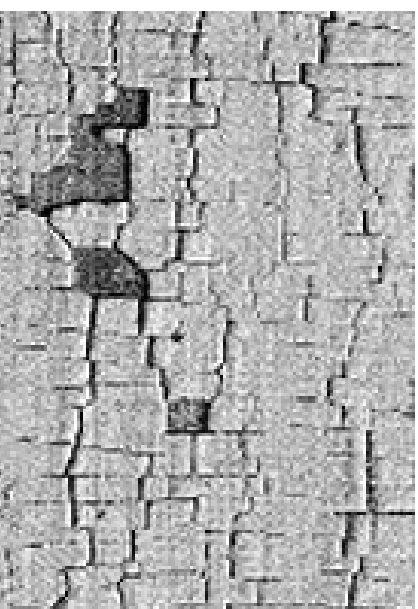
Causas

Grietas

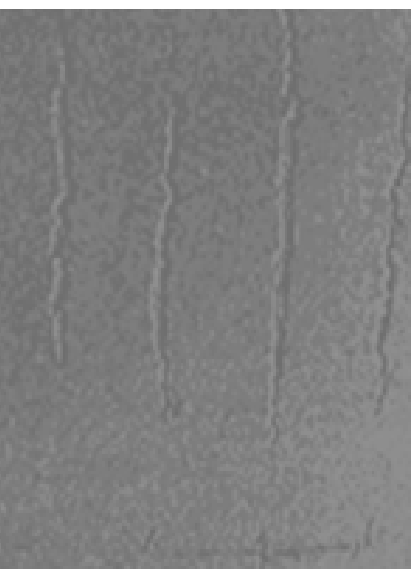
- Se da cuando lo esfuerzos aplicados sobre el recubrimiento excede la flexibilidad y adhesión de las capas.
- El recubrimiento utilizado está mal especificado para las condiciones de servicio.



(a) Pintura agrietada



(b) Piel de cocodrilo



(c) Cuarteado

Figura 20. Grietas

Fuente: Nervion Pinturas

| Discontinuidad | Características | Causas |
|----------------|--|---|
| Corrugado | <ul style="list-style-type: none"> • Se presenta en recubrimientos aplicados en capas gruesas que se secan rápidamente. | <ul style="list-style-type: none"> • Condiciones de secado inapropiadas. • Exceso de agentes secantes en la superficie. |

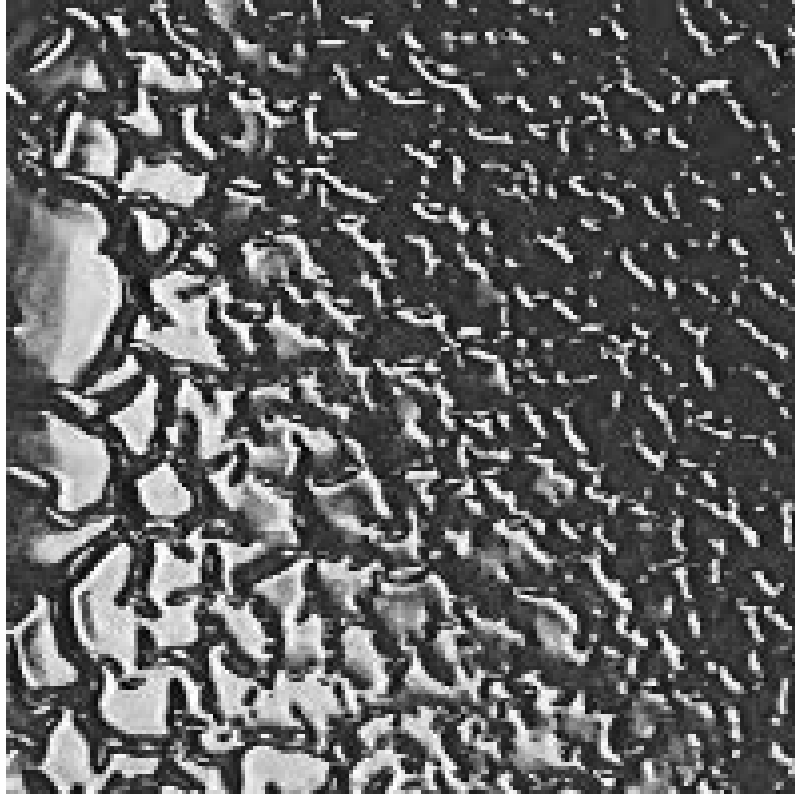


Figura 21. Corrugado

Fuente: Nervión Pinturas

Discontinuidad**Características****Causas**

Caléo

- Es la flotación de polvo sobre la superficie del recubrimiento, ocasionado por la degradación de la resina debido a la acción combinada de los rayos solares y el oxígeno.
 - El recubrimiento utilizado está mal especificado para las condiciones de servicio.
-



Figura 22. Caléo

Fuente: Navión Pinturas

| Discontinuidad | Características | Causas |
|--|---|--------|
| <p>Corrosión bajo la película</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ataca al metal debajo de la película. • Se presenta en dos formas: granular (áreas granuladas e irregulares) y filiforme (aspecto de filamento). | <ul style="list-style-type: none"> • Inadecuada preparación de la superficie. • Porosidad en las capas. • Permeabilidad del recubrimiento. • Falta de adherencia. | |

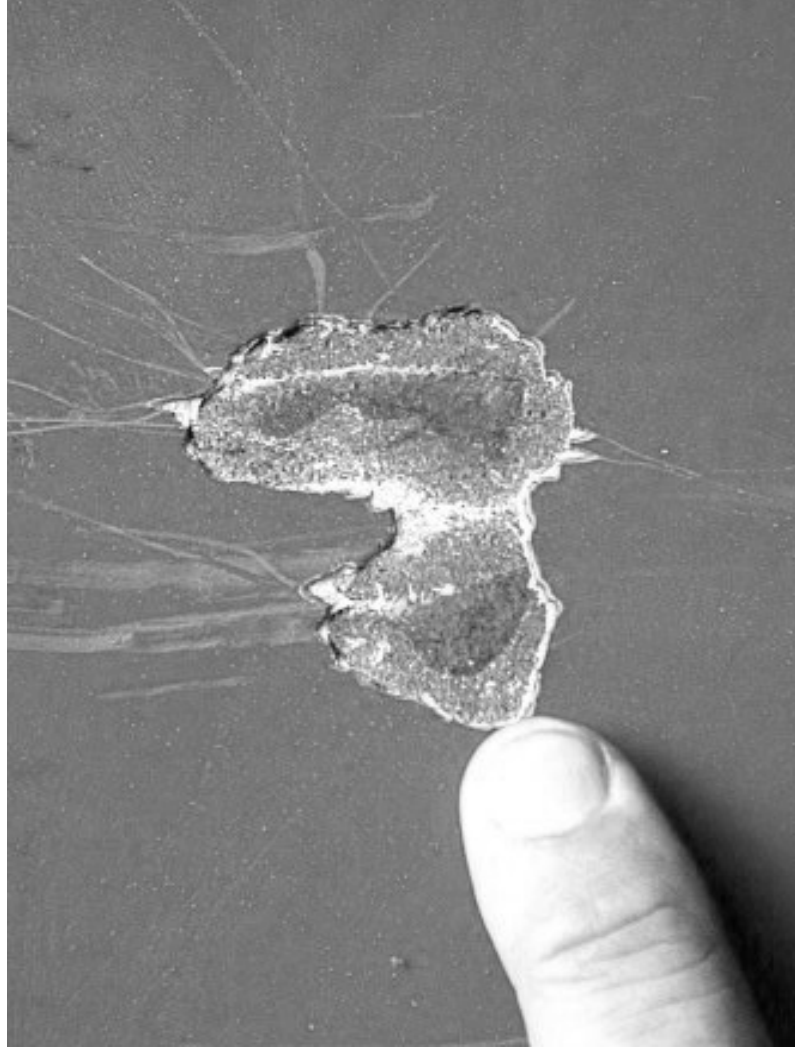


Figura 23. Corrosión bajo la película
Fuente: Nevión Pinturas

CRITERIOS DE SUPERVISIÓN

En el *Cuadro 7* se enumeran las discontinuidades a las que se debe prestar más atención. Para que funcione como herramienta de supervisión, el cuadro antes mencionado debe estar acompañado con vistas de la estructura en construcción, de manera que se pueda registrar la ubicación

de las discontinuidades que se mencionan para poder realizar un seguimiento, razón por la cual en el *Cuadro 7* se le da una simbología a cada discontinuidad. En la *Figura 24*, se muestra un ejemplo de la utilización de la herramienta.

Cuadro 7. Criterios de aceptación para las discontinuidades en soldadura

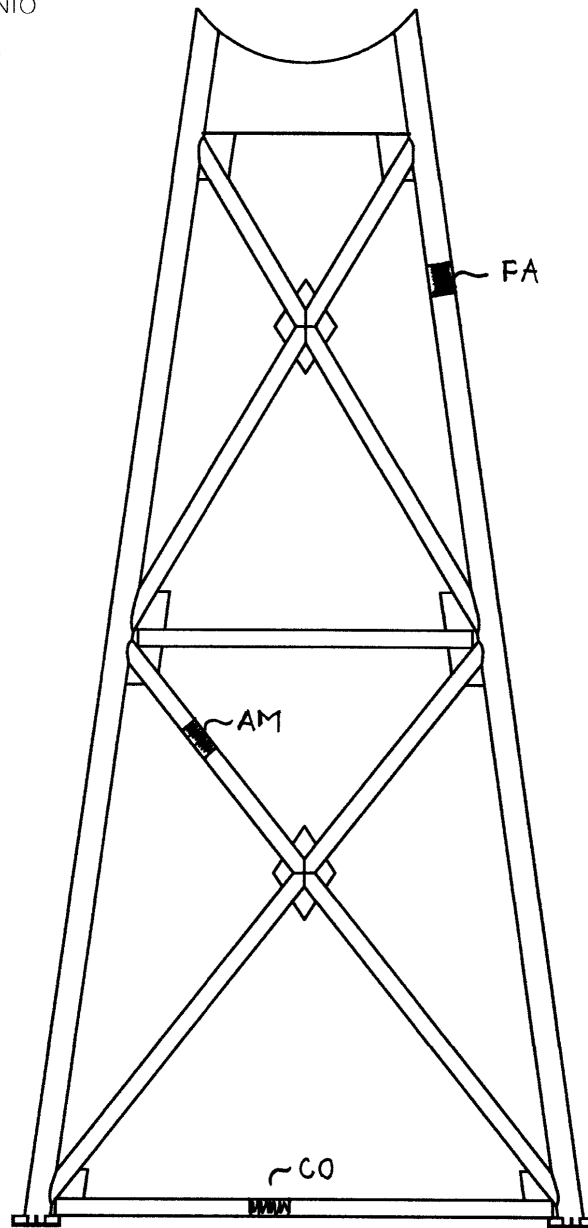
| Discontinuidad | Aceptación | Simbología |
|--------------------------|-------------------|-------------------|
| Falta de adhesión | Inaceptable | FA |
| Ampollamiento | Inaceptable | AM |
| Grietas | Inaceptable | GR |
| Corrugado | Inaceptable | CO |
| Caléo | Inaceptable | CA |

Fuente: American Welding Society, 2010

CONTROL DE PINTURA

FECHA: 25/04/14

SIMBOLOGÍA
FA - FALTA DE ADHESIÓN
AM - AMPOLLAMIENTO
GR - GRIETAS
CO - CORRUGADO
CA - CALÉO



VISTA NORTE (MARCO 1)

Figura 24. Ejemplo de la aplicación de la herramienta de supervisión en la aplicación de revestimientos

Fuente: elaboración propia

BIBLIOGRAFÍA

- Agüero Mauricio, A. R. (2009). *Geometría de las juntas de soldadura y simbología de soldadura*. Recuperado el 14 de abril de 2014, de *dingenieria*: <http://dingenieria.pbworks.com/f/Modulo04.1%20-%20Geometria%20de%20las%20juntas%20y%20simbologia.pdf>
- American Welding Society. (11 de marzo de 2010). AWS D1.1/D1.1M:2010 . "Código de Soldadura Estructural – Acero" , 22. (C. D. Estructural, Ed.) Miami, Florida, Estados Unidos de América.
- American Welding Society. (7 de enero de 2000). AWS B1.11:2000. "Guide for the Visual Examination of Welds" . (C. d. AWS, Ed.) Estados Unidos de América.
- Cámara Chilena de la Construcción. (10 de marzo de 2014). *Manual de Pinturas y Revestimientos*. Recuperado el 2014, de Cámara Chilena de la Construcción: http://www.cchc.cl/wp-content/uploads/2011/03/Manual-de-Pinturas-y-Revestimientos_CChC.pdf
- Lincoln Electric. (s.f.). *Soldeo Manual con Electroodos Revestidos (SMAW)*. Recuperado el 14 de abril de 2014, de <http://solysol.com.es/data/documents/soldadura=20electrodo=20rec.doc.pdf>
- Nervion Pinturas. (s.f.). *Preparación, aplicación e inspección de los recubrimientos*. Recuperado el 14 de abril de 2014, de NERVION: <http://www.nervion.com.mx/web/conocimientos/prepalinsp.php>
- Ruiz, A. (s.f.). *Discontinuidades del metal base y de la soldadura*. Recuperado el 14 de abril de 2014, de Wikimedia: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/3._Discontinuidades_en_Metal_Base_y_Soldadura.pdf

PROTOCOLO DE INSPECCIÓN

TANQUE DE ALMACENAMIENTO
ELEVADO DE AGUA DE 250 M³

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| GENERALIDADES | 3 |
| APLICACIÓN | 3 |
| ALCANCE | 3 |
| DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA | 4 |
| DESCRIPCIÓN GENERAL | 4 |
| UNIONES | 5 |
| SISTEMA DE PINTURA | 5 |
| TIPOS DE INSPECCIÓN | 6 |
| INSPECCIÓN INICIAL | 6 |
| INSPECCIÓN DE ACTUALIZACIÓN | 6 |
| INSPECCIÓN PERIÓDICA | 6 |
| INSPECCIÓN PERIÓDICA | 7 |
| INSPECCIÓN ANTE UN EVENTO | 10 |
| APÉNDICE A – PROTOCOLO DE INSPECCIÓN PERIÓDICA | 11 |
| ANEXO A – ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA PINTURA | 16 |
| BIBLIOGRAFÍA | 17 |

GENERALIDADES

APLICACIÓN

La información contenida en este documento aplica para las labores y responsabilidades de la persona designada para la inspección periódica del tanque de almacenamiento, el operador del sistema de agua potable. Este documento le proporcionará las directrices generales para la inspección de los diferentes elementos que conforman dicho tanque.

ALCANCE

Este documento proporciona esencialmente la herramienta necesaria para la inspección periódica del tanque de almacenamiento, además de brindar una descripción general de la estructura, los tipos de inspección necesarios y los intervalos máximos de ejecución, así como una descripción de los principales aspectos que deben ser inspeccionados periódicamente. Además, se indican los elementos que deben ser sometidos a inspección ante un evento sísmico.

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

DESCRIPCIÓN GENERAL

El tanque de almacenamiento que se muestra en la *Figura 1*, es un depósito elevado con forma cilíndrica horizontal. La estructura es totalmente metálica y consta de un cilindro de 3,50 m de diámetro y 26,75 m de largo con una estructura interna que le

brinda rigidez, además de una estructura de soporte compuesta por seis marcos de 15,50 m de altura arriostrados lateralmente. Los materiales que lo componen se describen en el *Cuadro 1*.

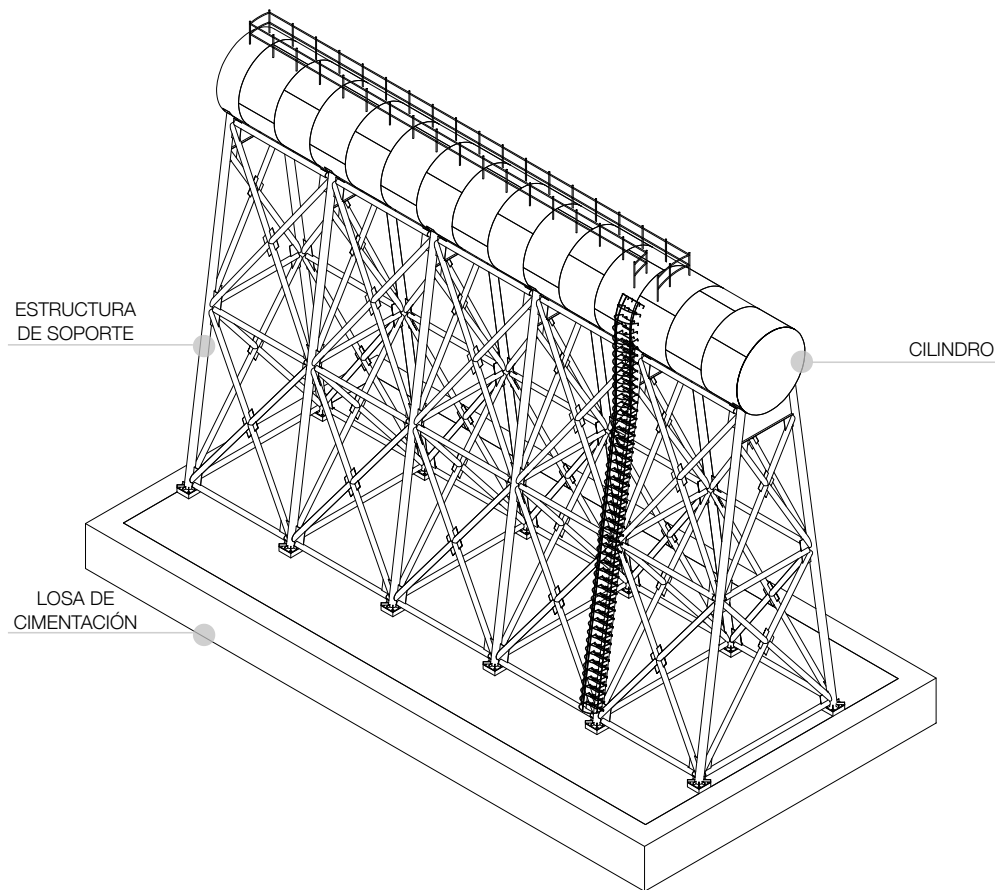


Figura 1. Vista general del tanque de almacenamiento

Fuente: elaboración propia

Cuadro 1. Materiales del tanque de almacenamiento

| Descripción | Especificación |
|---|------------------------------|
| Tubo estructural redondo | ASTM A500 GRADO B |
| Platinas, placas base, láminas de acero y angulares | ASTM A36 |
| Barandas y escaleras | ASTM A53 GRADO B |
| Concreto de losa de cimentación y pedestales | $F'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ |

Fuente: elaboración propia

UNIONES

Todas las uniones son soldadas, utilizado soldadura E60-13 para elementos con espesor menor o igual que 6,36 5 mm y soldadura E70-18 para elementos con un espesor mayor que 6,35 mm.

SISTEMA DE PINTURA

En las figuras que se presentan a continuación, se muestran los esquemas de pintura interno y externo utilizados en el tanque. Las fichas técnicas de la pintura se muestran en el Anexo A.

| | |
|---------------------|----------------|
| Corro Epoxy 720/721 | 3,0 – 4,0 mils |
| Corro Rust 210/211 | 3,0 – 4,0 mils |
| Superficie metálica | |

Figura 1. Esquema de pintado externo

Fuente: elaboración propia.

| | |
|-----------------------|----------------|
| Corro Thane 2250/2260 | 3,0 – 3,5 mils |
| Corro Epoxy 720/721 | 3,0 – 4,0 mils |
| Corro Rust 210/211 | 3,0 – 4,0 mils |
| Superficie metálica | |

Figura 2. Esquema de pintado externo

Fuente: elaboración propia.

TIPOS DE INSPECCIÓN

INSPECCIÓN INICIAL

La inspección inicial es una evaluación realizada a toda la estructura para determinar la condición estructural, sanitaria, de seguridad y del recubrimiento del tanque al inicio de su vida útil. Se recomienda que sea realizada por un profesional familiarizado con el diseño y mantenimiento de tanques de almacenamiento de agua potable, ya que es la inspección más detallada e intensiva.

El informe obtenido debe ser detallado y debe contener imágenes que registren las condiciones iniciales del tanque.

INSPECCIÓN DE ACTUALIZACIÓN

La inspección de actualización se debe realizar cada 3 o 5 años después de la inspección inicial. Esta inspección se realiza para monitorear cambios en la condición del recubrimiento y la tasa de corrosión y verificar que las condiciones del tanque no hayan cambiado significativamente desde la evaluación previa o la rehabilitación. Al igual que en la inspección inicial, se recomienda que sea realizada por un profesional familiarizado con el diseño y mantenimiento de tanques de almacenamiento de agua potable, aunque la inspección no es tan exhaustiva como la inicial.

La importancia de contar con una evaluación inicial y las subsecuentes evaluaciones de actualización realizadas por un profesional, es que con ellas se podrá identificar el tiempo óptimo para realizar reparaciones y el repinte del tanque. Es decir, con las evaluaciones se podrán identificar las acciones necesarias para garantizar el mantenimiento adecuado del tanque.

INSPECCIÓN PERIÓDICA

La inspección periódica es una evaluación superficial del tanque que se realiza para identificar todas aquellas situaciones que pueden ser fácilmente remediadas y para indicar aquellas que necesitan de una evaluación profesional. Esta inspección debe realizarse mínimo una vez al año y es generalmente realizada por el personal encargado de operar el sistema.

La importancia de realizar una inspección periódica es que cualquier cambio significativo que pueda requerir una evaluación profesional, como fugas potenciales o pérdida de sección en los pernos de anclaje, pueden ser identificados por el operador. Además, se puede realizar mantenimiento preventivo que puede ahorrar los costos de remplazara algún elemento o reparaciones en la siguiente rehabilitación de la estructura.

INSPECCIÓN PERIÓDICA

En el cuadro que se muestra a continuación, se enuncian algunos de los aspectos que deben ser inspeccionados periódicamente y algunas de las acciones con respecto a

reparaciones. En el *Apéndice A* se muestra el protocolo para la aplicación de la inspección periódica.

Cuadro 2. Aspectos sometidos a inspección periódica

| Descripción | Inspección | Acciones |
|-------------------------|---|--|
| Acceso al sitio | <ul style="list-style-type: none"> • Monitorear los signos de acceso sin autorización al sitio del tanque, que pueden incluir: <ul style="list-style-type: none"> ○ Daños al tanque (como golpes). ○ Grafitis en el tanque o en las cercanías en el sitio. ○ Marcas en la pintura debido al lanzamiento de objetos. ○ Hoyos producidos por balas u otros daños producidos por el disparo de armas en el tanque. • Ubicar daños en los cerramientos perimetrales y portones de acceso | <ul style="list-style-type: none"> • Colocar alambre de púas sobre el cerramiento perimetral. • Proporcionar mantenimiento adecuado al cerramiento perimetral, reparando cualquier hueco, cables rotos y secciones dobladas que se encuentren. • Asegurar que los portones de acceso se encuentren cerrados y en buen estado. |
| Mantenimiento del sitio | <ul style="list-style-type: none"> • Identificar si existe vegetación que toque la cimentación o la estructura metálica, ya que el follaje al estar en contacto con el acero atrapa humedad que puede acelerar la corrosión. • Verificar las zonas donde se encuentren recortes de césped u otro tipo de desperdicio. • Verificar las zonas donde se encuentre agua empozada. | <ul style="list-style-type: none"> • Recortar la vegetación para prevenir que toquen las cimentaciones, placas de base y el tanque. • Remover cualquier desecho que se encuentre cerca de las cimentaciones o placas de base. |

Cuadro 1. Continuación

| Descripción | Inspección | Acciones |
|--------------------------|--|--|
| Cimentación | <ul style="list-style-type: none"> • Verificar que la cimentación se proyecta de 15 a 30 cm por encima del nivel del relleno perimetral y existe un drenaje adecuado lejos de la cimentación. • Examinar la cimentación en busca de signos de asentamientos. • Inspeccionar el concreto en busca de evidencia de agrietamiento, astillamiento o acero de refuerzo expuesto. • Si se encuentran grietas profundas o desmoronamiento extenso, se debe realizar una evaluación profesional. | <ul style="list-style-type: none"> • Aplicar concreto expansivo en las cimentaciones deterioradas o vacíos encontrados para volver la superficie a su contorno original. Sin embargo, se debe realizar un monitoreo de las reparaciones. |
| Pedestales y placas base | <ul style="list-style-type: none"> • Verificar la condición del concreto en busca de cualquier grieta, vacíos o deterioro. Esto puede provocar corrosión en la interface. • Verificar los signos de corrosión superficial en las placas base. • Inspeccionar los pernos de anclaje en busca de signos de corrosión o pérdida de sección. Se debe medir y anotar el diámetro y compararlo con el inicial. • Si alguno de los pernos se ha deteriorado en más de la profundidad de la rosca o están doblados o dañados, se debe realizar una evaluación profesional. | <ul style="list-style-type: none"> • Aplicar sellador a cualquier área deteriorada o vacíos para impedir el ingreso de humedad. Sin embargo, se debe realizar un monitoreo de las reparaciones. • Se debe asegurar que se encuentren libres de vegetación, zacate o cualquier desecho. |
| Accesos al cilindro | <ul style="list-style-type: none"> • Verificar que los accesos al cilindro se encuentren asegurados para prevenir cualquier ingreso no autorizado. | <ul style="list-style-type: none"> • Instalar y reparar las cerraduras en los accesos. |

Cuadro 1. Continuación

| Descripción | Inspección | Acciones |
|---|--|--|
| Tuberías de ventilación, rebalse, limpieza y distribución | <ul style="list-style-type: none"> • Evaluar el estado de las mallas de la tubería de ventilación para asegurar que son adecuados para prevenir el ingreso de insectos, polvo o cualquier desecho. • Evaluar el estado de las mallas de la tubería de rebalse para asegurar que son adecuadas para prevenir el ingreso de insectos, polvo o cualquier desecho. • Verificar que ninguna de la tuberías presente alguna obstrucción o fuga. • Revisar la condición de las llaves en las tuberías de limpieza y distribución. | <ul style="list-style-type: none"> • Reemplazar las mallas que estén dañadas. • Eliminar cualquier tipo de obstrucción que se presenten en las tuberías. • Reparar las fugas que se presenten en las tuberías y en las llaves de estas. |
| Escaleras | <ul style="list-style-type: none"> • Verificar el estado de los elementos de la escalera por signos de corrosión y pérdida de sección. • Revisar que los elementos de la escalera estén completos. • Evaluar el estado de las uniones soldadas de la escalera por signos de agrietamiento. | <ul style="list-style-type: none"> • Reparar los elementos deteriorados. |
| Exterior del tanque | <ul style="list-style-type: none"> • Monitorear la condición general del recubrimiento (pintura) externa en busca de cualquier evidencia de corrosión. Si la pintura externa se encuentra en mal estado, la interna puede estar en igual o peores condiciones. • Detectar signos de fugas o líneas de óxido que una fuga pudo haber causado, especialmente en las juntas y uniones de las placas del cilindro, ya que son los sitios más comunes para la aparición de estos defectos. • Verificar la soldadura en busca de grietas u otras condiciones que impliquen falla. | |

Fuente: Meier, 2010

INSPECCIÓN ANTE UN EVENTO

Inmediatamente después de un evento (como un tornado, huracán, una ventisca o un terremoto), se debe realizar una evaluación para determinar cualquier daño posible. Si el daño es evidente, se debe realizar una evaluación de la condición estructural del tanque por parte de un ingeniero estructural. Para este efecto, es necesario contar con planos de taller, memorias de cálculo, especificaciones, planos "as-built" o cualquier otra documentación que permita realizar un informe que describa las observaciones y recomendaciones para el reemplazo o reacondicionamiento de aquellas zonas que así lo ameriten.

Costa Rica es un país con una actividad sísmica y volcánica constante en el territorio. Su posición en el llamado Cinturón de Fuego del Pacífico y el choque entre las

placas Cocos y Caribe colocan al país en una condición altamente vulnerable. Por esta razón, en la figura que se muestra a continuación se señalan los elementos de la estructura metálica que deben ser inspeccionados después de un evento sísmico, obtenidos como resultado de un análisis sísmico dinámico realizado.

Es importante mencionar que de los elementos señalados en el esquema, se debe prestar especial atención a las placas circulares que conforman las tapas del cilindro, ya que la probabilidad de falla es alta, debido a que son las que amortiguan el movimiento oscilatorio del agua dentro del cilindro. De la misma manera, se deben inspeccionar todas las uniones soldadas que se encuentren cercanas a los elementos señalados en el esquema.

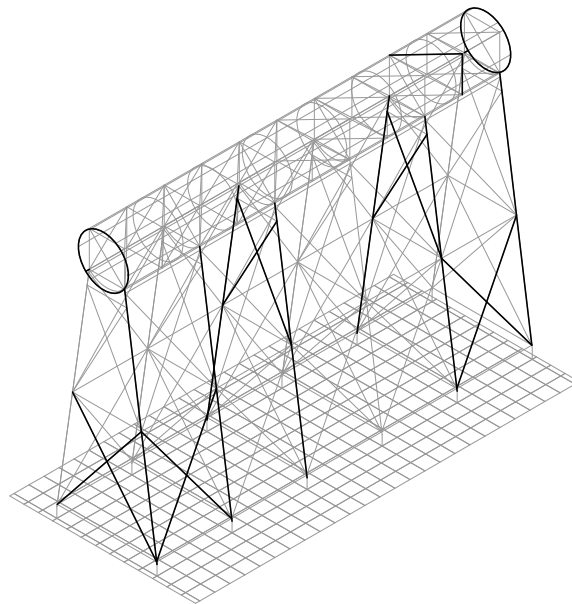


Figura 3. Esquema de los puntos críticos más característicos de la estructura ante un evento sísmico

Fuente: elaboración propia

APÉNDICE A – PROTOCOLO DE INSPECCIÓN PERIÓDICA

PROTOCOLO DE INSPECCIÓN PERIÓDICA PARA TANQUE ELEVADO DE ALMACENAMIENTO DE AGUA POTABLE

Este protocolo es de uso rutinario del operador del sistema de agua y deberá ser llenado de forma semestral.

En la columna de observaciones, el operador deberá señalar el estado del problema encontrado. Además, se deberán incluir fotografías que describan el estado de la estructura.

| A. INFORMACIÓN GENERAL | |
|-----------------------------------|--------|
| No. de inspección: | Fecha: |
| Descripción: | |
| Fecha del último repinte externo: | |
| Fecha del último repinte interno: | |
| Realizado por: | |
| Firma: | |

| B. ACCESO Y MANTENIMIENTO | RESPUESTA | | DESCRIPCIÓN |
|--|------------------|----|--------------------|
| ¿Existen golpes en la estructura de soporte? | SÍ | NO | |
| ¿Existen golpes en el cilindro? | SÍ | NO | |
| ¿Existen grafitis en el tanque? | SÍ | NO | |
| ¿Existen marcas en la pintura debido al lanzamiento de objetos? | SÍ | NO | |
| ¿Existen hoyos o marcas producidos por el disparo de un arma? | SÍ | NO | |
| ¿Existen daños en el cerramiento perimetral y portones de acceso? | SÍ | NO | |
| ¿Existen vegetación u otros desperdicios en la cimentación? | SÍ | NO | |
| ¿Existen vegetación tocando la estructura metálica? | SÍ | NO | |
| ¿Existen zonas en donde se empoza el agua cerca de la cimentación? | SÍ | NO | |

| C. LOSA DE CIMENTACIÓN | RESPUESTA | | DESCRIPCIÓN |
|--|------------------|----|--------------------|
| ¿Existen asentamientos? | SÍ | NO | |
| ¿Existe agrietamiento? | SÍ | NO | |
| ¿Existen astillamientos? | SÍ | NO | |
| ¿Existen zonas donde el acero de refuerzo está expuesto? | SÍ | NO | |
| ¿Existe algún otro tipo de deterioro? | SÍ | NO | |

| D. PEDESTALES Y PLACAS BASE | RESPUESTA | | DESCRIPCIÓN |
|---|------------------|----|--------------------|
| ¿Existe agrietamiento en los pedestales? | SÍ | NO | |
| ¿Existe algún otro tipo de deterioro en los pedestales? | SÍ | NO | |
| ¿Existe corrosión superficial en las placas base? | SÍ | NO | |
| ¿Existe agrietamiento en la soldadura de las placas base? | SÍ | NO | |
| ¿Existe corrosión superficial en los pernos de anclaje? | SÍ | NO | |
| ¿Existe corrosión en los pernos de anclaje? | SÍ | NO | |
| ¿Existe pérdida de sección en los pernos de anclaje? | SÍ | NO | |

| E. ACCESOS AL CILINDRO | RESPUESTA | | DESCRIPCIÓN |
|---|------------------|----|--------------------|
| ¿El cilindro tiene las tapas sanitarias de inspección (manholes)? | SÍ | NO | |
| ¿Las tapas de inspección está sin fisuras ni daños? | SÍ | NO | |
| ¿Las tapas de inspección se encuentran aseguradas? | SÍ | NO | |

| F. TUBERÍAS | RESPUESTA | | DESCRIPCIÓN |
|---|------------------|----|--------------------|
| ¿La tubería de ventilación está libre de taponamiento o fugas y con malla en buen estado? | SÍ | NO | |
| ¿La tubería de rebalse está libre de taponamiento o fugas y con malla en buen estado? | SÍ | NO | |
| ¿La tubería de limpieza se encuentra en buenas condiciones y sin taponamientos o fugas? | SÍ | NO | |
| Las llaves de la tubería de limpieza y de distribución se encuentran sin fugas de agua? | SÍ | NO | |

| G. ESCALERAS | RESPUESTA | | DESCRIPCIÓN |
|---|------------------|----|--------------------|
| ¿Existe corrosión en los miembros? | SÍ | NO | |
| ¿Los elementos de la escalera están completos? | SÍ | NO | |
| ¿Las uniones soldadas presentan agrietamiento? | SÍ | NO | |
| Las llaves de la tubería de limpieza y de distribución se encuentran sin fugas de agua? | SÍ | NO | |

| H. EXTERIOR DE LA ESTRUCTURA | RESPUESTA | | DESCRIPCIÓN |
|---|------------------|----|--------------------|
| ¿Existe corrosión en las superficies pintadas? | SÍ | NO | |
| ¿Existe algún signo de fugas? | SÍ | NO | |
| ¿Existe agrietamiento en la soldadura? | SÍ | NO | |
| ¿Existe agrietamiento en alguno de los elementos metálicos? | SÍ | NO | |

I. COMENTARIOS

J. FOTOGRAFÍAS



ANEXO A – ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA PINTURA

CORRO EPOXY 720

Chemical Resistance Epoxy Finish



DESCRIPCION Acabado epoxy-poliamida catalizado, de alto desempeño resistente a productos químicos, humedad y abrasión.

Se recomienda para uso exterior o interior en superficies de concreto, pisos ó paredes. Ideal para estructuras metálicas previamente imprimadas, tuberías, tanques, equipos industriales, equipos de procesamiento de alimentos, industrias químicas y refinerías de petróleo.

VENTAJAS

- Altamente resistente a los efectos de ácidos, álcalis solventes, grasas, aceites y otros químicos activos
- Sistema de colores preparados
- No contiene catalizador de amina tóxica
- Su flexibilidad y reacción al choque térmico lo hacen ideal para cubrir grandes superficies, ya que no se ampolla con el tiempo
- Excelente protección para la corrosión
- Excelente adhesión
- Puede ser usado en tanques de agua potable

Limitaciones de Uso : Aplicaciones en exterior podrían causar cambios en el color o pérdida de brillo, pero esto no afecta las propiedades de protección.

ESPECIFICACIONES

| | |
|--|--|
| COMPOSICION : | Epoxy-Poliamida |
| COLOR : | Según Cartilla |
| BRILLO : | @ 60° : 80 unidades mínimo |
| DENSIDAD: | 4.2 ± 0.2 Kg/gal, varía según el color |
| SOLIDOS POR PESO : | 58 ± 2 %, varía según el color |
| SOLIDOS POR VOLUMEN: | 44 ± 2 %, varía según el color |
| RELACION DE CATALIZACIÓN POR VOLUMEN: | Corro-Epoxy 720 1 parte Corro-Epoxy 721 1 parte 15 a 30 minutos |
| TIEMPO DE INDUCCION : | |
| ESPESOR DE PELICULA RECOMENDADO : | 2 - 3 mils seco, 4 -6 mils húmedo (25°C., 50% H.R.) |
| TIEMPO DE SECADO : | TACTO: 1-2 horas REPINTE: 8-12 horas CURA TOTAL: 5-10 días |
| SOLVENTE PARA REDUCCIÓN: | No requiere dilución. Utilice C-20 para la limpieza del equipo de aplicación. |
| TIPO DE CURADO: | reacción química |
| TIEMPO DE VIDA DE LA MEZCLA : | 4 horas a 25°C., 50% H.R |
| PRESENTACION : | 1 galón y 5 galones |

DESEMPEÑO

Adhesión (ASTM D 4541) Excelente
Resistencia Baño Salino (ASTM B 117) Excelente
Resistencia Humedad (ASTM D 2247) Excelente
Resistencia al Impacto (ASTM D 2794) Excelente
Resistencia Química (ASTM D 1308 - 24 horas de
contacto) Excelente. MEK, Tolueno, Hidróxido de
sodio 50%, Hidróxido de Amonio 10%, Cloruro de
Sodio 5%, Acido Sulfúrico 10%, Acido Clorhídrico
10%.



INFORMACION GENERAL

Preparación del Material :

Mezclar en partes iguales 1:1 el Corro Epoxy 720 o de color con el Corro Epoxy 721. Espere de 15 - 30 minutos como tiempo de inducción y aplique. El tiempo de vida de la mezcla es de aproximadamente 4 horas. Se puede aplicar con brocha, rodillo ó equipo airless.

Preparación de la Superficie : La superficie debe estar seca, libre de grasa y otros contaminantes

Superficies metálicas : Si se utiliza en ambientes tipo "A"(corrosivo agresivo), tipo "C" (corrosivo) o sometido a inmersión debe realizarse limpieza a metal casi blanco SSPC-SP10. Si es tipo "M" (moderado) hacer limpieza comercial SSPC-SP6. Aplicar para todos los ambientes primario Corro-Rust 205.

Galvanizado o aluminio : No necesita limpieza con chorro de arena. Quitar el aceite, grasa, sucio o polvo y aplique.

Concreto Nuevo : Limpiar bien y aplique de 2 a 3 manos. La primera mano diluirla al 10 % con diluyente C-20 para que actúe como sellador y las otras manos aplicarlas sin dilución.

CORRO RUST 210 /211 Corroless Epoxy Metal Primer

DESCRIPCION

Sistema de dos componentes formulado para proveer un fuerte enlace con los sustratos metálicos a pintar. Brinda una excelente protección anticorrosiva por su composición epóxica y pigmentos especiales, con la característica de estabilizar la corrosión mediante la formación del óxido de hierro magnético.

Se recomienda como primario en sistemas de pintado que serán sometidos a condiciones de corrosión severas. Es un producto anticorrosivo para la aplicación en superficies interiores y exteriores de metal expuesto a ambientes muy severos.

VENTAJAS

- Brinda excelente protección anticorrosiva.
- Posee un gran poder de anclaje sobre la superficie y alto poder de penetración.
- Tiene gran rendimiento y cubrimiento.
- Posee características de convertidor del óxido.
- Sirve como sistema intermediario.
- Preparación de Superficie mínima (SSPC-SP 6)

ESPECIFICACIONES

| | |
|-----------------------------------|---|
| COMPOSICION : | Epoxy-Poliamida, con pigmentos anticorrosivos especiales |
| COLOR : | Marrón |
| BRILLO : | @ 60° : Menor a 10 unidades |
| DENSIDAD: | 5.3 ± 0.2 Kg/gal |
| SOLIDOS POR PESO : | 65 ± 2 % |
| SOLIDOS POR VOLUMEN: | 43 ± 2 % |
| RELACION DE CATALIZACIÓN : | Corro-Rust 210 1 parte Corro-Rust 211 1 parte |
| ESPESOR DE PELICULA RECOMENDADO : | 2 - 3 mils seco, 4 -6 mils húmedo |
| TIEMPO DE SECADO : | (25°C., 50% H.R.) TACTO: 2 horas RETOQUE: 24 horas CURA TOTAL: 5-10 días |
| TIEMPO DE INDUCCION : | 15 a 30 minutos |
| SOLVENTE PARA REDUCCIÓN: | Thinner C-20 10% máximo, úsese para la limpieza del equipo de aplicación. |
| TIPO DE CURADO: | reacción química |
| TIEMPO DE VIDA DE LA MEZCLA : | 4 horas a 25°C., 50% H.R |
| PRESENTACION : | 1 galón y 5 galones |

DESEMPEÑO

Adhesión (ASTM D 4541) Excelente
Resistencia Baño Salino (ASTM B 117) Excelente
Resistencia Humedad (ASTM D 2247) Excelente
Resistencia al Impacto (ASTM D 2794) Excelente
Resistencia Química (ASTM D 1308 - 24 horas de contacto) Excelente. MEK, Tolueno, Hidróxido de sodio 50%, Hidróxido de Amonio 10%, Cloruro de Sodio 5%, Acido Sulfúrico 10%, Acido Clorhídrico 10%.



**INFORMACION
GENERAL**

Preparación de Superficie :

La superficie debe estar limpia, seca, libre de polvo y grasa. En superficies metálicas es indispensable eliminar todo rasgo de corrosión con cepillo de acero, lija o Sand Blasting tipo SSPC - SP 6.

Instrucciones Especiales :

El Corroles Epoxy Primer Corro Rust 210 debe mezclarse en proporción 1 a 1 en volumen con Corro Rust 211 media hora antes de su aplicación. Una vez preparada la mezcla debe utilizarse en un lapso de 6 horas. Sólo prepare lo que utilizará en este tiempo. Este producto no debe quedar expuesto, siempre debe ser recubierto preferiblemente con pintura tipo epóxica o de poliuretano.

CORRO THANE 2250

Aliphatic Urethane Enamel



DESCRIPCION

Esmalte poliuretano de altísimo desempeño. Químicamente curado para aplicaciones donde se requiera máxima retención de brillo y color.

Ideal para aplicaciones interior o exterior en edificios de metal, tanques de almacenamiento, acero estructural, equipos y superficies industriales, parques de diversiones, estadios, vehículos y aplicaciones marinas (en tierra y mar).

VENTAJAS

- Altísimo brillo y máxima retención del color
- Excelente resistencia al ataque de agentes químicos y la abrasión
- Sistema de Colores Preparados
- Excelente durabilidad con resistencia al rayado y al astillado
- Fácil de lavar y limpiar
- Acabado de máxima durabilidad

ESPECIFICACIONES

| | |
|--|--|
| COMPOSICION : | Acrílico-Uretano Alifático |
| COLOR : | Según Cartilla |
| BRILLO : | @ 60° : 90 unidades mínimo |
| DENSIDAD: | 4.4 ± 0.2 Kg/gal, varía según el color |
| SOLIDOS POR PESO : | 61 ± 2 %, varía según el color |
| SOLIDOS POR VOLUMEN: | 48 ± 2 %, varía según el color |
| RELACION DE CATALIZACIÓN POR VOLUMEN: | Corro-Thane Base Color 7 partes Corro-Thane 2260 1 parte |
| ESPESOR DE PELICULA RECOMENDADO : | 1.5 - 2 mils seco, 3 -4 mils húmedo (25°C., 50% H.R.) |
| TIEMPO DE SECADO : | TACTO: 1 hora REPINTE: 4-6 horas CURA TOTAL: 6-8 días |
| SOLVENTE PARA REDUCCIÓN: | Utilícese Thinner C-30 para dilución y limpieza del equipo de aplicación. |
| TIEMPO DE INDUCCIÓN : | No requiere inducción |
| TIPO DE CURADO: | reacción química |
| TIEMPO DE VIDA DE LA MEZCLA: | 6 horas a 25°C., 50% H.R |
| PRESENTACION : | Kit de 1 galón y 5 galones |

DESEMPEÑO

Adhesión (ASTM D 4541) Excelente
Resistencia Baño Salino (ASTM B 117) Excelente
Resistencia Humedad (ASTM D 2247) Excelente
Resistencia al Impacto (ASTM D 2794) Excelente
Dureza (ASTM D3363) 4H
Resistencia Química (ASTM D 1308 - 24 horas de
contacto) Excelente. MEK, Tolueno, Hidróxido de
sodio 50%, Hidróxido de Amonio 10%, Cloruro de
Sodio 5%, Acido Sulfúrico 10%, Acido Clorhídrico
10%.



**INFORMACION
GENERAL**

Preparación del Material :

Mezclar 7 partes de Corro-Thane en el color seleccionado con 1 parte de Corro-Thane 2260. Esta mezcla no requiere tiempo de inducción. El producto se puede aplicar con brocha, rodillo, pistola convencional o equipo airless. Si se requiere diluir el producto, utilícese diluyente C-30.

Preparación de la Superficie : La superficie debe estar seca, libre de grasa y otros contaminantes

Superficies metálicas : Las superficies nuevas, deben ser previamente imprimadas con Corro-Rust 205. Superficies previamente pintadas, se debe consultar con su Asesor Técnico.

Galvanizado o aluminio : No necesita limpieza con chorro de arena. Quitar el aceite, grasa, sucio o polvo y aplique Corro- Primer 147.

Concreto Nuevo : Debe tener al menos 30 días de fraguado. Debe ser previamente imprimado con Corro-Primer 270. Superficies previamente pintadas se debe consultar con su Asesor Técnico.

BIBLIOGRAFÍA

Meier, S. (2010). *Steel Water Storage Tanks: Design, Construction, Maintenance, and Repair*. Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.

Missouri Department of Natural Resources. (abril de 2004). *Inspection of Water Storage Facilities*. Recuperado el 8 de junio de 2014, de Missouri Department of Natural Resources: <http://www.dnr.mo.gov/pubs/pub2112.pdf>

Protocolos de Inspección Sanitaria. (noviembre de 2008). Recuperado el 8 de junio de 2014, de Centro de Aguas y Saneamiento : <http://casa.fcyt.umss.edu.bo/docs/Protocolos%20IS%20Final%20Texto%20completo.pdf>

| Elementos cargados y peso de la Viaje 1 | | | | | | | | |
|---|---------------------------------------|---------------|----------|--------|-----------------------|------------------|------------------------|-------------------|
| Item | Descripción | Dimensión (m) | Cantidad | Unidad | Peso por unidad (ton) | Peso total (ton) | Cantidad en plataforma | Cantidad restante |
| B1 | Tubo de 8" + Placa C (marco) | 9,11 | 6 | unidad | 0,42 | 0,00 | 0 | 6 |
| B2 | Tubo de 8" (marco) | 5,37 | 6 | unidad | 0,22 | 1,12 | 5 | 1 |
| B3 | Tubo de 8" (marco) | 3,70 | 6 | unidad | 0,15 | 0,93 | 6 | 0 |
| C1 | Tubo de acero de 8" + Placa C (marco) | 7,25 | 6 | unidad | 0,34 | 0,68 | 2 | 4 |
| C2 | Tubo de 8" (marco) | 4,52 | 6 | unidad | 0,19 | 0,94 | 5 | 1 |
| C3 | Tubo de 8" (marco) | 2,71 | 6 | unidad | 0,11 | 0,68 | 6 | 0 |
| G | Tubo de 8" (marco) | 6,40 | 6 | unidad | 0,27 | 0,80 | 3 | 3 |
| H | Tubo de 8" (marco) | 4,30 | 6 | unidad | 0,18 | 0,72 | 4 | 2 |
| AT | Atizadores | - | 96 | unidad | 0,00 | 0,10 | 96 | 0 |
| A1 | Tubo de 8" + Placa C (arriostre) | 8,78 | 10 | unidad | 0,40 | 3,62 | 9 | 1 |
| A2 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,38 | 10 | unidad | 0,18 | 0,00 | 0 | 10 |
| A3 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,39 | 10 | unidad | 0,18 | 0,00 | 0 | 10 |
| A4 | Tubo de 8" + Placa C (arriostre) | 9,17 | 10 | unidad | 0,42 | 4,18 | 10 | 0 |
| A5 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,57 | 10 | unidad | 0,19 | 0,19 | 1 | 9 |
| A6 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,59 | 10 | unidad | 0,19 | 0,57 | 3 | 7 |
| F | Tubo de 8" (arriostre) | 4,70 | 30 | unidad | 0,20 | 3,92 | 20 | 10 |
| I | Viga I | - | 6 | unidad | 0,23 | 0,00 | 0 | 6 |
| C | Elementos de conexión | 5,25 | 10 | unidad | 0,22 | 0,00 | 0 | 10 |
| | Total | - | 250 | - | - | 18,43 | 170 | 80 |

Fuente: elaboración propia

| Elementos cargados y peso de la Viaje 3 | | | | | | | | |
|---|---------------------------------------|-------------|----------|--------|---------------------|----------------|------------------------|-------------------|
| Item | Descripción | Dimensión m | Cantidad | Unidad | Peso por unidad ton | Peso total ton | Cantidad en plataforma | Cantidad restante |
| B1 | Tubo de 8" + Placa C (marco) | 9,11 | 6 | unidad | 0,42 | 2,49 | 6 | 0 |
| B2 | Tubo de 8" (marco) | 5,37 | 1 | unidad | 0,22 | 0,22 | 1 | 0 |
| B3 | Tubo de 8" (marco) | 3,70 | 0 | unidad | 0,15 | 0,00 | 0 | 0 |
| C1 | Tubo de acero de 8" + Placa C (marco) | 7,25 | 4 | unidad | 0,34 | 1,35 | 4 | 0 |
| C2 | Tubo de 8" (marco) | 4,52 | 1 | unidad | 0,19 | 0,19 | 1 | 0 |
| C3 | Tubo de 8" (marco) | 2,71 | 0 | unidad | 0,11 | 0,00 | 0 | 0 |
| G | Tubo de 8" (marco) | 6,40 | 3 | unidad | 0,27 | 0,80 | 3 | 0 |
| H | Tubo de 8" (marco) | 4,30 | 2 | unidad | 0,18 | 0,36 | 2 | 0 |
| AT | Atizadores | - | 0 | unidad | 0,00 | 0,00 | 0 | 0 |
| A1 | Tubo de 8" + Placa C (arriostre) | 8,78 | 1 | unidad | 0,40 | 0,40 | 1 | 0 |
| A2 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,38 | 10 | unidad | 0,18 | 1,83 | 10 | 0 |
| A3 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,39 | 10 | unidad | 0,18 | 1,83 | 10 | 0 |
| A4 | Tubo de 8" + Placa C (arriostre) | 9,17 | 0 | unidad | 0,42 | 0,00 | 0 | 0 |
| A5 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,57 | 9 | unidad | 0,19 | 1,71 | 9 | 0 |
| A6 | Tubo de 8" (arriostre) | 4,59 | 7 | unidad | 0,19 | 1,34 | 7 | 0 |
| F | Tubo de 8" (arriostre) | 4,70 | 10 | unidad | 0,20 | 1,96 | 10 | 0 |
| I | Viga I | - | 6 | unidad | 0,23 | 1,39 | 6 | 0 |
| C | Elementos de conexión | 5,25 | 10 | unidad | 0,22 | 2,19 | 10 | 0 |
| | Total | - | 80 | - | - | 18,06 | 80 | 0 |

Fuente: elaboración propia

Anexos

Anexo 1

Tabla 5-2a de la norma API STANDARD 650

Anexo 2

Memoria de cálculo del tanque de almacenamiento

Anexo 3

Informe: Evaluación estructural losa de concreto tanque de agua

Table 5-2a—(SI) Permissible Plate Materials and Allowable Stresses

| Plate Specification | Grade | Nominal Plate Thickness <i>t</i> mm | Minimum Yield Strength Mpa | Minimum Tensile Strength Mpa | Product Design Stress <i>S_d</i> Mpa | Hydrostatic Test Stress <i>S_t</i> Mpa |
|---------------------|----------------|--|----------------------------|--|--|--|
| ASTM Specifications | | | | | | |
| A 283M | C | | 205 | 380 | 137 | 154 |
| A 285M | C | | 205 | 380 | 137 | 154 |
| A 131M | A, B | | 235 | 400 | 157 | 171 |
| A 36M | — | | 250 | 400 | 160 | 171 |
| A 131M | EH 36 | | 360 | 490 ^a | 196 | 210 |
| A 573M | 400 | | 220 | 400 | 147 | 165 |
| A 573M | 450 | | 240 | 450 | 160 | 180 |
| A 573M | 485 | | 290 | 485 ^a | 193 | 208 |
| A 516M | 380 | | 205 | 380 | 137 | 154 |
| A 516M | 415 | | 220 | 415 | 147 | 165 |
| A 516M | 450 | | 240 | 450 | 160 | 180 |
| A 516M | 485 | | 260 | 485 | 173 | 195 |
| A 662M | B | | 275 | 450 | 180 | 193 |
| A 662M | C | | 295 | 485 ^a | 194 | 208 |
| A 537M | 1 | <i>t</i> ≤ 65 65 < <i>t</i> ≤ 100 | 345 310 | 485 ^a 450 ^b | 194 180 | 208 193 |
| A 537M | 2 | <i>t</i> ≤ 65 65 < <i>t</i> ≤ 100 | 415 380 | 550 ^a 515 ^b | 220 206 | 236 221 |
| A 633M | C, D | <i>t</i> ≤ 65 65 < <i>t</i> ≤ 100 | 345 315 | 485 ^a 450 ^b | 194 180 | 208 193 |
| A 678M | A | | 345 | 485 ^a | 194 | 208 |
| A 678M | B | | 415 | 550 ^a | 220 | 236 |
| A 737M | B | | 345 | 485 ^a | 194 | 208 |
| A 841M | Class 1 | | 345 | 485 ^a | 194 | 208 |
| A 841M | Class 2 | | 415 | 550 ^a | 220 | 236 |
| CSA Specifications | | | | | | |
| G40.21M | 260W | | 260 | 410 | 164 | 176 |
| G40.21M | 260 WT | | 260 | 410 | 164 | 176 |
| G40.21M | 300W | | 300 | 450 | 180 | 193 |
| G40.21M | 300WT | | 300 | 450 | 180 | 193 |
| G40.21M | 350W | | 350 | 450 | 180 | 193 |
| G40.21M | 350WT | <i>t</i> ≤ 65 65 < <i>t</i> ≤ 100 | 350 320 | 480 ^a 480 ^a | 192 192 | 206 206 |
| National Standards | | | | | | |
| | | | 235 | 365 | 137 | 154 |
| | | | 250 | 400 | 157 | 171 |
| | | | 275 | 430 | 167 | 184 |
| ISO Specifications | | | | | | |
| ISO 630 | E 355C, D | <i>t</i> ≤ 16 16 < <i>t</i> ≤ 40 | 275 265 | 410 410 | 164 164 | 176 176 |
| | E 355, D | <i>t</i> ≤ 16 16 < <i>t</i> ≤ 40 40 < <i>t</i> ≤ 50 | 355 345 335 | 490 ^a 490 ^a 490 ^a | 196 196 196 | 210 210 210 |
| EN Specifications | | | | | | |
| EN 10025 | S 355J0, J2 | <i>t</i> ≤ 16 16 < <i>t</i> ≤ 1 ¹ / ₂ | 275 265 | 410 410 | 164 164 | 176 176 |
| | S355J0, J2, K2 | <i>t</i> ≤ 16 16 < <i>t</i> ≤ 40 40 < <i>t</i> ≤ 50 | 355 345 335 | 470 ^a 470 ^a 470 ^a | 188 188 188 | 201 201 201 |

•^aBy agreement between the Purchaser and the Manufacturer, the tensile strength of ASTM A 537M, Class 2, A 678M, Grade B, and A 841M, Class 2 materials may be increased to 585 MPa minimum and 690 MPa maximum. The tensile strength of the other listed materials may be increased to 515 MPa minimum and 620 MPa maximum. When this is done, the allowable stresses shall be determined as stated in 5.6.2.1 and 5.6.2.2.

•^bBy agreement between the Purchaser and the Manufacturer, the tensile strength of ASTM A 537M, Class 2 materials may be increased to 550 MPa minimum and 690 MPa maximum. The tensile strength of the other listed materials may be increased to 485 MPa minimum and 620 MPa maximum. When this is done, the allowable stresses shall be determined as stated in 5.6.2.1 and 5.6.2.2.

11

09

11

11

Memoria de cálculo

①

Tunque Los Chiles ($V = 289 \text{ m}^3$)

Análisis en el eje débil

Coefficiente sísmico

Zona II

Suelo tipo S₃

$$a_{ef} = 0,28$$

Estructura tipo voladizo.

Estructura regular

Ductilidad local óptima

$$\mu = 1,50$$

$$FED = 1,77.$$

$$C = \frac{0,28 \times 1,50 \times 1,77}{1,20} = 0,62.$$

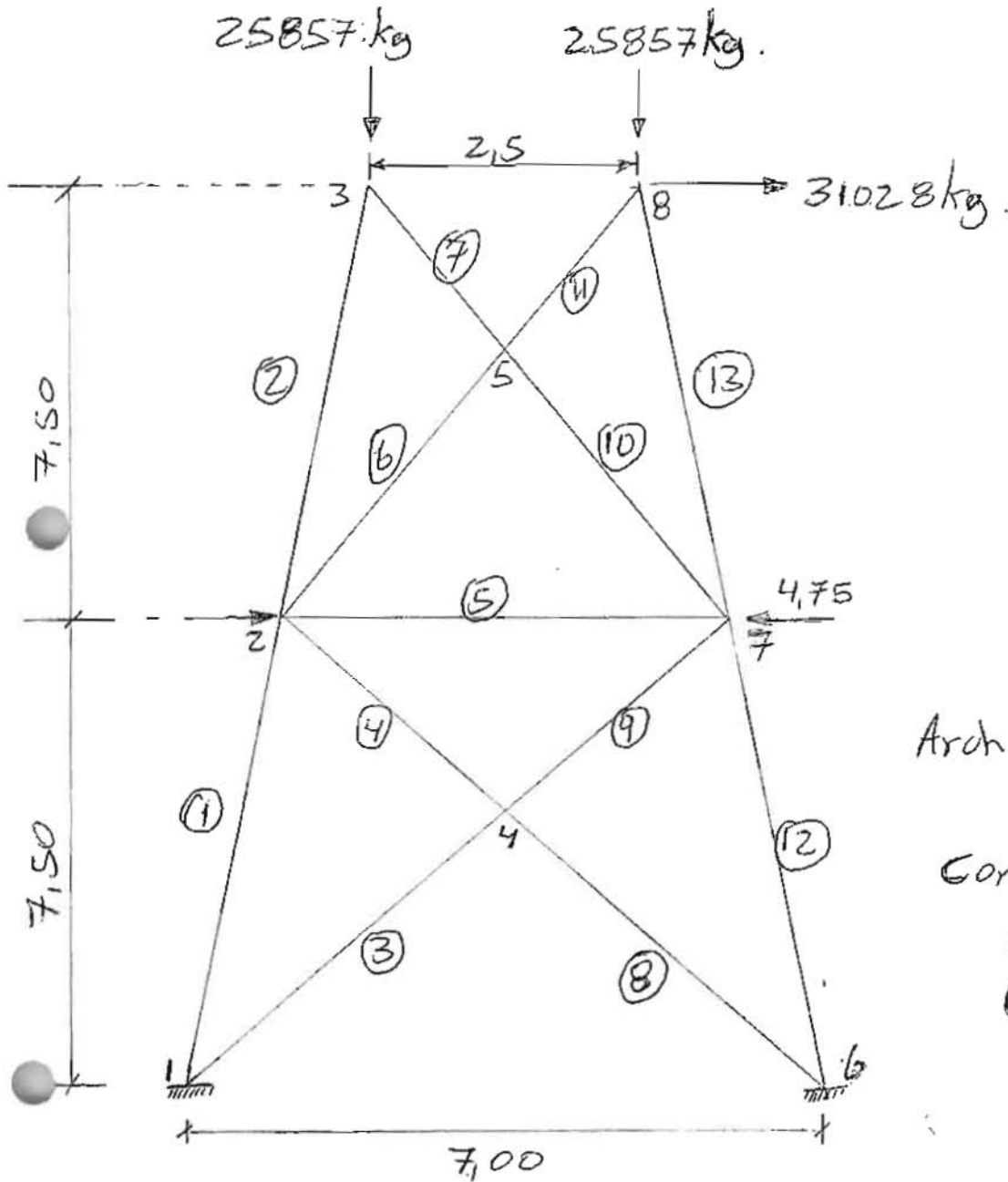
Peso del agua

$$\pi \times (1,75)^2 \times 1000 \text{ kg/m}^3 = 9621 \text{ kg/m}$$

$$C.S = 9621 \text{ kg} \times 0,6 = 5773 \text{ kg/m}.$$

Marco de Análisis, S.

(2)



Archivo SAP 90:
chiles.
Condiciones de carga
① Viva
② Sismo.



Elementos ①, ②, ⑤, ⑫ y ⑬

$$d.e = 32,4 \text{ cm}$$

$$d.i = 30,5 \text{ cm}$$

$$A = 88 \text{ cm}^2 = 8,8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$I = 11615 \text{ cm}^4 = 1,16 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

$$r = 11,5 \text{ cm}$$

Propiedad 1

Los demás elementos

(3)

$$d.e = 21,9 \text{ cm}$$

$$d.i = 20,3 \text{ cm}$$

$$A = 56,5 \text{ cm}^2 = 5,65 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad \text{Propiedad 2.}$$

$$I = 2954 \text{ cm}^4 = 2,95 \times 10^{-5} \text{ m}^4.$$

$$r = 7,2 \text{ cm}$$

Elementos y cargas críticas

Columnas

- Combinación ①

$$P = -88 \text{ ton}$$

$$M = 380 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

- Combinación ②

$$P = -78 \text{ ton}$$

$$M = 912 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

tensores

combinación ①

$$P = -19 \text{ ton}$$

$$M = 215 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

combinación ②

$$P = +46,3 \text{ ton}$$

$$M = 1735 \text{ kg} \cdot \text{m}.$$

Combinación ① - Columnas

$$\frac{kl}{r} = \frac{1,0 \times 750 \text{ cm}}{11,5 \text{ cm}} = 65$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 \times 2,1 \times 10^6}{2800}} = 121,6.$$

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{65^2}{2 \times (121,6)^2} \right] 2800}{\frac{5}{3} + \frac{3(65)}{8(121,6)} - \frac{65^3}{8 \times (121,6)^3}} = \frac{2408}{1,66 + 0,20 - 1,9 \times 10^{-2}}$$

$$F_a = 1295 \text{ kg/cm}^2.$$

$$f_b = 0,6 F_y = 1680 \text{ kg/cm}^2$$

(4)

$$f_b = \frac{Mc}{I} = \frac{38000 \text{ kg} \cdot \text{cm} \times 16,2 \text{ cm}}{11615 \text{ cm}^4} = 53 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_a = \frac{P}{A} = \frac{88000 \text{ kg}}{88 \text{ cm}^2} = 1000 \text{ kg/cm}^2$$

Combinaciones de carga.

Tómese conservadoramente $c_m = 1,0$

$$F_e = \frac{12 \pi^2 (2,1 \times 10^6)}{23 (65)^2} = 2560 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{c_m f_b}{\left(1 - \frac{F_a}{F_e}\right) F_b} = \frac{1000}{1295} + \frac{1,0 (53)}{\left(1 - \frac{1000}{2560}\right) 1680} = 0,77 + 0,05 = 0,82 < 1 \Rightarrow \text{OK!}$$

(1)

$$\frac{f_a}{0,6 F_y} + \frac{f_b}{F_b} = \frac{1000}{0,6 \times 2800} + \frac{53}{1680} = 0,63 < 1 \Rightarrow \text{OK!} \quad (2)$$

Combinación (2) - columnas

$$f_a = \frac{P}{A} = \frac{78000 \text{ kg}}{88 \text{ cm}^2} = 886 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_b = \frac{Mc}{I} = \frac{91200 \times 16,2 \text{ cm}}{11615 \text{ cm}^4} = 127,2 \text{ kg/cm}^2$$

Combinaciones de carga \rightarrow O.K!

Combinación ① - tensores.

⑤

$$\frac{kl}{r} = \frac{1,0 \times 952 \text{ cm}}{712 \text{ cm}} = 132$$

$$F_u = \frac{12 \pi^2 (2,1 \times 10^6)}{23 (132)^2} = 620,6 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_u = \frac{P}{A} = \frac{19000 \text{ kg}}{56,5 \text{ cm}^2} = 336 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_b = 0,6 F_y = 1680 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_b = \frac{Mc}{I} = \frac{21500 \times 10,45 \text{ cm}}{2954 \text{ cm}^4} = 80 \text{ kg/cm}^2$$

Combinación de cargas

$$F_e = \frac{12 \pi^2 (2,1 \times 10^6)}{23 \left(\frac{kl_b}{r_b}\right)^2}$$

$$\frac{kl_b}{r_b} = \frac{1 \times 567 \text{ cm}}{712 \text{ cm}} = 78,9$$

$$\Rightarrow F_e = 1741 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{336}{621} + \frac{1,0 \times 80}{\left(1 - \frac{336}{1741}\right) 1680} = 0,6 < 1 \Rightarrow \text{O.K! } \textcircled{1}$$

$$\frac{336}{0,6 \times 2800} + \frac{80}{1680} = 0,25 < 1 \Rightarrow \text{O.K! } \textcircled{2}$$

Combinación ② - tensiones

6

Arco en tensión

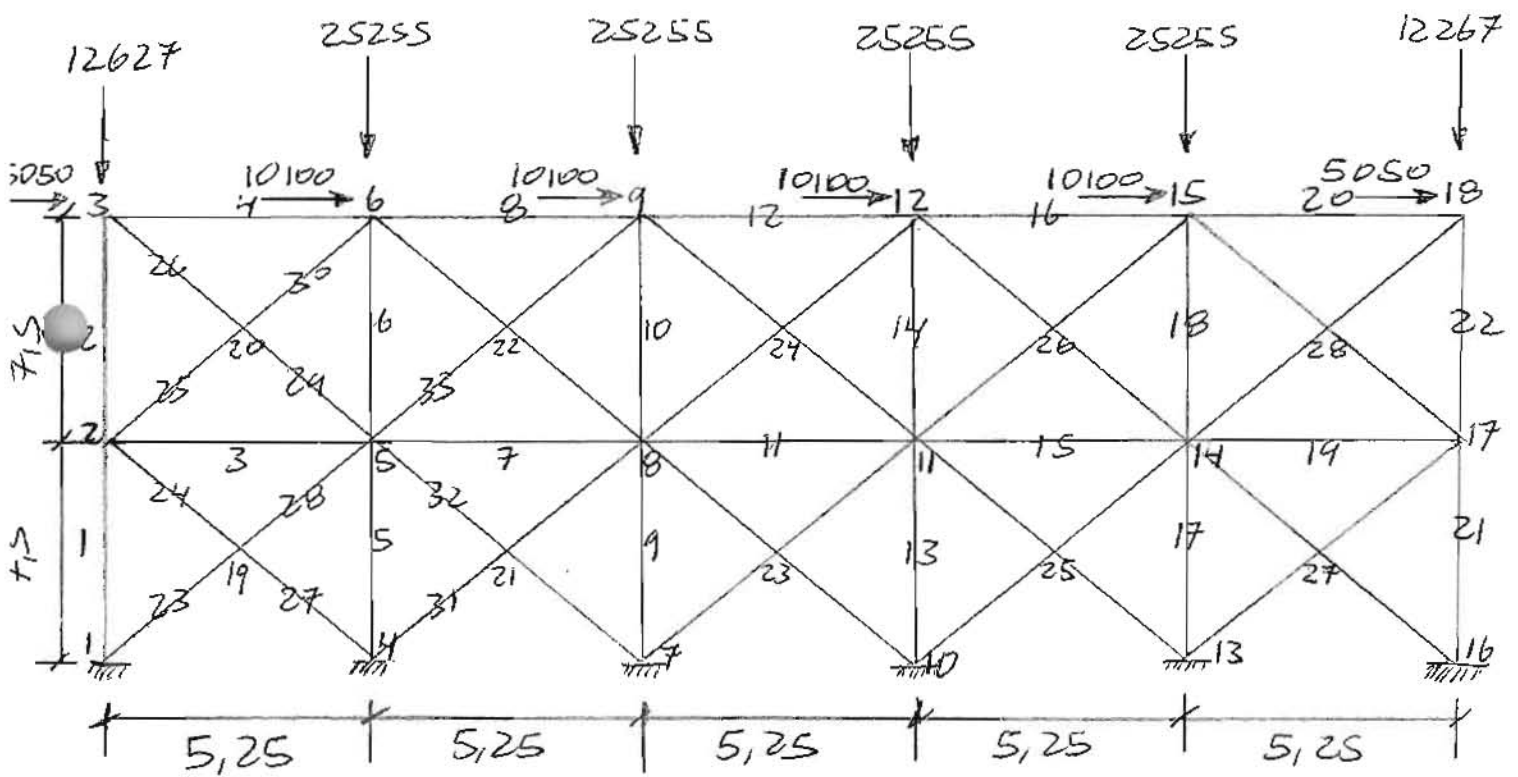
$$F_u = F_b = 0,6 F_y = 1680 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_u = \frac{P}{A} = \frac{46300 \text{ kg}}{56,5 \text{ cm}^2} = 819,5 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_b = \frac{M_c}{I} = \frac{173500 \times 10,45}{2954} = 643 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{819,5}{1680} + \frac{643}{1680} = 0,87 < 1 \Rightarrow \text{OK!}$$

Análisis en el sentido perpendicular



Archivo SAP 90. chiles3.

Coefficiente Sísmico

Zona II

Suelo tipo S₃

$$a_{cp} = 0,28$$

Estructura tipo muro

regular

ductilidad local óptima.

$$\mu = 3,0$$

$$FED = 1,12$$

$$C = \frac{0,28 \times 1,50 \times 1,12}{1,20} = 0,40.$$

$$C.S = 9621 \text{ kg/m} \times 5,25 \text{ m} \times 0,40 / 2 = 10100 \text{ kg/mado.}$$

Cargas críticasColumnas

$$P = -26266 \text{ kg}$$

$$M = 322 \text{ kg}\cdot\text{m.}$$

tensores

$$P = -18626 \text{ kg}$$

$$M = 50 \text{ kg}\cdot\text{m.}$$

Comparando con los resultados del análisis anterior \rightarrow O.K!

Sismo en ambas direcciones.

(8)

Columnas - combinaciones críticas
(100% c.s en ambas direcciones)

~~Columnas~~

Marco entre nodos 13 y 15.

$$P_{estx} = -13690 \text{ kg} \quad M_{estx} = 50 \text{ kg}\cdot\text{m} \quad P_{esty} = -20255 \quad M_{esty} = 120$$

$$P_{sisx} = -3379 \text{ kg} \quad M_{sisx} = 265 \text{ kg}\cdot\text{m} \quad P_{sisy} = -57697 \quad M_{sisy} = 788$$

Marco entre nodos 16 y 18.

$$P_{estx} = -11872 \text{ kg} \quad M_{estx} = 78 \text{ kg}\cdot\text{m} \quad P_{esty} = -10125 \quad M_{esty} = 60$$

$$P_{sisx} = -14192 \text{ kg} \quad M_{sisx} = 244 \text{ kg}\cdot\text{m} \quad P_{sisy} = -28848 \quad M_{sisy} = 394.$$

- Con sismo en ambas direcciones tenemos un 70% (sen 45°) de carga en cada dirección

⇒ Combinaciones de carga críticas

$$\textcircled{1} \quad P_{est} = -13690 \text{ kg} \quad M_{estx} = 50 \text{ kg}\cdot\text{m} \quad M_{esty} = 120 \text{ kg}\cdot\text{m}$$
$$P_{sis} = -57697 \times 0,7 \quad M_{sisx} = 265 \times 0,7 \quad M_{sisy} = 788 \times 0,7$$

$$P_T = 54077,9 \text{ kg} \quad M_{xT} = 236 \text{ kg}\cdot\text{m} \quad M_{yT} = 672 \text{ kg}\cdot\text{m}$$

$$\textcircled{2} \quad P_{est} = -10125 \text{ kg} \quad M_{estx} = 78 \quad M_{esty} = 60$$
$$P_{sis} = -28848 \times 0,7 \quad M_{sisx} = 244 \times 0,7 \quad M_{sisy} = 394 \times 0,7$$

$$P_{T} = 30000 \text{ kg} \quad M_{xT} = 250 \text{ kg}\cdot\text{m} \quad M_{yT} = 226 \text{ kg}\cdot\text{m}$$

(9)

Combinacion critica $\rightarrow \#1$

$$F_a = 1295 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_a = P/A = \frac{54078}{88 \text{ cm}^2} = 614,5 \text{ kg/cm}^2$$

$$F_b = 1680 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{bx} = \frac{23600 \times 16,2}{11615} = 33 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{by} = \frac{67200 \times 16,2}{11615} = 93,7 \text{ kg/cm}^2$$

Combinaciones de cargas

$$C_m = 1,0$$

$$F_e = 2560 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m f_{bx}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_e}\right) F_{bx}} + \frac{C_m f_{by}}{\left(1 - \frac{f_a}{F_e}\right) F_{by}} = \frac{614,5}{1295} + \frac{1,0 \times 33}{\left(1 - \frac{614,5}{2560}\right) 1680} + \frac{1,0 \times 93,7}{\left(1 - \frac{614,5}{2560}\right) 1680}$$

$$= 0,47 + 0,025 + 0,073 = 0,56 < 1 \Rightarrow \text{OK!}$$

$$\frac{f_a}{0,6 F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} = \frac{614,5}{1295} + \frac{33}{1680} + \frac{93,7}{1680} = 0,55 < 1 \Rightarrow \text{OK!}$$

Estabilidad externa

(10)

Volcamiento

Peso de columnas y tensores =

$$(30m + 5,25m + 4,25m + 5,25m) 73,8 \text{ kg/m} + (74,4 + 19 + 16,6) 42,5 \text{ kg/m}$$
$$= 2915 \text{ kg} + 4675 \text{ kg} = 7600 \text{ kg} / 5,25 \text{ m}$$

Peso del tanque

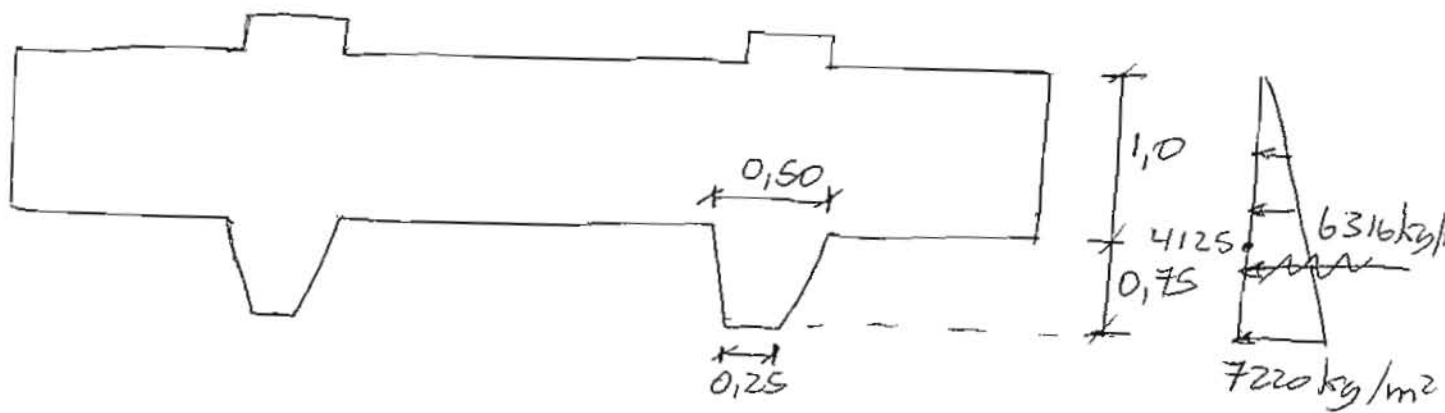
$$= 3,5 \text{ m} \times \pi \times 0,0064 \text{ m} \times 7600 \text{ kg/m}^3 \times 5,25 \text{ m} = 2808 \text{ kg} / 5,25 \text{ m}.$$

Análisis en el sentido de la deriva

$$F.S_{\text{vol.}} = \frac{(9621 \times 6,5) + (1448 \times 6,5) + (535 \times 6,5) + (31200 \times 6,5) + (1440 \times 6,5)}{(9621 \times 0,6 \times 17,95) + (1448 \times 0,6 \times 8,2) + (535 \times 0,6 \times 17,95)}$$
$$= \frac{287586}{116504} = 2,47. \Rightarrow \text{OK}$$

$$F.S_{\text{desl.}} = \frac{(9621 + 1448 + 535 + 31200 + 1440) 0,35 + 2062,5}{(9621 \times 0,6) + (1448 \times 0,6) + (535 \times 0,6) + (31200 \times 0,28)}$$
$$= \frac{17544}{15698} = 1,1 \Rightarrow \text{Corregir.}$$

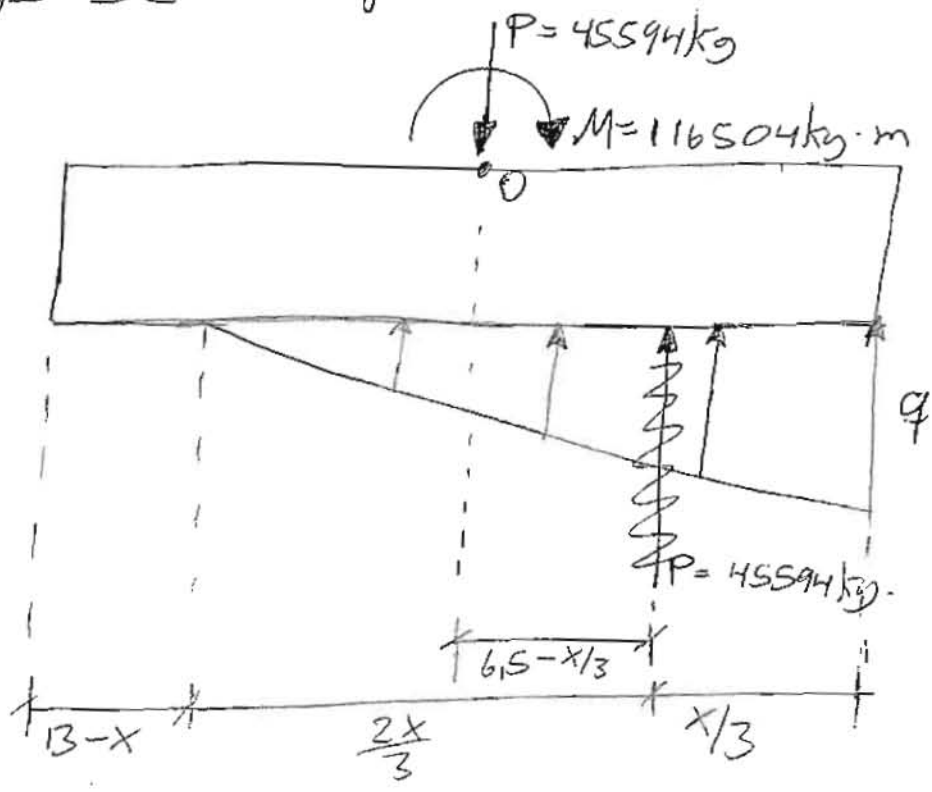
⇒ úsense los siguientes tacones



Peso de tacones = 1350 kg/m

$$\Rightarrow F.S. \text{ desliz.} = \frac{15482 + 6316 + (1350 \times 0,35)}{15698 + (1350 \times 0,20)} = \frac{22270}{15968} = 1,4 \Rightarrow \text{OK!}$$

capacidad de soporte del suelo



~~XXXXXXXXXX~~

$$\Sigma M_0 = 0 \Rightarrow$$

$$45594 \text{ kg} \times (6,5 - x/3) = 116504 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$296361 - 15198x = 116504$$

$$\Rightarrow x = 11,8 \text{ m}$$

$$\Rightarrow \frac{q \times 11,8 \text{ m}}{2} = 45594 \text{ kg} \Rightarrow q = 7727 \text{ kg/m}^2$$

$$q_{adm} = 7500 \text{ kg/m}^2 \Rightarrow \text{OK!}$$

Diseño estructural de la placa

Acero para la parte masiva : 1 # 8 @ 0,20 m a.d, a.c.

Acero para los tacones : 1 # 4 @ 0,25 m.

Diseño de platinas de apoyo de columnas.

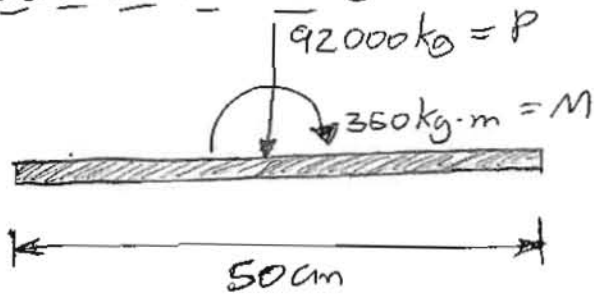
Combinacion ① $F_x = 7666 \text{ kg}$
 $F_y = -92280 \text{ kg}$
 $M = 350 \text{ kg} \cdot \text{m}$

Combinacion ② $F_x = 7666 \text{ kg}$
 $F_y = 40560 \text{ kg}$
 $M = 350 \text{ kg} \cdot \text{m}$

} Dirección débil.

13

Combinación ①.



placa de (50x50) cm

$$I = \frac{50^4}{12} = 520833 \text{ cm}^4$$

$$\text{Esfuerzo debido al momento} = \frac{Mc}{I} = 1,68 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\text{Esfuerzo debido a la fuerza} = \frac{P}{A} = 36,8 \text{ kg/cm}^2$$

⇒ Diseñar sólo para P.

$$m = \frac{(N - 0,95d)}{2} = \frac{50 - 0,95 \times 30}{2} = 10,75$$

$$n = \frac{(B - 0,8b)}{2} = \frac{50 - 0,8 \times 30}{2} = 13$$

$$F_b = 0,75 \times F_y = 2100 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{código 40})$$

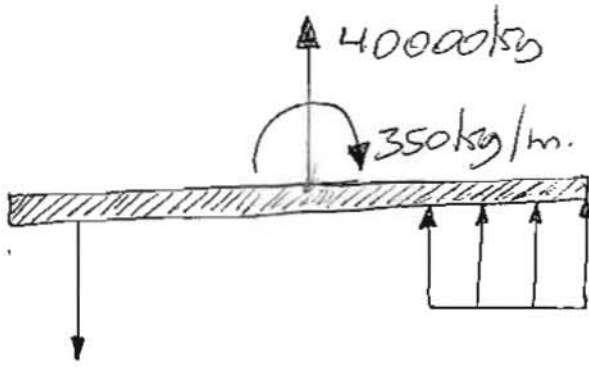
$$F_p = \frac{92000 \text{ kg}}{(50 \times 50) \text{ cm}^2} = 36,8 \text{ kg/cm}^2$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{3 \times F_p \times m^2}{F_b}} = \sqrt{\frac{3 \times 36,8 \times 10,75^2}{2100}} = 2,44 \text{ cm.}$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{3 \times 36,8 \times 13^2}{2100}} = 2,97 \text{ cm} \rightarrow \text{rige.}$$

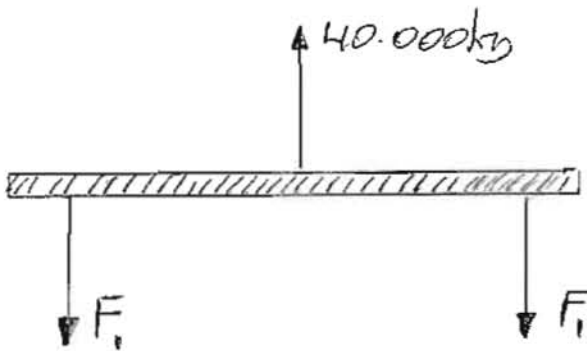
Combinación ②

14



=

a



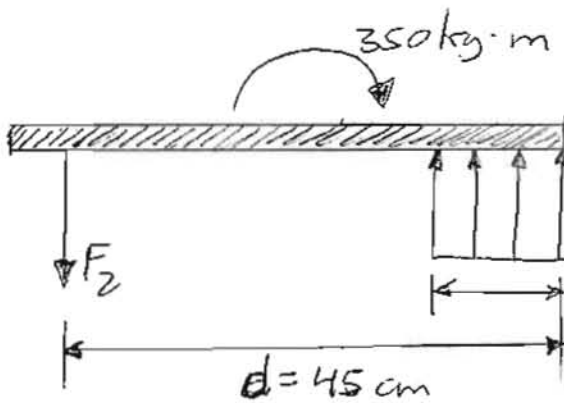
úsense 8 varillas
 $40.000 \text{ kg} / 8 = 5000 \text{ kg} / \text{varilla}$

$$\frac{5000 \text{ kg}}{2100 \text{ kg/cm}^2} = 2,38 \text{ cm}^2 / \text{varilla}$$

$\Rightarrow 8 \# 6$

+

b



$$f_s = \frac{M}{A_s j d} = \frac{35000}{(2,85 \times 2)(0,9)(45)} = 151,6 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Rightarrow F_2 = 151,6 \times 2,85 \times 2 = 864 \text{ kg}$$

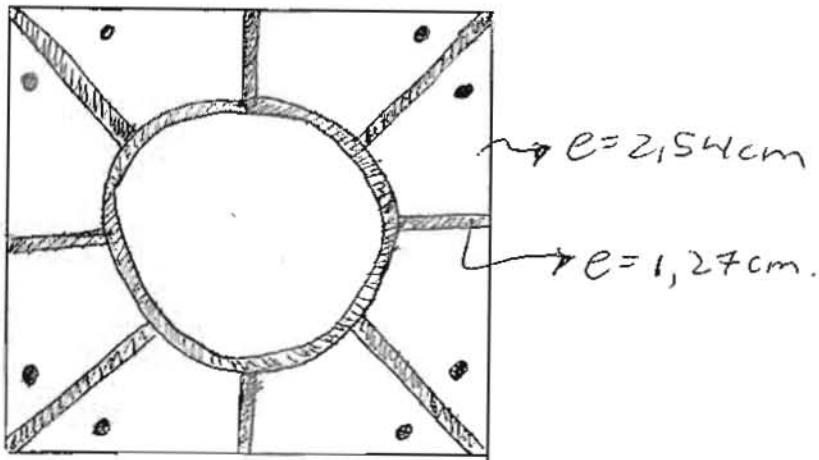
$\Rightarrow 432 \text{ kg} / \text{varilla}$

$$\Rightarrow \sigma_{\text{tot var}} = \frac{5000 + 432}{2,85} = 1900 \text{ kg/cm}^2 \Rightarrow \text{OK}$$

$$f_c = \frac{2M}{bd^2 j k} = \frac{2 \times 35000}{50 \times 45^2 \times 0,9 \times 0,3} = 2,56 \text{ kg/cm}^2 \Rightarrow \text{OK}$$

Conformación de la platina - apoyo.

15



● Se revisa estructuralmente \rightarrow OK!

Diseño de columnas de concreto.

Carga total al nivel de la platina

$$V = 23500 \text{ kg}$$

Criterio para diseño en flexo-compresión:

$$0,05 f'_c A_D = 0,05 \times 280 \times 50 + 50 = 35000 \text{ kg}$$

\Rightarrow diseño en flexo-compresión

$$M = 23500 \text{ kg} \times 0,2 \text{ m} + 350 \text{ kg} \cdot \text{m}$$
$$= 5000 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$P = 92000 \text{ kg}$$

* Las varillas ya diseñadas soportan bien la carga axial y el momento al nivel de la platina \Rightarrow se colocará un acero adicional para el momento a nivel de la losa de fundación y se revisará la compresión adicional por flexión.

(16)

$$\Rightarrow M = 4650 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

$$A_s = \frac{M}{f_s j d} = \frac{465000}{2100 \times 0,85 \times 45} = 5,8 \text{ cm}^2 \Rightarrow 2 \#6 \text{ adicionales}$$

en cada uno de los cuatro lados

$$f_c = \frac{2M}{bd^2 j k} = \frac{2 \times 465000}{50 \times 45^2 \times 0,85 \times 0,35} = 30,87 \text{ kg/cm}^2 \Rightarrow \text{OK!}$$

Constante

$$v = \frac{23500 \text{ kg}}{50 \times 45} = 10,44 \text{ kg/cm}^2$$

$$v_{\text{perm conc.}} = 0,53 \sqrt{280} = 8,86 \text{ kg/cm}^2 \Rightarrow \text{diseñar arcos}$$

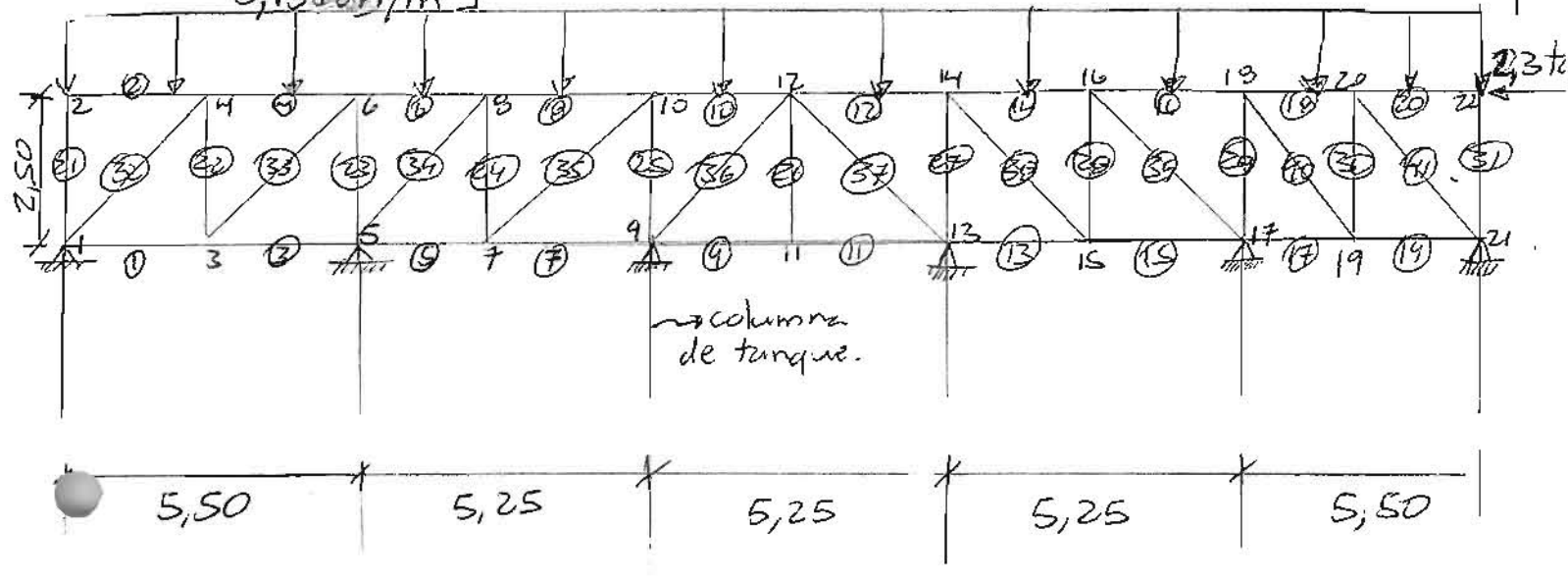
$$V_c = 8,86 \text{ kg/cm}^2 \times 50 \text{ cm} \times 45 \text{ cm} = 19953 \text{ kg}$$

$$V_s = \frac{23500 \text{ kg}}{0,85} - 19953 \text{ kg} = 7694 \text{ kg} = \frac{A_v f_y d}{S} = \frac{A_v \times 2800 \times 45}{10}$$

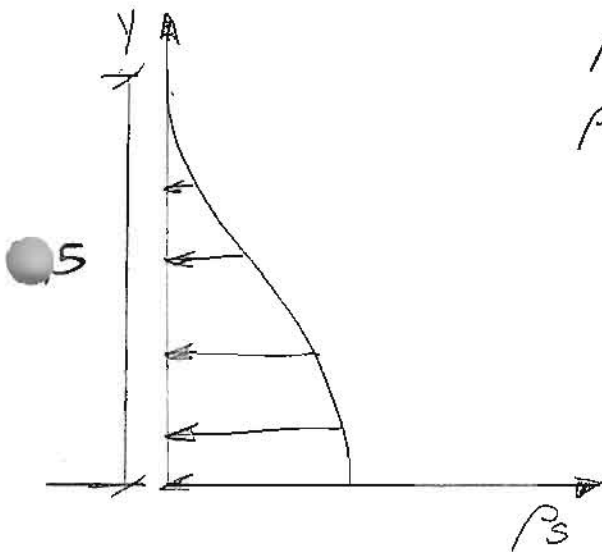
$$\Rightarrow A_v = 0,61 \text{ cm}^2 \Rightarrow \boxed{1 \#3 @ 0,10 \text{ m}}$$

Refuerzo interno del tanque.

5,15 ton/m] incluye peso de tanque y armadura interna



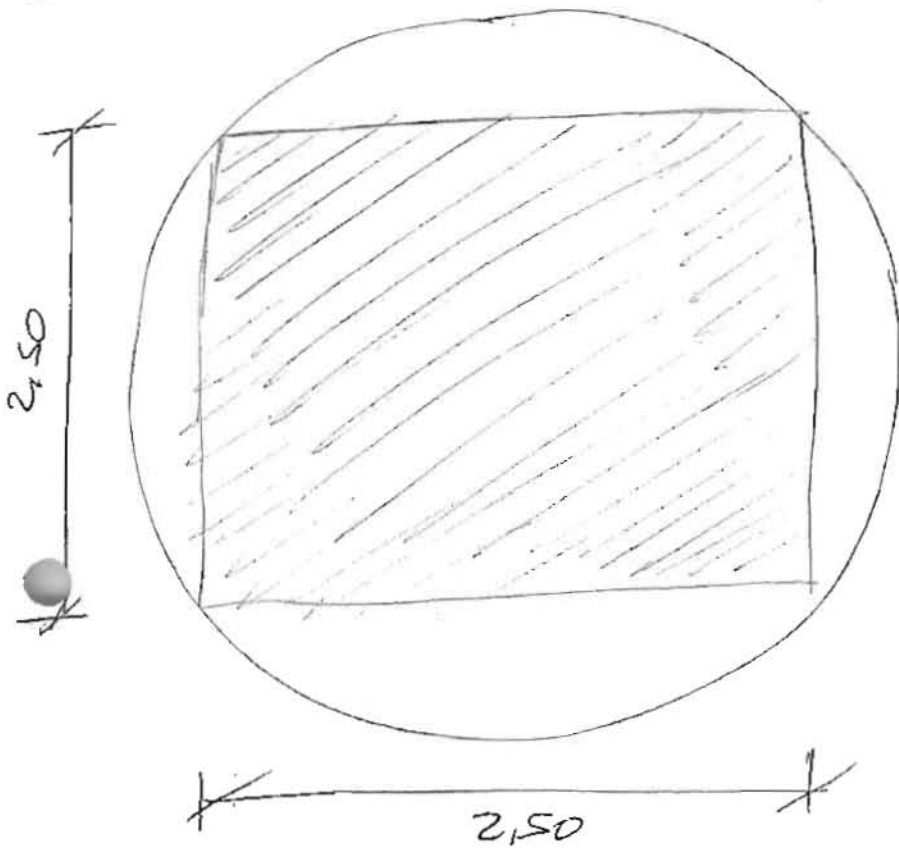
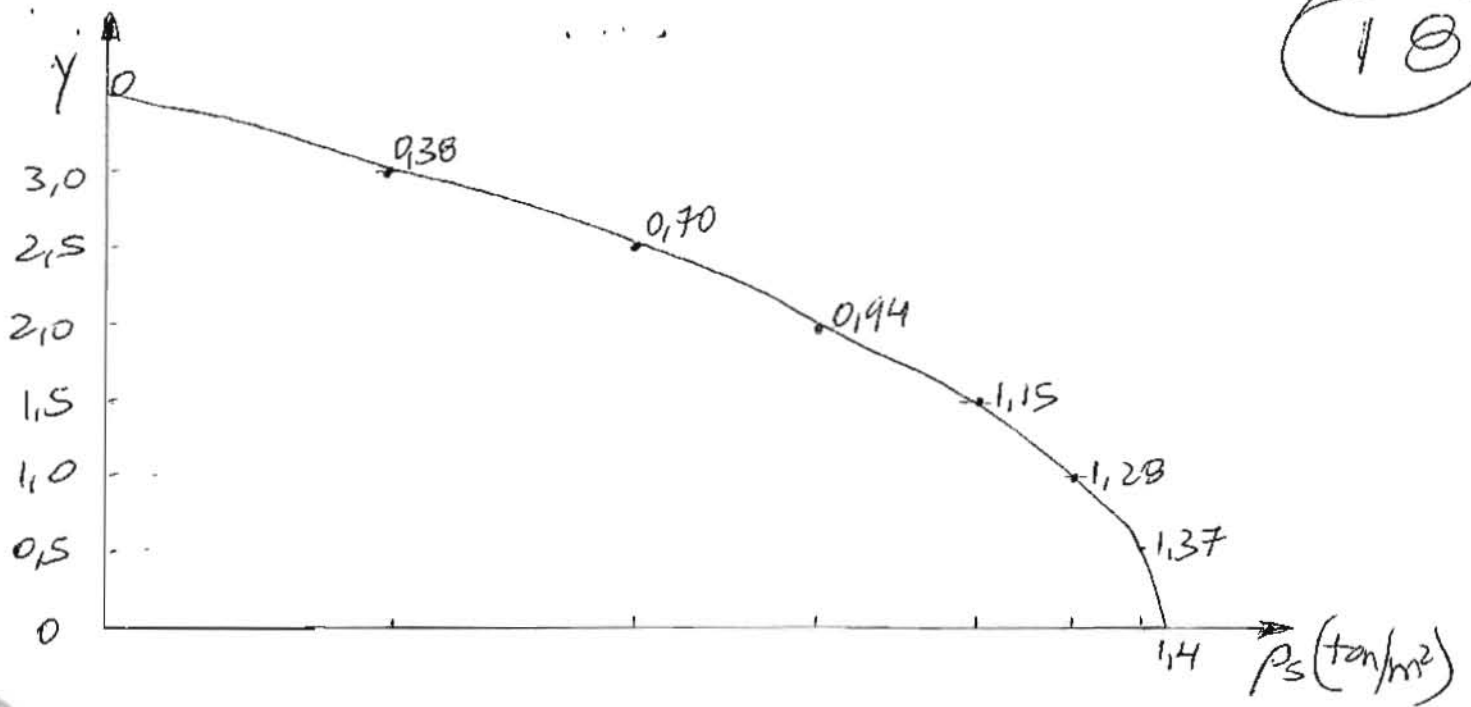
Sismo del agua



$$p_s = \gamma_w \times h \times \alpha_{ef} [1 - (y/h)^2]$$

$$p_s = 1,4 [1 - (y/h)^2] \text{ (ton/m}^2\text{)}$$

| y (m) | (y/h) ² | p _s (ton/m ²) |
|-------|-------------------------|--------------------------------------|
| 0,50 | 2,04 × 10 ⁻² | 1,37 |
| 1,00 | 8,16 × 10 ⁻² | 1,28 |
| 1,50 | 0,18 | 1,15 |
| 2,00 | 0,33 | 0,94 |
| 2,50 | 0,51 | 0,70 |
| 3,00 | 0,73 | 0,38 |
| 3,50 | 1,00 | 0 |



$$A_{total} = \pi(1.75)^2 = 9.62$$

$$A_{somb} = 6.25.$$

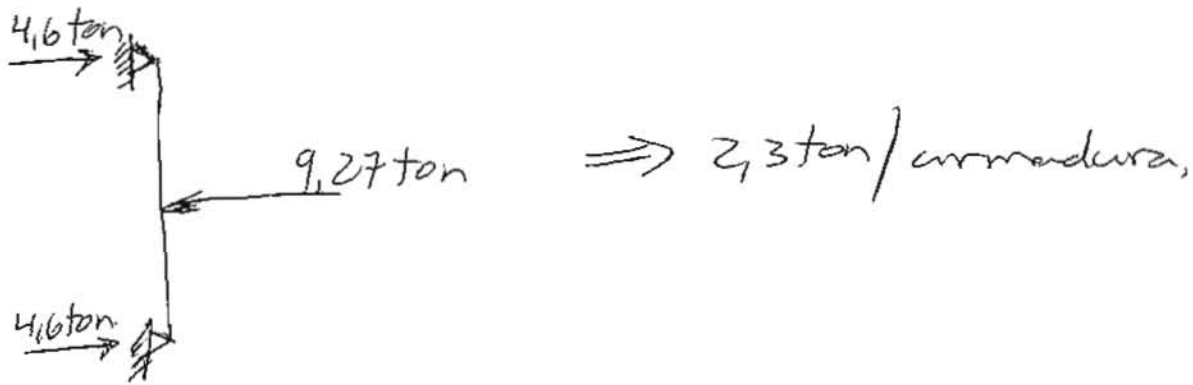
$$\frac{A_{tot}}{A_{somb}} = \frac{9.62}{6.25} = 1.54.$$

En la zona sombreada

$$F_i = 2.5 \int_{0.5}^{3.0} 1.4 \left[1 - \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right] dy = \left[1.4y - \frac{1.4y^3}{3h^2} \right]_{0.5}^{3.0} = [3.17 - 0.7] \times 2.5 = 6.18 \text{ ton}$$

$$F_{sismo} \approx F_1 \times 1,5 = 9,27 \text{ ton} \cdot$$

total



Aplicando SAP 90 a la armadura de la página (17)

- tenemos: (archivo chiles 4) se supone tubo $\phi_{nom} = 2\frac{1}{2}''$
 $A = 11 \text{ cm}^2 = 1,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
 $I = 64,2 \text{ cm}^4 = 6,42 \times 10^{-7} \text{ m}^4$
 $r = 2,4 \text{ cm}$

Por carga estática tenemos:

$$M_{\max} = \frac{w \cdot l^2}{10} = \frac{5,15 \times 5,5^2}{10} = 15,6 \text{ ton} \cdot \text{m}$$

$$p_{\max} = \frac{M}{e} = \frac{15,6}{2,5 \text{ m}} = 6,24 \text{ ton} \cdot$$

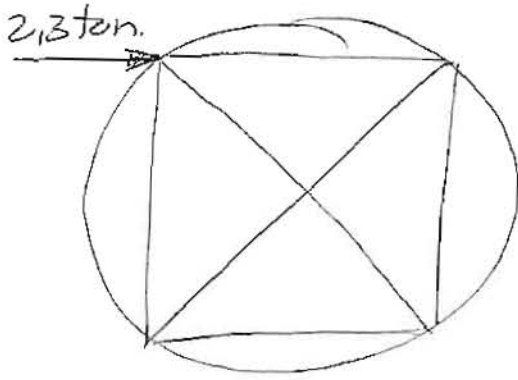
Por carga de sismo: (resultados SAP 90). (dirección larga)

$$P_{\max} = 2,3 \text{ ton}$$

Se revisa deflexión por carga estática ⇒ 0 k/a

Sismo en dirección: costz.

(20)



$$P_{\text{máx}} = -600 \text{ kg}$$

Archivo SAP 90: chiles 5

Tensión en tensores = 670 kg.

$$\Rightarrow P_{\text{diseño}} = 6,24 + 2,3 = 8,54 \text{ ton}$$

Tubo 2 1/2"

$$\frac{kl}{r} = \frac{1 \times 2,75}{2,14} = 114,6$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 \times 2,1 \times 10^6}{2800}} = 121,7$$

$$F_u = \frac{\left[1 - \frac{(114,6)^2}{2 \times 121,7^2} \right] 2800}{\frac{5}{3} + 3 \frac{(114,6)}{8 \times 121,7}} = \frac{1568}{\frac{5}{3} + 0,35} = 780 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_u = \frac{P}{A} = \frac{8500 \text{ kg}}{11 \text{ cm}^2} = 772 \text{ kg/cm}^2 < F_u \Rightarrow \text{OK!}$$



INFORME DEL PROYECTO

PROYECTO:

EVALUACION ESTRUCTURAL
LOSA DE CONCRETO TANQUE DE AGUA

PROPIETARIO:

ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS (ICAYA)

UBICACIÓN:

LOS CHILES PROVINCIA DE ALAJUELA

REALIZO:

ING. ORLANDO GEI BREALEY
IC-4827

FEBRERO 2014



PROYECTO:

Evaluación Estructural

Losa de concreto del tanque elevado (289m³)

1. DESCRIPCION DEL PROYECTO:

A solicitud del Ing. Victor Bendig se realizó una revisión estructural a la memoria de cálculo del tanque de agua en referencia. El objetivo de este informe es hacer una evaluación estructural del diseño ya que la losa de cimentación de concreto, en un tramo de aproximadamente 6,0m lineales proyecta una resistencia de 210 Kg/cm² en lugar de los 280 Kg/cm² solicitados.

El tanque de agua es un tanque elevado 15,0m sobre el nivel del terreno y soporta un tanque cilíndrico con un volumen de 289 m³. El tanque se ubica en el distrito Los Chiles, provincia de Alajuela. El proyecto se encuentra al momento del estudio con el 100% de la losa de concreto construida.

Se realizaron pruebas de laboratorio, y un estudio de los planos constructivos y de la memoria de cálculo empleada en el diseño.

2. DESCRIPCION GENERAL DE LA ESTRUCTURA:

En los planos constructivos se muestra un tanque de agua elevado a 15,0m sobre el nivel de terreno. El tanque metálico tiene una forma cilíndrica con un diámetro de 3,50m y se apoya sobre una estructura metálica tridimensional que tiene en el sentido corto una base de un ancho de 7,0m y en la parte superior 3,0m que coinciden con las dimensiones de un refuerzo metálico interno del tanque.

En el sentido largo del cilindro, el tanque tiene una longitud total de 26,25m y se apoya en columnas metálicas a cada 5,25m de luz. Estas columnas forman parte de la estructura tridimensional metálica de apoyo formada por tubos de acero grado 40 de columnas de 32,4 cm de diámetro externo o sea 12 pulgadas de diámetro interno y tubos en diagonales y horizontales de 21,9 cm de diámetro externo y 20,3 cm de diámetro interno (8 pulgadas).

La estructura metálica de apoyo construida en tubos es una estructura de 15,0 metros de altura con elementos horizontales intermedios que reducen la altura libre de las columnas a los 7,50m respecto a los apoyos. Los elementos horizontales y verticales están unidos por diagonales de tubos que forman una estructura reticular en los dos sentidos. Esta estructura de soporte, como esta conceptualizada, es una estructura con una muy grande capacidad estructural para tomar tanto cargas verticales como horizontales de viento y sismo.

El estudio de suelos realizado por la empresa IMNSA con fecha de setiembre del 2005 reporte IM-06-05 propone emplear una losa flotante para una capacidad admisible de soporte de 5,0 Ton/m². Se determina en este estudio la presencia de estrato blandos profundos por lo que sugiere excavar 2,0m de profundidad, rellenar 1,0m con material tipo lastre compactado al 95% del Proctor Modificado y sobre este relleno apoyar la losa de fundación.

La losa flotante indicada en planos es de 27,35m de largo por 13,0m de ancho y tiene un espesor de 1,0m en concreto reforzado con una capacidad mínima a la compresión de 280 Kg/cm². Sobre la losa sobresalen 12 pedestales de concreto reforzado de 50 x 50 cm, con 16 varillas #6 y aros #3 a cada 10 cm. La altura de estos pedestales es muy baja solamente se levantan 20cm. Adicionalmente por debajo de la losa de concreto se diseñó una trama de vigas inferior de concreto que forman una nervadura. Estas vigas tienen 75 cm adicionales en una sección variable de 50 cm de ancho que se reduce a 25cm en la parte inferior.

La construcción (colado del concreto) de la losa flotante se hizo por etapas con la ayuda de la empresa de premezclados MECO. Por ser un volumen tan grande (mas de 350m³) , el colado se realizó en 4

etapas consecutivas coladas con un día de diferencia cada una. Se realizaron 4 chorreas a saber: la primera de 8,0m de largo por 13,0m de ancho, la segunda de 6,2m de largo, la tercera de 6,0m y la cuarta y última de 7,15m todas por 13,0m de ancho. El primer reporte de laboratorio con resultados de cilindros de concreto muestra que la primer chorrea cumple con la resistencia especificada, sin embargo los otros proyectan valores menores a la resistencia de 280Kg/cm² y proyecta cerca de 210Kg/cm². Los concretos de la segunda colada incluso proyectan valores un poco mayores a los del primer reporte. La colada con “problemas indica compresiones mayores 180Kg/cm². Se adjuntan los resultados de estos resultados en los anexos.

3. EVALUACION ESTRUCTURAL MEMORIA:

De la revisión de la memoria de cálculo original empleada para el diseño del tanque, tenemos las siguientes observaciones y correcciones:

- En el cálculo del coeficiente sísmico para la estructura metálica del tanque en el sentido corto se emplea una estructuración tipo voladizo. Esta consideración es muy conservadora, sabiendo que tenemos una estructura hiperestática altamente redundante como estructura de soporte. Por esta consideración la ductilidad asignada es de solo 1,5 lo que eleva injustificadamente el coeficiente sísmico a 0,62. Es nuestro criterio, que este coeficiente de carga lateral –que es el que rige el diseño de todos los elementos- puede reducirse a 0,40 que es el coeficiente empleado en el sentido largo de la estructura. Para referencia estas configuraciones reticulares pueden tener ductilidades de hasta 7 o 9. El Código Sísmico de Costa Rica limita esta ductilidad a 3,0 sin embargo una estructura metálica regular como la propuesta puede tener una ductilidad de hasta 4,0.
- El cortante total empleado en el diseño de los pedestales es de 23500Kg, si hacemos la reducción de cortante por

sismo este cortante se reduce a 15 161Kg, que equivale a una reducción del 55%. Es nuestro criterio que el tanque se diseñó para una carga mucho mayor a la que exigen la normativa local.

- El apoyo empleado en el modelo estructural original la unión columna pedestal se asume como un empotramiento en las dos direcciones. Sin embargo este modelo puede asumirse como una articulación que transmite solo cortante y axial al pedestal. El hecho de tener una estructura reticular metálica horizontal a nivel inferior de la unión con el pedestal, permitiría desprestigiar la flexión en el apoyo. Se demuestra posteriormente en nuestros cálculos que aun considerando la flexo-compresión en el pedestal, la reducción de la capacidad a compresión del concreto no afecta la cantidad de acero colocado.
- La reducción de la capacidad a compresión del concreto de la losa flotante no reduce la resistencia pasiva de la cimentación, ya que se mantiene la sección lateral de la losa aplicada contra el terreno.
- La comprobación de la capacidad a flexión de la losa flotante muestra que el diseño original es muy conservador e incluso si se redujera el espesor a la mitad, manteniendo el acero colocado, la losa soportaría la flexión máxima incluso con un concreto de 210Kg/cm² de f'c. Esta comprobación se hizo para los mismos esfuerzos aplicados por la memoria original, a pesar de que ya mencionamos que las fuerzas de diseño de sismo en el sentido corto son muy elevadas.
- Se observa en el cálculo del refuerzo vertical de los pedestales que el esfuerzo por flexo-compresión en el concreto del pedestal es de 30,87Kg/cm². Esto quiere decir que la reducción en la capacidad a compresión del concreto de 280 a 210Kg/cm² no afecta significativamente porque el esfuerzo en la fibra extrema del pedestal es menor a la capacidad real.

- Es importante mencionar que la altura del pedestal es de solo 25 cm. El diseño de los mismos por la relación alto-ancho va obedecer más a un diseño por cortante que a un diseño por flexión. Está visto que la flexo compresión no se ve afectada por la reducción en la capacidad a compresión del concreto y se demuestra también que a nivel de cortante, esta baja en la resistencia finalmente no afecta el diseño actual del pedestal.
- Se hicieron los diagramas de interacción para una columna de 50 x 50 cm para las dos resistencia de concreto de 280 Kg/cm² y 210 Kg/cm² y se colocaron las demandas de momento y carga axial ultima del diseño original en los pedestales. En ambos casos cumple y el pedestal con el acero colocado está sobrado para un concreto de 210Kg/cm².
- En la memoria estudiada, específicamente en el cálculo de la fuerza cortante de los pedestales notamos un error. Cuando se determina el aporte del cortante del acero del pedestal (aros #3 @10cm) se encuentra una equivocación porque se emplean solo 0,61cm² como A_v (área de acero del estribo). El error se produce porque no se emplea el área total del acero de los aros de trabajan a cortante y que son 2#3 o sea se menosprecia el aporte total de los aros a menos de la mitad. El aporte de cortante total por el acero es de 17 892 Kg y se consideraron en la memoria es de solamente 7 694Kg. Esto quiere decir que solo el acero del pedestal es capaz de tomar el cortante máximo por sismo.
- Es importante mencionar que el corte CC de planos con el detalle del refuerzo del pedestal de concreto, muestra 2 aros en cada sentido para un total de 4 aros, esto quiere decir que el cálculo de la capacidad de cortante debería todavía aumentarse aún más. Si calculamos esta capacidad para la cantidad real de aros instalada obtenemos en cada dirección conservadoramente una capacidad a cortante por acero de 35 794 Kg de

capacidad a corte. Esto quiere decir que aun si no se redujeran las fuerzas laterales de sismo en el sentido corto y se usar el cortante del diseño original, el pedestal tiene los aros suficiente para por si solos tomar el cortante, sin requerir ninguna contribución del concreto.

- Con respecto al aporte del concreto en la capacidad a cortante del pedestal se tiene para un concreto de 280 Kg/cm² una capacidad de 19 953 Kg. Cuando calculamos este aporte para un concreto de 210Kg/cm² se obtiene una capacidad de 17 280 Kg. Esto muestra que la reducción de la capacidad a compresión del concreto no reduce tan significativamente la capacidad a cortante del pedestal.

4. CONCLUSIONES ESTRUCTURALES:

El diseño del tanque de agua tal y como se muestra en planos es muy conservador. A nivel de fuerzas sísmicas consideramos que la estructura completa se diseñó para una fuerza lateral que puede ser considerada un 55% más alta que la de un diseño convencional.

De la revisión de la estructura de concreto de la losa de fundación tanto a nivel de pedestal como a nivel de losa flotante se demuestra que la reducción de capacidad a compresión del concreto de 280Kg/cm² a 210 Kg/cm² no afecta el diseño ni la capacidad estructural del mismo.

Recomendamos por un asunto de durabilidad del acero de refuerzo, impermeabilizar el perímetro expuesto del concreto con más baja resistencia ya que la permeabilidad de un concreto es mayor en los concretos menos fuertes. Con esto se logrará a largo plazo tener la misma durabilidad del acero de refuerzo en todos los concretos.

.Atentamente,

Ing. Orlando Gei Brealey
ESTRUConsult S.A.
IC-4827

Referencias Bibliográficas

- American Institute of Steel Construction. (2005). *ANSI/AISC 350-05: Specification for Structural Steel Buildings*. Estados Unidos.
- American Petroleum Institute. (2012). *API STANDARD 650: Welded Tanks for Oil Storage*. Estados Unidos.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (2011). *Código Sísmico de Costa Rica 2010*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Decreto N 25235-MTSS: *Reglamento de seguridad en construcciones*. (26 de junio de 1996). Recuperado el 23 de marzo del 2014, de Comisión Nacional de Emergencias:
http://www.cne.go.cr/cedo_dvd5/files/flas_h_content/pdf/spa/doc377/doc377-contenido.pdf
- Decreto N 31363-MOPT: *Reglamento de Circulación por Carretera con Base en el Peso y las Dimensiones de los Vehículos de Carga*. (23 de setiembre de 2003). Recuperado el 15 de enero del 2014, de Sistema Costarricense de Información Jurídica:
http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=65404&nValor3=76423¶m2=2&strTipM=TC&IResultado=11&strSim=simp
- García Gei, D. (2003). *Tanque y recipientes apoyados y elevados - Análisis de acciones sísmicas*. Recuperado el 16 de abril del 2014, de Universidad Tecnológica Nacional de Argentina:
<http://www1.frm.utn.edu.ar/metlicas/Guia%20de%20Estudio/CMM-Tanques%20y%20Recipientes%20Elevados%20y%20Apoyados.pdf>
- Ministerio de Salud. (febrero de 2004). *Calidad del agua potable en Costa Rica: Situación actual y perspectivas*. Retrieved 8 de junio de 2014 from <http://www.bvs.sa.cr/php/situacion/agua.pdf>
- Muelas Rodríguez, Á. (n.d.). *Capítulo 4: Cimentaciones Directas*. Recuperado el 16 de abril del 2014, de Universidad Nacional de Educación a Distancia de España: http://www.uned.es/dpto-icf/mecanica_del_suelo_y_cimentaciones/images/mecansueloycimentacionescap_1.pdf
- Penalba Sánchez, D. (2010). *Análisis sísmorresistente de depósitos metálicos*. Recuperado el 16 de abril del 2014, de Universidad Carlos III de Madrid: <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/10234>
- Pilotes: Cargas Laterales*. (16 de abril de 2014). Recuperado el 16 de abril del 2014, de APUNTES INGENIERÍA CIVIL: <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2012/06/pilotes-cargas-laterales.html>